
**Segundo Taller de Estudio de País:
México**

México ante el cambio climático

MEMORIAS

Cuernavaca, Morelos, México, 8 a 11 de mayo de 1995



**INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGIA
SEMARNAP**



**U.S. COUNTRY STUDIES
PROGRAM**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA
DE MEXICO**

LOURDES VILLERS RUIZ e IRMA TREJO VAZQUEZ: Vegetación actual de México y escenario aplicando un incremento de 2° C en temperatura y disminución del 10% en la precipitación.....	165
FLORES, E. M., R. ARAUJO, E. BETANCOURT, D. LIVERMAN: Comportamiento en la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático global.....	179
FERRER, R., CONDE, C., VILLAREAL G., LIVERMAN, D.: Agricultura en México y cambio climático global.....	185
VICTOR L. BARRADAS: Fenología y cambio climático global.....	197
SANCHEZ ESPINO, P., A. LARQUE SAAVEDRA, T. NAVA SANCHEZ y R. SAN MIGUEL C'HAVEZ: Estudio preliminar del efecto de niveles elevados en bióxido de carbono atmosférico en algunos parámetros de crecimiento en <i>Lepidium sativum</i> L.....	203
M. A. ORTIZ PEREZ y A. P. MENDEZ LINARES: Vulnerabilidad del litoral a los efectos por ascenso del nivel del mar en las costas Bajas del Golfo de México.....	209
E. JAUREGUI, A. RUIZ, C. GAY, A. TEJEDA: Una estimación del impacto de la duplicación del CO ₂ atmosférico en el bioclima humano de México.....	219
ADRIAN GUILLERMO AGUILAR: Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humanos en México. Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático.....	243

Prólogo

En primer lugar, permítanme darles la bienvenida a nombre de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Julia Carabias Lillo y de Gabriel Quadri de la Torre, Presidente del Instituto Nacional de Ecología, al Segundo Taller sobre el Estudio de País: México.

Por otra parte, agradezco en especial la presencia de Jane Leggett, quien es responsable del proyecto por parte del Gobierno de Estados Unidos, a través de la Agencia para la Protección Ambiental, USEPA.

Al pensar en la introducción que presentaría en el Taller, consideré ¿qué podría decirles que resultara interesante, relevante y que resaltara o enfatizara la importancia del estudio?, que en colaboración con muchos investigadores e instituciones de investigación aquí presentes, estamos realizando.

No habiéndome decidido todavía ayer, me disponía a leer el periódico cuando a ocho columnas en la primera plana del periódico el Universal (domingo 7 de mayo, 1995) apareció la noticia:

“Afecta a 5 millones de hectáreas la sequía en seis Estados”, “Muestran las presas su nivel más bajo en los últimos años”

Precisamente el estudio que estamos realizando aborda estos problemas, en el contexto de cambio climático, así que esta noticia me permite ilustrar de que se trata su importancia. Los 5 millones de hectáreas se reparten entre los Estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Sinaloa, Nuevo León y Tamaulipas. Los cultivos afectados son sorgo, soya, maíz, algodón y frijol, entre otros.

Por otro lado, también se menciona el hecho de que las presas de la región se encuentran a niveles tan bajos como no se daban en mucho tiempo, poniendo en riesgo el abasto a la población. Esta crisis es la más grave de los últimos 25 años.

Citando algunos datos proporcionados por la nota, en Chihuahua 1.5 millones de hectáreas de cultivos básicos se han perdido, 1 millón en Sinaloa, 900,000 en Tamaulipas. En Durango se reportan pérdidas en 700,000 hectáreas, 500,000 en Nuevo León y en Coahuila 400,000.

También se menciona otro problema que es medular en nuestro estudio y esto tiene que ver con el pronóstico y con la planeación. En Tamaulipas, La Asociación Agrícola de Río Bravo se queja amargamente de que la Comisión Internacional de Límites y Agua se equivocó en su estimación de que habría suficiente agua, y ahora no la hay, poniendo en peligro sus cosechas. Ante esta situación, los afectados proponen tomar prestada agua de las reservas de Estados Unidos, pues sus presas se encuentran llenas.

Esto muestra claramente un problema de administración, ya que en lugares que comparten geografía y clima, unos conservan agua (EUA) y otros no.

Continúa la nota indicando la pérdida de 20,000 cabezas de ganado en Durango y la emigración de los habitantes en busca de alimento. Se menciona la necesidad de semilla mejorada a buen precio, para que los productores hagan frente al incremento del IVA que también daña la economía de los productores.

Los datos acerca de los daños que causa la sequía se extienden a la Comarca Lagunera en la que la Presa Lázaro Cárdenas está a menos del 30% de su capacidad, pues sólo tiene 1,017 millones de metros cúbicos de los 3,336 que podría contener, lo mismo ocurre con la Presa Francisco Zarco con 118 millones de metros cúbicos de 440.

En el norte del Estado las muertes de reses ha aumentado de 12,000 a 30,000 en solo 4 días, y de los cultivos de temporal solo se han plantado 322 hectáreas de 50,000 programadas.

En Coahuila 400,000 hectáreas sembradas con granos básicos están dañadas; en Sinaloa se espera una reducción del 35% y se habla de un millón de hectáreas siniestradas por falta de riego.

En Chihuahua la situación es tan grave que la Unidad de Protección Civil se prepara. El promedio de captación de las presas está en 13%, en la zona serrana se espera un aumento de la hambruna. En Nuevo León la muerte de ganado aumenta, más del 30% del área dejó de sembrarse y se ha decretado estado de emergencia después de 16 meses de sequía. Cerro Prieto, con capacidad para 396 millones de metros cúbicos tiene 104, La Boca con una capacidad de 41 millones tiene 18.3 y El Cuchillo con capacidad de 1,784 solo contiene 174.6 millones.

En el mismo diario se presentan otras notas que pueden ser relevantes a nuestro estudio. En Honduras las etnias Tawahkas se ven en peligro de extinción por la presión que ejercen, madereros y ganaderos.

Estas tribus han vivido en armonía con su entorno por muchos siglos y ahora están en peligro de extinción junto con éste. La protección de ambos significa proteger el sistema climático al no alterar los sumideros de carbono que representan las selvas.

Una noticia relacionada que leí recientemente, se refiere al Surinam antes Guyana Holandesa que retiene 90% de su bosque tropical y que es hogar de poblaciones africanas y de origen nativo. Por siglos sus tribus han vivido sin perturbar la selva. Sin embargo han concesionado el 25% de la selva para ser cortada en los próximos 25 años, representando de acuerdo a un estudio, un ingreso de 2.6 millones de dólares para el país, mientras que los madereros se llevarán 28 millones. Aquí se plantea la opción de que el BID debería colaborar para proteger la selva con financiamiento de opciones como ecoturismo, bioprospección y el pago de regalías por sustancias descubiertas.

Otra noticia del Universal de ayer se refiere a la muerte de 12 personas en el norte de Texas a causa de una granizada que en veinte años no había tenido semejante intensidad.

Mi propósito al mencionar estas noticias es, como dije al principio, llamar la atención a fenómenos que están relacionados con el clima. En primer lugar se refieren a eventos extraordinarios, es decir que no ocurren con mucha frecuencia y que podrían ser síntomas del Cambio Climático.

Por ejemplo, en un país como el nuestro, con un porcentaje muy alto de territorio clasificado como árido o semiárido y teniendo en cuenta algunas simulaciones de clima que indican un aumento de la aridez, podríamos pensar que la sequía que estamos documentando es el resultado del cambio. De no ser este el caso, de cualquier manera, los eventos que acabo de describir podrían, de acuerdo a las simulaciones del clima, volverse crónicas con consecuencias sociales y económicas muy serias.

Nuestro estudio trata de entender las causas y los efectos del Cambio Climático con el propósito de proporcionarnos herramientas de análisis para poder enfrentar a él.

Por otro lado también analizaremos medios para mitigarlo, de aquí nuestro interés en el mantenimiento de los sumideros de bióxido de carbono.

Sabemos que la causa principal del cambio climático global es el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, de aquí que en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático el propósito principal es el de estabilizar las concentraciones de estos gases en la atmósfera a niveles que no interfieran negativamente con el sistema climático.

Así que lo primero que tenemos que hacer es saber cuánto estamos emitiendo a la atmósfera y por ende tenemos que construir nuestro inventario.

Después tenemos que decidir que podemos hacer para evitar emisiones innecesarias, así que tenemos que construir diferentes escenarios en los que podemos incluir diferentes opciones ya sea tecnológicas o de política, cuyo propósito sea racionalizar dichas emisiones.

Como no es posible suspender estas emisiones totalmente, tenemos que asumir que el planeta se seguirá calentando. Por lo tanto, construimos escenarios futuros climáticos que nos permitan estudiar cómo estos cambios podrían afectar nuestras formas de producción, con el objeto de pensar en las medidas de adaptación que podemos asumir.

Es muy importante entonces que a lo largo del taller vayamos pensando en cuáles son las preguntas fundamentales que nos debemos hacer, de manera que podamos enfrentarnos al cambio de manera menos traumática.

Carlos Gay G.

Lista de Asistentes

Guillermo	Aguilar	✓	Instituto de Geografía, UNAM
Isabel	Aguirre		Instituto Nacional de Ecología
Manuel	Anaya	✓	Colegio de Posgraduados, Chapingo
David	Antonioli		ICF Incorporated
* Raquel	Araujo		Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
José	Arvizu	✓	Instituto de Investigaciones Eléctricas
* José Luis	Aznar		Instituto Nacional de Ecología
Victor	Barradas	✓	Centro de Ecología, UNAM
* Mariano	Bauer	✓	Programa Universitario de Energía
* Edith	Betancourt		Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
* Roy	Boyd	✓	Ohio University
* Alejandro	Calvillo		Green Peace
Cecilia	Conde	✓	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Luis	Conde	✓	Instituto Nacional de Ecología
* Dick	Cuatecontzi	✓	Instituto Mexicano del Petróleo
* Rosa María	Ferrer	✓	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
✓ Margarita	Flores		Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Luis	Galindo	✓	Instituto Nacional de Ecología
Jorge	Gasca	✓	Instituto Mexicano del Petróleo
Carlos	Gay		Instituto Nacional de Ecología
Juan Carlos	Gómez		Facultad de Filosofía, UNAM
Eugenio	González		Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Francisco	Guzmán	✓	Instituto Mexicano del Petróleo
María Engracia	Hernández	✓	Instituto de Geografía, UNAM
Tomás	Hernández	✓	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias
Mireya	Imaz	✓	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Emesto	Jaúregui		Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Arturo	Jiménez		Instituto de Geografía, UNAM
Alfonso	Larqué	✓	Colegio de Posgraduados, Chapingo
Jane	Leggett		Environmental Protection Agency
* Diana	Liverman	✓	Penn. State University

X Laura	Maderey	Instituto de Geografía, UNAM
X Víctor	Magaña	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
X Julia	Martínez	Instituto Nacional de Ecología
X Omar	Masera	Centro de Ecología, UNAM
X Víctor	Mendoza	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
X Carlos	Morales	Facultad de Geografía, UAEM
X Rafael	Moreno	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias
X Ramón	Muñoz	Instituto de Investigaciones Eléctricas
X Antonio	Ordóñez	Centro de Ecología, UNAM
X Oralia	Oropeza	Instituto de Geografía, UNAM
X Mario Arturo	Ortiz	Instituto de Geografía, UNAM
X Juan	Quintanilla	Programa Universitario de Energía
X Luis	Rodríguez	Instituto de Ingeniería, UNAM
X José	Romero	Colegio de México
X Luis Gerardo	Ruiz	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
X Teresa	Sánchez	Instituto de Geografía, UNAM
X Oscar	Sánchez	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
X Claudia	Sheinbaum	Instituto de Ingeniería, UNAM
X Adalberto	Tejeda	Universidad Veracruzana
X Irma	Trejo	Instituto de Geografía, UNAM
X Víctor	Urquidi	Colegio de México
X Eduardo	Vega	Instituto Nacional de Ecología
X Omar Kayam	Villalpando	Instituto de Geografía, UNAM
X Gloria	Villarreal	Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
X Lourdes	Villers	Instituto de Geografía, UNAM
X Rafael	Zárate	Colegio de Posgraduados, Chapingo

Introducción

En abril de 1994, asistimos al primer taller sobre el Estudio de País: México donde presentamos la estructura del estudio y discutimos las metodologías que seguiríamos en los tres grandes temas en los que este se dividiría: Inventarios, Escenarios y Vulnerabilidad. Entonces presentamos trabajos que se realizaron con otros propósitos pero que con cambios en su orientación podrían enfocarse hacia temas y tópicos relevantes al cambio. Estos trabajos sirvieron como base para la discusión de las metodologías que serían empleadas en el futuro.

En el área de Inventarios se discutió y decidió el programa, los gases y el énfasis que se darían a las diferentes fuentes, decidimos empezar por aquellos que representan mayor importancia, dejando para el final aquellos cuyas contribuciones sospechábamos fueran pequeñas.

En el área de escenarios físicos se presentaron las simulaciones de clima bajo la suposición del doblamiento de bióxido de carbono, que darían la base para los estudios de vulnerabilidad. En esta se presentaron estudios preliminares en los diferentes temas que abordaríamos y en escenarios de emisiones discutimos los parámetros socio - económicos que servirían de marco para la determinación de los escenarios futuros de gases de invernadero.

En este segundo taller presentamos resultados que representan un año de esfuerzo a partir de los planes originales. Grandes avances se han realizado y nos permiten corregir direcciones y determinar qué es lo que debemos hacer para concluir los estudios con los énfasis buscados.

Estas memorias contienen contribuciones que enriquecen los temas planteados, aunque no representan todos los temas expuestos durante el taller, pues, de acuerdo a la intención del mismo, de presentar avances de los estudios emprendidos, esto significó que algunos no estarían acabados. Sin embargo, las discusiones fueron muy valiosas, éstas se llevaron a cabo durante las sesiones del taller y en sesiones paralelas, en estas últimas se hicieron recomendaciones para cada línea de estudio que separadamente enriquecerán los resultados finales.

Estas memorias están organizadas siguiendo el esquema del estudio propuesto en un principio, aunque con algunas modificaciones.

Empieza presentando resultados que serán incluidos en el inventario de emisiones. Se discuten las emisiones de CO_2 a partir de actividades energéticas y el consumo de combustibles por las principales actividades productivas del país. Se incluyen emisiones de monóxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles diferentes del metano. Se analizan también tendencias y perspectivas del uso de la energía eléctrica desde el punto de vista de la oferta y la demanda; de su variación debida al uso de la electricidad y se proponen algunas medidas, debidas a consideraciones de tipo ambiental y global, para disminuir las emisiones, basadas en transformaciones tecnológicas.

Las emisiones de metano, a partir de las operaciones de producción de petróleo crudo y debidas a la distribución y uso de gas natural son discutidas en otro artículo.

La importancia de las emisiones de metano por fermentación entérica del ganado queda documentada en otro artículo que también analiza las emisiones de óxido nitroso por usos de fertilizantes.

Como uno de los propósitos del Estudio de País: México es dar las bases para la toma de decisiones en torno de los compromisos de México con respecto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático Global y dentro éstas se contempla, a mediano plazo, la posibilidad de reducir emisiones. Otro estudio se centra en los efectos que tendría sobre la economía y en particular sobre las emisiones de CO_2 la imposición de impuestos sobre carbono como un medio de internalizar costos ambientales y globales. Un estudio relacionado analiza los efectos que el nivel de actividad productiva y la inflación tienen en el consumo de gasolinas en México.

Siguiendo con el esquema del Estudio de País, y una vez analizada nuestra contribución al Cambio Climático, vía nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, pasamos a los estudios de vulnerabilidad del país.

Para analizar esto es necesario contar con escenarios climáticos. Es decir, tener una idea de como van a ser la temperatura y la precipitación en México en el futuro; dos trabajos toman este tema y lo analizan desde un punto de vista global hasta llegar a un nivel regional que es el aplicable a México. A partir de esta visión del futuro otros artículos analizan la vulnerabilidad en México concentrándose en la agricultura y en los lineamientos estratégicos y políticas de manejo de suelos que propicien el desarrollo sustentable. En ese artículo y otro relacionado se tratan los problemas de la degradación del suelo en términos generales y en particular la vulnerabilidad debido a la erosión eólica en el Estado de México. La vulnerabilidad de los recursos hidrológicos se explora en dos artículos, en el primero se establecen las condiciones generales actuales y en el segundo se analizan con mayor detalle tres regiones hidrológicas del país.

Utilizando un modelo de sensibilidad se exploran los cambios que ocurrirían en la vegetación actual de México de acuerdo a la clasificación de Holdridge. Se concluye que los bosques de coníferas y encinos se verían negativamente afectados.

El cultivo de maíz bajo condiciones de cambio climático se vería afectado seriamente al ser reducidas considerablemente las zonas aptas para éste.

La aplicación del modelo CERES para la productividad del maíz para condiciones de calentamiento global es el tema de otro artículo.

Otros temas explorados en esta sección se refieren al papel que juega la fenología vegetal en el estudio del impacto de cambio del clima en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Estos conocimientos podrían aplicarse a estrategias de adaptación, al escoger cultivos más resistentes al cambio. Un tema controversial es el efecto fertilizador del exceso de CO_2 y es tratado en otro artículo.

También se exploran los impactos que una elevación del nivel del mar tendría en zonas costeras, se analizan la vulnerabilidad de éstas un metro y dos metros por encima del nivel de marea alta. Finalmente, los estudios se concentran en los efectos directos sobre los humanos a través de estudios del cambio en los niveles de confort producidos por el calentamiento global y en la complicación que con respecto a la vulnerabilidad representan nuestras estimaciones de crecimiento poblacional.

En el segundo taller se recogen por tanto estudios que como mencionamos anteriormente tienen un año de maduración, los resultados son más impactantes, pues lo que se sospechaba en el primer taller se confirma en el segundo.

Estos resultados son el preámbulo a un análisis más profundo que se llevará a cabo al final del estudio. Sin embargo, éste significará solamente otra etapa en un esfuerzo que deberá continuar hasta que se cumplan los propósitos del estudio, que fundamentalmente se concentran en proveer bases científicas y técnicas para la toma de decisiones políticas en relación a la preparación del país para enfrentar el cambio, y a nuestros compromisos internacionales.

CO₂ y GHG's energéticos México 1990

RAMON MUÑOZ LEDO

Instituto de Investigaciones Eléctricas

RESUMEN

El presente se realizó como parte del Proyecto Nacional de Inventarios que se desarrolla en México para el Instituto Nacional de Ecología, con el apoyo de ICF-EPA y PNUMA.

Este documento se divide en 2 grandes partes, la primera incluye información de cuánto CO₂ se produce por actividades energéticas y cuáles son las consideraciones que se hicieron para obtener dichos valores; la segunda incluye el consumo de combustibles de las principales actividades productivas del país, los factores de emisión que sugiere la metodología para calcular las emisiones de Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH₄), Oxidos de Nitrógeno (NO_x, N₂O), e Hidrocarburos Volátiles que no son Metano (NMVOC's), y los resultados que se obtienen de relacionar los factores de emisión y el consumo de combustibles.

ABSTRACT

The present work was done as part of a National Project Inventories that is currently under process in Mexico for the National Institute of Ecology, with the support of ICF-EPA and PNUMA.

This document is divided in 2 parts, the first includes information on how much CO₂ is produced by energy activities and the assumptions involved to get the corresponding values; the second includes the consumption of fuels by the principal productive activities of the country, the factors of emission that are suggested by the methodology to calculate the emissions of Carbon Monoxide (CO), Methane (CH₄), Nitrogen Oxides (NO_x, N₂O), and Non Methane Volatiles of Carbon (NMVOC's) and the results that are obtained by relating the factors of emission and the consumption of fuels.

1. Introducción

El bióxido de carbono es el más común de los gases de efecto invernadero (GHG's) producido por las actividades antropogénicas, la principal fuente es la oxidación de los combustibles fósiles totalizando de un 70 a un 90% del total de las emisiones antropogénicas de CO₂. Estas emisiones se derivan principalmente de la combustión de los combustibles fósiles en donde la mayoría del carbono contenido en el combustible se libera como CO₂ durante el proceso de combustión, otra parte del carbón se libera como CO, CH₄, o hidrocarburos no metano los cuales se oxidan para formar CO₂ en un período que va desde unos cuantos días hasta 8-10 años. La cantidad de CO₂ emitido depende directamente de la cantidad de combustible consumido, de la fracción de carbón del combustible que se oxida y del contenido de carbón del combustible.

Para estabilizar las concentraciones atmosféricas, se requiere una reducción sustancial de las emisiones totales de los gases efecto invernadero. El lograrlo implicará cambios tecnológicos significativos que afectarán las condiciones económicas, políticas y sociales tanto a nivel nacional como global.

A nivel mundial se están tomando medidas para evitar, en lo posible, las potenciales consecuencias del Cambio Climático. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), organización a la que pertenece México, tiene el compromiso de disminuir las emisiones de CO₂ a los niveles de 1990. El compromiso contenido en la convención de RIO 1992 establece que cada país deberá desarrollar una estrategia nacional para reducir sus emisiones de CO₂ y otros gases invernadero.

Afortunadamente, es posible obtener una estimación precisa de las emisiones nacionales de CO₂ (1), mediante el control que llevan los países de sus actividades económicas, con esto se puede obtener una buena aproximación a partir del balance estadístico de energía.

Para contabilizar las actividades energéticas se debe tener una clasificación clara de combustibles primarios (combustibles que se encuentran en estado natural) y secundarios (productos o combustibles que sufren una transformación), la contabilidad de Carbono está basada en las cantidades suministradas de combustibles primarios y la cantidad de combustibles secundarios producidos en el país.

Para calcular las emisiones de GHG's en el país y año seleccionado, se deben tener los siguientes datos (1) :

PRODUCCION DE COMBUSTIBLES PRIMARIOS.
IMPORTACION DE COMBUSTIBLES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.
EXPORTACION DE COMBUSTIBLES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.
VARIACION DE COMBUSTIBLES ALMACENADOS.
COMBUSTIBLES USADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGETICAS.
DEPOSITOS DE COMBUSTIBLES INTERNACIONALES.
PRODUCCION DE BIOMASA.

2. Cálculos de emisiones de CO₂ energético

Los cálculos que se realizan parten de que la masa y la energía no se crean ni se destruyen, sólo se transforma y para obtener las estimaciones energéticas requeridas se hace un balance energético que se puede expresar como :

$$\text{ACUMULADO(CONSUMO APARENTE)} = \text{ENTRADA} - \text{SALIDA}$$

El consumo aparente de energía depende de la entrada que se puede expresar como:

$$\text{ENTRADA} = \text{PRODUCCION} + \text{IMPORTACION}$$

Y la salida en la que inciden:

$$\text{SALIDA} = \text{EXPORTACION} + \text{STOCKS}$$

El consumo aparente de energía queda como:

$$\text{CONSUMO APARENTE} = \text{PRODUC.} + \text{IMPORT.} - \text{EXPORT.} - \text{STOCKS}$$

El BALANCE NACIONAL DE ENERGIA DE MEXICO (BNE) 1990 (2), describe 14 tipos de combustible, los cuales estan en las siguientes proporciones:

MODULO			ENERGIA					
SUBMODULO			CO ₂ DE FUENTES DE ENERGIA (APROXIMACION)					
HOJA DE TRABAJO			I-1					
HOJA			1 DE 5					
					PASO 1			
			A PROD.	B IMPOR	C EXPOR	D B I	E STOCK	F CONS APAR
TIPO DE COMBUSTIBLE								F=A+B- C-D-E
LIQUIDOS FOSILES	PRI MA RIA	CRUDO	1401.3	0.0	703.9		3.1	694.3
		CONDENSADO	57.3	0.0	0.0		0.0	57.3
	SE- CUN DA- RIA	GASOLINA@		17.3	4.0	ND	0.7	12.6
		KEROSINA		0.0	7.5	ND	-0.6	- 6.9
		DIESEL		0.0	16.6	ND	-1.3	- 15.3
		COMBUST.		30.2	4.5		0.3	25.4
TOTAL DE LIQ. FOSILES			1458.6	47.5	736.5	ND	2.2	767.4
SOLIDOS FOSILES	PRI	CARBON	35.6	1.4	0.0		1.5	35.5
	SEC	COQUE		0.8	0.0		-0.2	1.0
TOTAL DE SOL. FOSILES			35.6	2.2	0.0	ND	1.3	36.5
GASES FOSILES	SEC	G.L.P.		8.1	18.1		0.0	- 10.0
		G.ASOCIADO		0.0	0.0		0.2	- 0.2
	PRI	GAS	212.8	4.0	0.0		0.0	216.8
TOTAL DE GAS FOSILES			212.8	12.1	18.1	ND	0.2	206.6
TOTAL			1707.0	61.8	754.6	ND	3.7	1010.5
BIOMASA TOTAL			91.6	0.0	0.0		0.0	91.6
		B. SOLIDA#	91.6	0.0	0.0		0.0	91.6

MODULO			ENERGIA					
SUBMODULO			CO ₂ DE FUENTES DE ENERGIA (APROXIMACION)					
HOJA DE TRABAJO			I-1					
HOJA			1 DE 5					
			PASO 1					
			A PROD.	B IMPOR	C EXPOR	D B I	E STOCK	F CONS APAR
TIPO DE COMBUSTIBLE								F=A+B- C-D-E
LIQUIDOS FOSILES	PRI MA RIA	CRUDO	1401.3	0.0	703.9		3.1	694.3
		CONDENSADO	57.3	0.0	0.0		0.0	57.3
	SE- CUN DA- RIA	GASOLINA@		17.3	4.0	ND	0.7	12.6
		KEROSINA		0.0	7.5	ND	-0.6	- 6.9
		DIESEL		0.0	16.6	ND	-1.3	- 15.3
		COMBUST.		30.2	4.5		0.3	25.4
TOTAL DE LIQ. FOSILES			1458.6	47.5	736.5	ND	2.2	767.4
SOLIDOS FOSILES	PRI	CARBON	35.6	1.4	0.0		1.5	35.5
	SEC	COQUE		0.8	0.0		-0.2	1.0
TOTAL DE SOL. FOSILES			35.6	2.2	0.0	ND	1.3	36.5
GASES FOSILES	SEC	G.L.P.		8.1	18.1		0.0	- 10.0
		G.ASOCIADO		0.0	0.0		0.2	- 0.2
	PRI	GAS	212.8	4.0	0.0		0.0	216.8
TOTAL DE GAS FOSILES			212.8	12.1	18.1	ND	0.2	206.6
TOTAL			1707.0	61.8	754.6	ND	3.7	1010.5
BIOMASA TOTAL			91.6	0.0	0.0		0.0	91.6
B. SOLIDA#			91.6	0.0	0.0		0.0	91.6

MODULO			ENERGIA					
SUBMODULO			CO ₂ DE FUENTES DE ENERGIA (APROXIMACION)					
HOJA DE TRABAJO			I-1					
HOJA			1 DE 5					
					PASO 1			
			A PROD.	B IMPOR	C EXPOR	D B I	E STOCK	F CONS APAR
TIPO DE COMBUSTIBLE								F=A+B- C-D-E
LIQUIDOS FOSILES	PRI MA RIA	CRUDO	1401.3	0.0	703.9		3.1	694.3
		CONDENSADO	57.3	0.0	0.0		0.0	57.3
	SE- CUN- DA- RIA	GASOLINA@		17.3	4.0	ND	0.7	12.6
		KEROSINA		0.0	7.5	ND	-0.6	- 6.9
		DIESEL		0.0	16.6	ND	-1.3	- 15.3
		COMBUST.		30.2	4.5		0.3	25.4
TOTAL DE LIQ. FOSILES			1458.6	47.5	736.5	ND	2.2	767.4
SOLIDOS FOSILES	PRI	CARBON	35.6	1.4	0.0		1.5	35.5
	SEC	COQUE		0.8	0.0		-0.2	1.0
TOTAL DE SOL. FOSILES			35.6	2.2	0.0	ND	1.3	36.5
GASES FOSILES	SEC	G.L.P.		8.1	18.1		0.0	- 10.0
		G.ASOCIADO		0.0	0.0		0.2	- 0.2
	PRI	GAS	212.8	4.0	0.0		0.0	216.8
TOTAL DE GAS FOSILES			212.8	12.1	18.1	ND	0.2	206.6
TOTAL			1707.0	61.8	754.6	ND	3.7	1010.5
BIOMASA TOTAL			91.6	0.0	0.0		0.0	91.6
B. SOLIDA#			91.6	0.0	0.0		0.0	91.6

NOTAS : La información que se ocupo y las notas que se tomaron en cuenta están descritas en el BALANCE NACIONAL DE ENERGIA (2), los datos están dados en Petacalorías (1×10^{15} Calorías).

No incluye : Nucleoenergía, Geoenergía, Hidroenergía y Electricidad.

Condensado, son los líquidos del gas natural que se recuperan incluido el de los gasoductos.

@ En el Balance Nacional de Energía no se desagregan las gasolinas y los naftas.

ND No hay datos disponibles.

De acuerdo a la metodología no se debe incluir.

MODULO			ENERGIA				
SUBMODULO			CO ₂ DE FUENTES DE ENERGIA (APROXIMACION)				
HOJA DE TRABAJO			I-1				
HOJA			2 DE 5				
			PASO 2			PASO 3	
			G CONVER. FACTOR TJ/Pcal	H APAREN. CONSUMO (10 ⁴ TJ)	I FACTOR EMISION (tC/TJ)	J CONT. CARB. (t C)	K CONT. CARB. (Tg C)
TIPO DE COMBUSTIBLE			x10 ³	H=(F×G)		x10 ⁶	
LIQUIDOS FOSILES	PRI MA RIA	CRUDO	4.1868	290.69	20.00	58.14	58.14
		CONDENSADO	4.1868	23.99	15.30	3.67	3.67
	SEC UN DA RIA	GASOLINA@	4.1868	5.28	18.90	1.00	1.00
		KEROSINA	4.1868	-2.89	19.60	-0.57	-0.57
		DIESEL	4.1868	-6.41	20.20	-1.29	-1.29
		COMBUST.	4.1868	10.63	21.10	2.24	2.24
TOTAL DE LIQ. FOSILES				330.50		63.19	63.19
SOLIDOS FOSILES	PRI	CARBON	4.1868	14.86	25.80	3.84	3.84
	SEC	COQUE	4.1868	0.42	29.50	0.12	0.12
TOTAL DE SOL. FOSILES				15.28		3.96	3.96
GASES FOSILES	SEC	G.L.P.	4.1868	- 4.19	20.00	-0.84	-0.84
		G.ASOCIADO	4.1868	- 0.08	15.30	-0.01	-0.01
	PRI	GAS	4.1868	90.77	15.30	13.89	13.89
TOTAL DE GAS FOSILES				86.50		13.04	13.04
TOTAL				432.28		80.19	80.19
TOTAL DE BIOMASA				38.35		11.47	11.47
		B. SOLIDA		38.35	29.90	11.47	11.47

La producción de Carbono por lo tanto dependerá fuertemente de la cantidad de energía consumida así como de los factores de emisión que se tomen F_{emi} por unidad de energía consumida (Toneladas de Carbono por TeraJoule 't C/TJ'), de acuerdo con la ecuación:

$$C(KgC) = \sum_{i=1}^{14} F_{emi} * CONSUMO_i$$

De la totalidad de combustibles producidos hay cantidades que no se queman porque se usan como lubricantes, solventes, etc., lo cual reduce la cantidad total de emisiones estimadas con la siguiente ecuación :

$$C(KgC) \text{ sec.} = \sum_{i=1} F_{emi} * COMB. (NOENER)$$

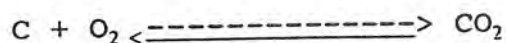
De acuerdo con el balance de energía de México en 1990, no todos los combustibles desglosados en el cálculo de la producción de 'C' en CO₂ tienen actividades no energéticas, en la siguiente tabla se ponen los valores de los combustibles que no fueron oxidados :

MODULO	ENERGIA							
SUBMODULO	CO ₂ DE ENERGIA							
HOJA TRABAJO	HOJA AUXILIAR I-1, ESTIMACION DE CARBONO SECUESTRADO							
HOJA	1 DE 1							
	A COMB. ESTI. Pcal.	B FACT. CONV. TJ/Pca	C COMB EST. 10 ⁴ TJ	D FACT EMIS tC/TJ	E CARB. CONT. 10 ³ t C	F CARB CONT Tg C	G FRAC CARB SEC.	H CARB SEC. Tg C
COMBUSTIBLE		x10 ³	C=AxB		E=CxD	E x10 ⁻³		H=FxG
PET. CRUDO	51.24	4.1868	21.45	20.0	4290.	4.29	0.75	3.21
GAS	28.04	4.1868	11.74	15.3	1796.	1.80	0.33	0.59
GASOLINAS@	17.38	4.1868	7.28	18.9	1376.	1.38	0.80	1.10
BAGAZO*	1.68	4.1868	0.70	29.9	209.	0.21	0.75	0.16
KEROSINA	0.10	4.1868	0.04	19.6	8.	0.01	0.80	0.01
COQUE	0.30	4.1868	0.13	29.5	38.	0.04	0.75	0.03
TOTAL	98.74	4.1868	41.34		7717.	7.72		5.10

Por lo tanto la cantidad de Carbono producido queda como :

$$CO_2 (KgC) \text{ sec.} = \sum_{i=1}^{14} F_{em_i} * CONSUMO_i - \sum_{i=1}^{14} F_{em_i} * COMB. (NOENER)$$

Y tomando en cuenta que la oxidación del 'C' a CO₂ ocurre de acuerdo con la siguiente reacción química:



Así como la relación de pesos moleculares, encontramos que por cada 12 gramos de Carbono se producen 44 gramos de CO₂, los resultados de emisiones se pueden ver en la siguiente tabla :

MODULO			ENERGIA				
SUBMODULO			CO ₂ DE FUENTES DE ENERGIA (APROXIMACION)				
HOJA DE TRABAJO			I-1				
HOJA			3 DE 5				
			PASO 4		PASO 5		PASO 6
			L CARBONO SECUES. (Tg C)	M EMISION NETA C. (Tg C)	N FRACCION CARBONO OXIDADO	O EMISION ACTUAL C (Tg C)	P EMISION A. CO ₂ (TgCO ₂)
TIPO DE COMBUSTIBLE				M=(K-L)		O=(MxN)	P=Ox44/12
LIQUIDOS FOSILES	PRI MA RIA	CRUDO	3.21	54.93	0.990	54.381	199.40
		CONDENSADO	ND	3.67	0.990	3.633	13.32
	SEC UN DA RIA	GASOLINA@*	1.10	-0.10	0.990	-0.100	-0.37
		KEROSINA	0.01	-0.58	0.990	-0.574	-2.10
		DIESEL	ND	-1.29	0.990	-1.277	-4.68
		COMBUST.	ND	2.24	0.990	2.218	8.13
TOTAL DE LIQ. FOSILES			4.32	58.87		58.281	213.70
SOLIDOS FOSILES	PRI	CARBON	ND	3.835	0.980	3.758	13.78
	SEC	COQUE	0.03	0.094	0.980	0.092	0.34
TOTAL DE SOL. FOSILES			0.03	3.929		3.850	14.12
GASES FOSILES	SEC	G.L.P.	ND	-0.837	0.995	-0.833	-3.05
		G.ASOCIADO	ND	-0.013	0.995	-0.013	-0.05
	PRI	GAS	0.59	13.298	0.995	13.232	48.52
TOTAL DE GAS FOSILES			0.59	12.448		12.387	45.42
TOTAL			4.94	75.247		74.518	273.24
TOTAL DE BIOMASA			0.16	11.307		10.924	40.05
		B. SOLIDA	0.16	11.307	0.980	10.924	40.05

NOTA : @* En la parte de Carbono secuestrado no se encuentran desagregados Gasolinas y Naftalinas, y los valores que señala el BNE (2), sólo se señala consumo final no energético de gasolinas y naftas el 17.6% del total de 98.734 Petacalorías, lo cual da un valor negativo en el consumo aparente al aplicar los cálculos que señala la metodología del IPCC.

3. Emisiones de CO₂ no energéticos

Las emisiones de gases efecto invernadero también se producen como producto de actividades no energéticas en la industria, el comercio y el sector residencial. En la industria, las principales fuentes de emisión son los procesos de producción que transforman químicamente las materias primas de un estado a otro. Durante este proceso de transformación se emiten gases efecto invernadero.

La producción de cemento es quizás el ejemplo más notable de estos procesos en donde se libera una cantidad significativa de CO₂, ya que ésta representa aproximadamente el 2.5% del total de emisiones (3), de acuerdo con la siguiente tabla:

MODULO	PROCESOS INDUSTRIALES		
SUBMODULO	CO ₂ DE LA PRODUCCION DE CEMENTO.		
HOJA DE TRABAJO	2-I		
HOJA	1 de 1		
	PASO 1		PASO 2
A CEMENTO PRODUCIDO (t)	B FACTOR DE EMIS. (t CO ₂ /t CEMENTO)	C CO ₂ EMITIDO (t)	D CO ₂ EMITIDO (Gg)
		C=(AxB)	D=C/1000
23,312,000 (4,5)	0.4895 (6)	11,621,032	11,621.03

4. Cálculos de GHG's, NO, CO₂

Para calcular las emisiones de GHG's que no son Bióxido de Carbono (CO₂) se consideran las emisiones que producen las fuentes estacionarias y las fuentes móviles de acuerdo con las fórmulas que señala la metodología del IPCC (1) :

$$Emisiones = \sum_{i=1}^{Fs} EF_{abc} * Actividad_{abc}$$

donde:

1).- FUENTES ESTACIONARIAS

En México las emisiones de GHG's por actividades relacionadas al consumo de energía por fuentes estacionarias se encuentran agrupadas en los siguientes 3 sectores:

Industrial

Residencial, Comercial y Público.

Generación de Electricidad.

EF = Factor de Emisión en gramos/GigaJoule (g/GJ).

Actividad = Consumo de Energía (GJ).

a = Tipo de Combustible.

b = Sector Energético (actividad energética).

c = Tipo de Tecnología.

CONSUMO DE COMBUSTIBLES ACTIVIDADES INDUSTRIALES (E15 Joules)

COMBUSTIBLE	ALUMINIO	SIDERURGIA	HULERA	CONSTRUCC.	AUTOMOTRIZ
COQUE	0.00	62.32	0.00	0.00	0.00
G.L.P.	0.02	1.32	0.03	0.00	1.13
KEROSINA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DIESEL	0.04	0.82	0.35	4.94	0.28
COMBUSTOLEO	0.01	27.80	0.59	0.00	0.06
GAS NATURAL	1.59	89.18	2.92	0.00	1.94
ELECTRICIDAD	4.31	29.47	0.97	1.06	2.66
BAGAZO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

COMBUSTIBLE	PETROQUI.	AZUCARERA	MINERIA	FERTILIZA.	CEMENTO
COQUE	0.00	0.00	2.19	0.00	0.00
G.L.P.	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
KEROSINA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DIESEL	0.00	8.90	4.44	0.14	1.00
COMBUSTOLEO	11.81	38.88	6.30	2.35	74.87
GAS NATURAL	176.91	0.00	17.13	10.61	5.89
ELECTRICIDAD	0.00	0.30	22.08	1.90	9.37
BAGAZO	0.00	79.58	0.00	0.00	0.00

COMBUSTIBLE	QUIMICA	PAPEL	VIDRIO	OTRAS
COQUE	0.00	0.00	1.07	0.00
G.L.P.	0.02	0.26	11.60	8.00
KEROSINA	0.00	0.00	0.00	2.57
DIESEL	15.59	0.54	0.62	3.57
COMBUSTOLEO	29.73	2.71	6.53	84.13
GAS NATURAL	56.22	15.85	17.13	102.03
ELECTRICIDAD	34.33	9.27	2.90	71.95
BAGAZO	0.00	0.00	0.00	0.00

CONSUMO DE COMBUSTIBLES (E15 Joules).

ACTIVIDAD	G. ELECTRICIDAD	RES., COM, PUB.
COMBUSTIBLE	CONSUMO	CONSUMO
LEÑA	-----	296.14
G.L.P.	-----	276.00
KEROSINAS	-----	13.43
DIESEL	15.61	1.49
CUMBUSTOLEO	659.25	8.95
GAS NATURAL	143.67	38.04
CARBON	76.03	-----

II).- FUENTES MOVILES.

En México las emisiones de GHG's por actividades energéticas relacionadas con las fuentes móviles y su combustión incluye únicamente el Sector Transporte.

Activity = Cantidad de Energía Consumida.

a = modo de transporte (aviación, Ferrocarril, etc.)

b = tipo de combustible (gasolina, diesel, etc.)

c = tipo de vehículo (pasajero, carga ligera, etc.)

CONSUMO DE COMBUSTIBLES EN EL SECTOR TRANSPORTE (7,8) (E15 Joules).

COMBUSTIBLE	CONSUMO
GASOLINAS (T.P.)	688.77
GAS LICUADO (T.P.)	7.27
GASOLINAS (T.U.)	27.95
GAS LICUADO (T.U.)	3.12
DIESEL (T.U.)	114.92
GASOLINAS (T.C.)	164.85
GAS LICUADO (T.C.)	5.71
DIESEL (med) (T.C.)	62.73
DIESEL (pes) (T.C.)	132.64
GASOLINAS (T.A.)	2.83
KEROSINAS (T.A.)	75.15
DIESEL (FERR)	26.83
ELECTRICIDAD (FERR)	2.68
DIESEL (MAR)	5.10
COMBUSTOLEO (MAR)	21.47

Del sector transporte se tienen 6 grandes grupos : Transporte Particular (T.P.), Transporte Urbano (T.U.), Transporte de Carga (T.C.), Transporte Aéreo (T.A.), Ferrocarriles (FERR) y Marítimo (MAR).

5. Resultados emisiones del sector energético

FUENTES	EMISIONES (Tg)					
	CO ₂	CO	N ₂ O	NO _x	CH ₄	NMVOCS
EMISIONES NACIONALES*	313.29	12.413	0.002	0.834	1.213	1.050
EMISIONES SECTOR ENERG.	313.29	12.413	0.002	0.834	0.245	1.050
COMBUSTION	313.29	NC	NC	NC	NC	NC
FUENTES ESTACIONARIAS	NC	5.503	0.001	0.261	0.022	0.000
FUENTES MOVILES	NC	6.910	0.001	0.573	0.223	1.050
FUGITIVAS	NC	NC	NC	NC	0.968	NC
PETROLEO Y GAS NATURAL	NC	NC	NC	NC	0.968	NC

Considerando un potencial global de calentamiento a 100 años como lo recomienda el IPCC, tenemos:

- 1 para CO₂.
- 22 para CH₄.
- 270 para N₂O.

FUENTES	EMISIONES (Tg)					
	CO ₂	%CONT	N ₂ O	%CONT	CH ₄	%CONT
EMISIONES NACIONALES	313.29	99.61	0.002	6x10 ⁻⁴	1.213	0.386
CO ₂ GWP (100 AÑOS/IPCC)	313.29	92.00	0.540	0.16	26.686	7.84

6. Discusión de resultados

En México 3 combustibles primarios proporcionan más del 95% de la energía que se consume en el país, ordenados en forma decreciente son:

- Petróleo Crudo.
- Gas Natural.
- Biomasa (Leña y Bagazo de caña).

Por lo tanto mientras más exacto sea el factor de emisión de Carbono para estos combustibles, mejores serán las estimaciones de los GHG's que emitió México en 1990.

Algunos datos como el de gasolinas y naftas no estan desagregados ni son claros puesto que se da un valor de actividades no energéticas mayor al de la producción e importación lo cual refleja una aportación negativa en las emisiones de Carbono en CO₂.

De acuerdo con la metodología(1), la energía producida por la combustión de leña y bagazo que sea sostenible (que sea regenerada por reforestación o nuevo cultivo) no debe de ser considerada en esta aproximación, el balance de CO₂ será completado en este caso con los datos de la sección de usos de suelo.

Los resultados de CO₂ por cuestiones de Energía, están en el mismo orden de magnitud de los que se obtienen en el Software que proporciona el IPCC y en principio es lógico porque ambos tienen la misma información y las diferencias vendrán de la precisión y de la diferencia en criterios de la aplicación en algunos puntos, aclarando que estas apreciaciones no impactan en el resultado final en más de un 2 ó 3%.

7. Conclusiones

El mayor número de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México se debe al consumo de Petróleo, Gas Natural y Biomasa, el resto no incide fuertemente en los resultados finales.

La falta de desagregación de los datos que presenta el Balance Nacional de Energía, como no es parte de los combustibles principales, no influye significativamente en las emisiones.

Un análisis completo de las emisiones de GHG's necesita incluir toda la información de los sectores energéticos y no energéticos, ya que unas emisiones complementan a otras y algunas restituyen el Carbono consumido como es el caso de la Biomasa.

La información que se ha obtenido en este trabajo es congruente con la que se obtiene con el software (6) que distribuyó el IPCC como parte de los Borradores generales para el cálculo de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero.

Agradecimientos

Agradezco los comentarios, sugerencias, correcciones y toda la ayuda que me dió el Dr. Marcos Ley Koo, para la realización del presente trabajo.

Agradezco el apoyo de EPA y PNUMA, sin el cual no hubiera podido desarrollar el presente trabajo.

También quiero agradecer los comentarios y sugerencias que en el desarrollo del Inventario Preliminar del GHG's México 1990, nos ha hecho ICF a través de su personal (David Antonioli y Craig Hebert).

Finalmente quiero agradecer a los organizadores del Estudio de País México, la invitación y oportunidad de presentar este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- GREENHOUSE GAS INVENTORY. IPCC GUIDLINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES. REPORTING INSTRUCTIONS VOLUME 1, WORKBOOK VOLUME 2, REFERENCE MANUAL VOLUME 3.
- 2.- BALANCE NACIONAL DE ENERGIA 1990. SEMIP, 1991. ISBN 968-874-072-1.
- 3.- INVENTARIO PRELIMINAR DE GASES EFECTO PARA MEXICO 1988. NOTA : INCLUYE SOFTWARE DESARROLLADO EN FORTRAN PARA LA ELABORACION DEL INVENTARIO. SEDUE/INE/CONAE MEXICO 1992.
- 4.- CONSTRUCCION Y TECNOLOGIA. REVISTA DEL INSTITUTO MEXICANO DEL CONCRETO Y CEMENTO. VOL. III No. 35 ABRIL 1991, ISSN 0187-7895.

- 5.- EXAMEN DE LA SITUACION ECONOMICA DE MEXICO. INFORME DEL BANCO NACIONAL DE MEXICO (BANAMEX), VOLUMEN LXIX, NUMEROS 806 Y 807, ENERO-FEBRERO 1993, ISSN0014-3960.
- 6.- IPCC GHG INVENTORY SOFTWARE (MINERGG). CORRESPONDS TO VOLUME 2 OF IPPC DRAFT GUIDELINES FOR NATIONAL GHG INVENTORIES.
- 7.- MANUAL ESTADISTICO DEL SECTOR TRANSPORTE 1992. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SANFANDILA QRO. 1994, ISSN 0188-7246.
- 8.- ANUARIOS ESTADISTICOS DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS EDICIONES 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA INEGI.

Inventario de emisiones de CO₂ debido al uso de energía especial: Energía eléctrica

CLAUDIA SHEINBAUM PARDO Y LUIS RODRÍGUEZ VIQUEIRA

Instituto de Ingeniería, UNAM, CU, 04510, México, D. F., México

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de las tendencias y perspectivas del uso de la energía eléctrica desde el punto de vista de la oferta y la demanda. Asimismo se muestra la variación en las emisiones de bióxido de carbono y óxidos de nitrógeno debidas al uso de la electricidad. Entre 1980 y 1990, la demanda de energía eléctrica creció a una tasa promedio anual de cerca del 7%, 3% mayor al de la energía final total. Los sectores de mayor peso fueron el industrial y el residencial que en 1993 representaron 50 y 24% del consumo nacional de electricidad respectivamente. En términos de la oferta, entre 1965 y 1993, la capacidad instalada de CFE aumentó a un ritmo de crecimiento del 7% anual.

Debido a las limitaciones financieras y ambientales a nivel nacional y mundial, el ritmo de crecimiento de la oferta de energía eléctrica debe disminuir, por lo que se hacen necesarias medidas de conservación para los diferentes sectores. En este trabajo se presentan algunas de estas medidas, las cuales van desde el mantenimiento de las instalaciones, el redimensionamiento de los motores en la industria, la sustitución de focos incandescentes por fluorescentes, hasta la sustitución tecnológica para el bombeo agrícola, o la introducción de motores de velocidad variable. Se estima que el potencial de ahorro de la energía eléctrica está entre el 20 y el 30% del consumo de energía eléctrico nacional.

ABSTRACT

In this paper we present an analysis of trends and prospects of the electricity use from both the demand and the supply perspective. Carbon dioxide as well as nitrogen oxides emissions related to electricity use are also presented. Between 1980 and 1990, electricity demand increased at an annual average rate of growth of 7%, 3% higher than national final energy demand. The main sectors that promoted the increase in electricity demand were industrial and residential. In 1993 the share of residential and industrial sector in total electricity demand was 24 and 50% respectively. Regarding the supply side, between 1965 and 1993 the power capacity increased based on fossil fuels at an annual rate of growth 7%.

Due to financial and environmental constraints, the growth in electricity demand has to diminish. Important electricity conservation measures have to be taken for this purpose. Electricity savings can be achieved from different measures such as maintenance in the industrial sector, re dimension of industrial motors, substitution of incandescent bulbs to Compact Fluorescent lamps, efficient agricultural pumps and motors of variable speed. It is estimated that the potential for electricity savings goes from 20 to 30% of the electricity demand.

1. Introducción

Este trabajo presenta las tendencias y perspectivas del consumo de electricidad, así como las emisiones de bióxido de carbono y óxidos de nitrógeno debidas al uso de la electricidad en México. El trabajo se divide en dos partes. La primera muestra el lado de la oferta y analiza la capacidad instalada, generación bruta, factor de uso y de planta de CFE, así como los diferentes combustibles y energías primarias que se utilizan para generar la electricidad. En la segunda parte se analiza la demanda de energía eléctrica y el potencial de ahorro para los sectores residencial, comercial, público, industrial, agrícola y de autoconsumo de la propia CFE.

2. Oferta

2.1. Capacidad instalada y generación bruta de CFE

La capacidad instalada de CFE creció a una tasa promedio anual de cerca del 7% entre 1965 y 1993. Las fuentes primarias de energía y el tipo de planta se ha diversificado en las últimas

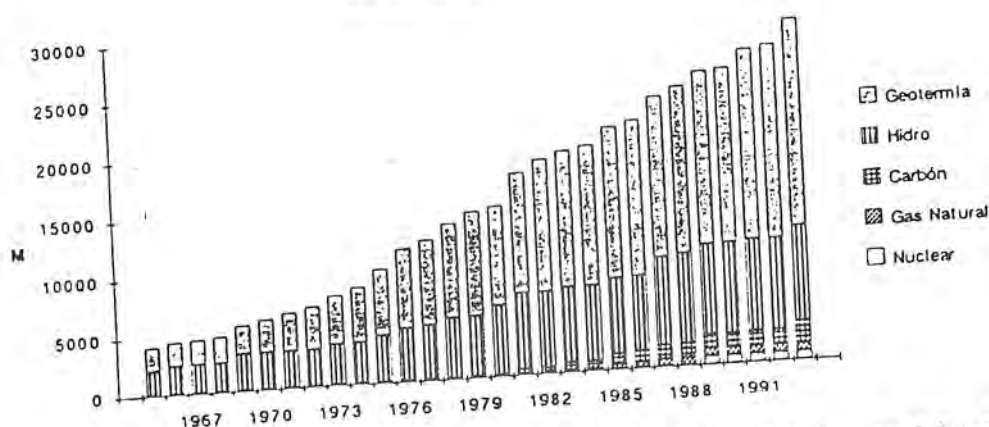
dos décadas, pero ha estado basada fundamentalmente en hidrocarburos y en menor medida en hidroelectricidad (Figura 1). En 1973 comienza una ligera diversificación de las fuentes primarias de energía al haber participación de las plantas geotérmicas, en 1985 las carboeléctricas y en 1989 la planta nuclear de Laguna Verde. A partir de esa época se da una disminución de la importancia de las plantas hidroeléctricas y un incremento de las tecnologías a base de combustibles fósiles básicamente combustóleo y gas.

Tabla 1. Evolución de la estructura de la capacidad instalada de plantas termoeléctricas

Año	Vapor	Turbogás	Ciclo combinado	Combustión interna
1940	35.7%			64.3%
1950	49.6%			50.4%
1960	80.4%			19.6%
1970	82.6%		7.7%	9.7%
1980	78.0%	6.4%	14.0%	1.6%
1993	77.0%	11.1%	10.9%	1.0%

Fuente: Alonso et al. (1994)

FIGURA 1
CAPACIDAD INSTALADA
POR TIPO DE PLANTA (MW)



La preferencia de plantas termoeléctricas sobre plantas hidroeléctricas se debe a que por un lado, las primeras pueden localizarse en puntos más cercanos a los centros de uso final, lo que disminuye las pérdidas por transmisión de la energía, los avances tecnológicos en estas tecnologías han permitido incrementar el tamaño y la eficiencia de conversión, y a que, por otro lado, los costos de inversión son menores (Tabla 2).

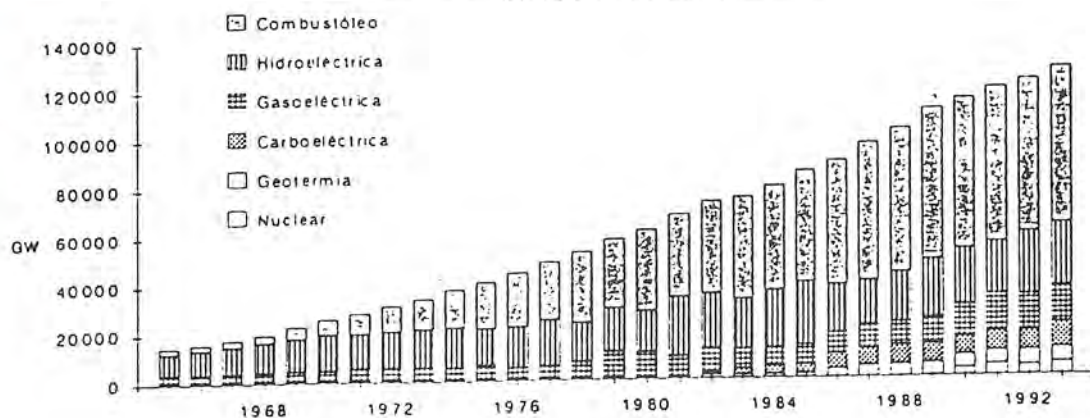
Tabla 2 Costo nivelado de inversión (\$ / kWh neto generado) [pesos de 1991]

Planta	Potencia (MW)	Tasa 12% (\$/kWh)	Tasa 14% (\$/kWh)
Térmica convencional	2x350	53.21	63.58
Turbogás gas	1x30	147.05	165.58
Turbogás diesel	1x30	151.36	170.44
C. Combinado gas	1x250	68.31	80.73
C. Combinado diesel	1x250	69.59	82.25
Diesel	2x32.5	122.15	139.90
Carboeléctrica C. dual con desulfurador	2x350	107.06	128.60
Nuclear media EUA	2x1000	306.33	392.43
Hidroeléctrica (Chicoasen)	5x300	154.66	190.01

Fuente: CFE-COPAR (1991)

La generación bruta de energía eléctrica (Figura 2), creció a una tasa promedio anual del 8% en el periodo 1965-1993, casi un punto por arriba de la capacidad instalada mientras que la eficiencia térmica de conversión promedio (no incluye plantas geotérmicas ni hidroeléctricas), pasó de 26% en 1965 a 33% en 1993.¹ Esto se debió fundamentalmente a la penetración de las plantas de turbo gas durante los años setenta, las cuales son de mayor eficiencia.

FIGURA 2
GENERACION BRUTA DE ENERGIA ELECTRICA
POR TIPO DE PLANTA



2.2 Factor de uso de CFE

El factor de uso definido como el cociente entre la generación bruta de energía eléctrica y la capacidad instalada por el número de horas en un año, es un índice sumamente útil que nos indica la forma e intensidad de uso de la capacidad instalada (Figura 3).

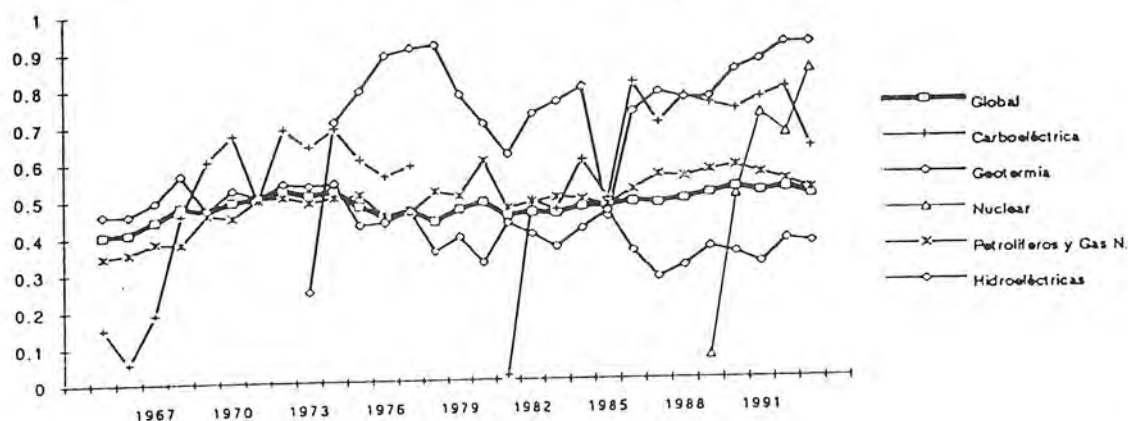
Según Alonso *et al.* (1994), la demanda promedio de CFE es del orden de dos terceras partes de la demanda máxima, lo que implica que se debe tener un 33% de la capacidad instalada para

¹ Cabe aclarar que la eficiencia de conversión de energía de las hidroeléctricas y las plantas geotérmicas que se obtiene de los balances nacionales de energía publicados por SEMIP es igual a la eficiencia térmica promedio

cubrir la demanda máxima o que el factor de uso máximo no puede ser mayor a 66%

De acuerdo con las estadísticas de CFE, el factor de uso global entre 1965 y 1993 osciló entre el 40 y 50%. Esto implica que entre los programas de mantenimiento, fallas en los equipos de distribución y generación se absorbieron entre el 16 y el 26% de la capacidad instalada (factor de uso máximo menos factor de uso global) y que por lo tanto existe una disponibilidad de la capacidad instalada de entre el 74 y el 84%.

FIGURA 3
FACTOR DE USO POR TIPO DE PLANTA
(Generación Bruta / Capacidad Instalada) x (Número de horas en un año)



En diciembre de 1993, el 39.45% de la capacidad hidroeléctrica instalada y el 8.3% de la termoeléctrica se utilizó para satisfacer la demanda máxima (plantas turbo gas, 2.6% gas-diesel y 5.7% diesel) (Sarabia *et al.*, 1994). Es de explicarse que la mayor parte de la demanda máxima o pico sea cubierta con hidroelectricidad ya que:

- El costo de el kWh generado es el más bajo (Tabla 3)
- Es la forma mas noble de almacenar energía para después transformarla en energía eléctrica.
- Elimina incertidumbres con respecto a las temporadas de lluvias.
- Es mas sencillo regular el sistema

Tabla 3 Costo de Generación de energía eléctrica por tipo de planta

TECNOLOGÍA	Costo de generación (\$ 1990/kWh)
HIDRO.	114.76
GAS	147.39
GEOTÉRMICA	134.98
COMBUSTÓLEO	147.39
CARBÓN	136.11
DIESEL	204.79
NUCLEAR	300.19
EÓLICA	225.00

Fuente: CFE-COPAR (1991)

2.3. Oferta y demanda de electricidad

En el periodo 1965-1993, las pérdidas por transmisión de electricidad oscilaron entre el 11 y el 15% (SEMIP, 1965-85,1993). Esto significa que por cada kWh entregado para la demanda final, fue necesario generar entre 1.1 y 1.2 kWh para compensar dichas pérdidas. Como ha sido mencionado también, cada kWh consumido debe tomar en cuenta que se requiere instalar más de un kW pues los equipos no pueden funcionar el 100% del tiempo al 100% de su capacidad.

En 1993, CFE requirió de una capacidad instalada de 29, 204 MW, para cubrir una demanda final de 103, 292 GWh a un factor de uso de cerca del 50%. Bajo estas condiciones y de acuerdo con Pedrero (1994), el costo total promedio de inversión, a los precios y estructura eléctrica de 1990, sería de 4.42 millones de pesos de 1990 por kW.

Bajo estas condiciones la CFE tiene como opciones para satisfacer una demanda creciente sin incrementar su capacidad instalada: a) incrementar la eficiencia de generación, b) disminuir las pérdidas por transmisión y distribución o bien influir en la demanda final de energía, ya sea disminuyendo la diferencia entre la demanda máxima y la demanda promedio o aumentando la eficiencia del uso final de la energía eléctrica.

2.4. Emisiones de CO₂ y NO_x debidas a la generación eléctrica

Si se asume una eficiencia de conversión constante para 1980 y 1990 e igual a 30% (típica de una termoeléctrica). Los coeficientes de emisión de electricidad están presentados en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Coeficientes de emisión de la electricidad

Coefficiente	1980	1990
NO _x (g/GJ)	696.8	660.1
CO ₂ (Kg/PJ)	56.4	57.2

Fuentes: SEMIP (1980, 1990), OECD (1991), cfe (1992)

Generación eléctrica: 1980: petróleo 77.5%,
gas 22.5% 1990; petróleo 72.9% gas 15.5%, carbón 8.2%.

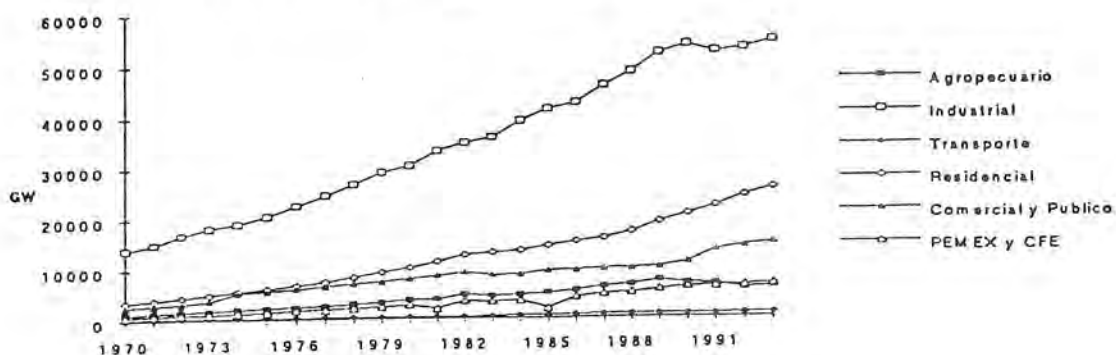
Los índices de emisión de los óxidos de carbono (CO₂) se incrementaron debido a la introducción del uso del carbón como sustituto del combustible en la generación de electricidad. En 1980, 77.5% de las fuentes primarias de generación de la electricidad provenían del petróleo y 22.5% del gas natural. Para 1990 este porcentaje se redujo a 73 y 15% respectivamente. Para ese mismo año, un 8% de la electricidad generada provenía del carbón. El efecto de la disminución en el uso de combustible provocó, por el contrario, una ligera disminución en los índices de emisión de los NO_x.

3. Demanda

3.1 Demanda sectorial de energía eléctrica

La energía eléctrica representa cerca del 10% del consumo final de energía del país, sin embargo, entre 1970 y 1993 la participación de la electricidad en el consumo final nacional aumentó considerablemente, manteniendo una tasa promedio de crecimiento anual de cerca del 7%, esto es 3% mayor al de la energía final total. Los sectores de mayor peso en el consumo de electricidad y los responsables del crecimiento acelerado del uso de la energía eléctrica son el industrial y el residencial que en 1993 representaron 50% y 24% del consumo total de electricidad respectivamente (Figura 4). A continuación se detalla el análisis del uso de la electricidad para cada uno de los sectores económicos: industrial, residencial, comercial y público, agropecuario y energético.

FIGURA 4
CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR SECTORES



3.1.1 Sector industrial

Durante las últimas dos décadas, el consumo de energía eléctrica del sector industrial mexicano creció a una tasa promedio anual del 7% llegando a constituir en 1993 el 16% del consumo total energético industrial. Las ramas de mayor demanda eléctrica son el aluminio (del 0.5 al 2%), la celulosa y papel (4%), el cemento (7%), la petroquímica (1.5%), la siderurgia (del 10 al 15%), el vidrio (1 al 2%), la química (7 al 8%) y la minería (alrededor del 10%).

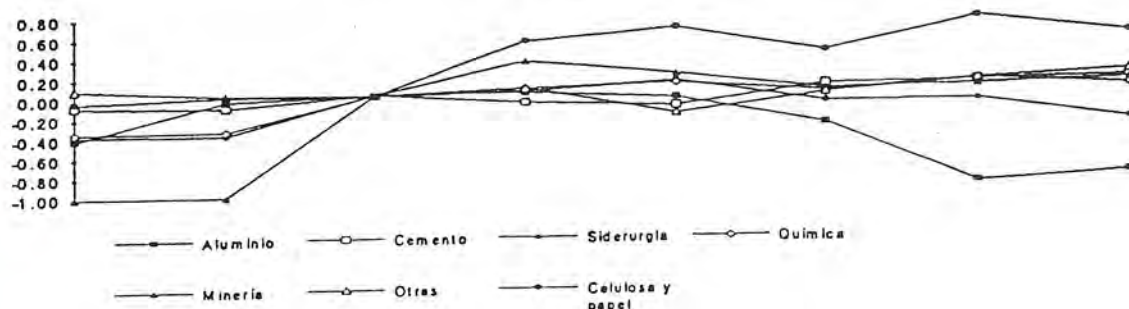
Los cambios en la demanda de electricidad en el sector industrial pueden ser divididos en dos factores fundamentales: los económicos y los tecnológicos. Los factores económicos obviamente dependen del comportamiento del mercado de las diversas ramas industriales. Por otro lado, la sustitución, mantenimiento o adecuación tecnológica afectan directamente el consumo de energía de una industria. A diferencia de los factores económicos que pueden hacer variar la producción de una industria de un año a otro, los cambios tecnológicos son de más largo plazo.

Una forma de medir el cambio en la demanda de energía del sector industrial es la intensidad energética. Esta puede ser evaluada en términos de las variables físicas o en términos económicos. Esto es, consumo de energía por tonelada producida o consumo de energía entre el valor agregado de determinada rama industrial durante determinado periodo. En el caso de Estados Unidos y los principales países industrializados europeos, por ejemplo, la demanda de energía en el sector industrial sufrió dos tipos de cambios que hicieron que la energía por unidad de valor agregado disminuyera en las últimas dos décadas. Uno de los factores fue la disminución de la participación en la economía de las industrias intensivas en energía como la siderurgia. El otro factor fue una sustitución tecnológica en industrias como la del cemento y la química (Howarth y Shipper, 1991).

En el caso de México, es difícil hacer un estudio histórico de varias décadas acerca de los cambios energéticos en el sector industrial, ya que los datos del uso de la energía industrial por ramas comienzan a estar desagregados a partir del año de 1986 (SEMIP, 1986). Por esta razón, elaboramos el análisis de las principales ramas consumidoras de energía a partir de esa fecha.

Entre 1986 y 1993 (Figura 5) las principales ramas industriales que tuvieron un crecimiento en la demanda eléctrica fueron celulosa y papel, química, cemento, (que sufre una ligera caída en 1991, pero se recupera hacia 1993) siderurgia y minería. Sin embargo, las ramas industriales de mayor crecimiento en la demanda eléctrica fueron las llamadas "otras industrias manufactureras", que son mucho menos intensivas en términos energéticos pero que han tenido un repunte en el mercado nacional e internacional. Entre estas se encuentran las maquilas, la industria automotriz, aguas envasadas y cervezas, equipo eléctrico, etc.

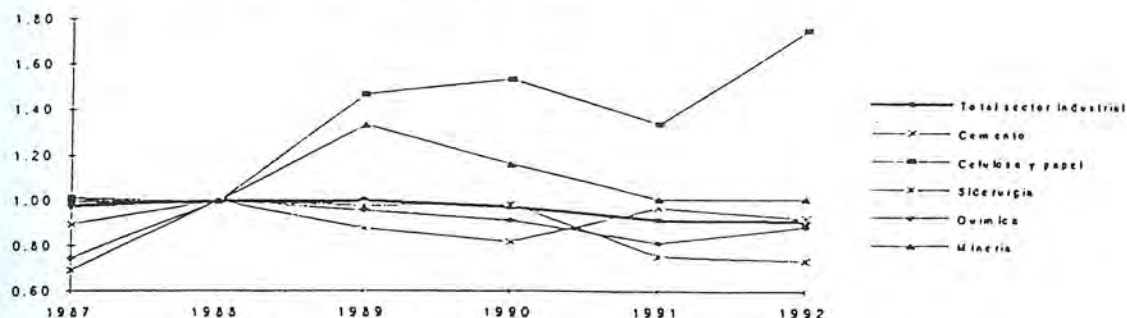
FIGURA 5
CRECIMIENTO DEL CONSUMO DE ELECTRICIDAD
Algunas ramas del sector industrial (1988=0)
1986 a 1987



En el caso del aluminio, la caída abrupta en el consumo de energía eléctrica se debió a una caída en la producción. El incremento de los precios de la electricidad, así como la caída internacional del precio del aluminio fueron catastróficos para esta rama industrial. Sin embargo, a partir de 1993, se nota un ligero repunte del consumo eléctrico de esta industria, que corresponde a un repunte en su actividad económica.²

Analizando la intensidad eléctrica de la industria manufacturera para los últimos años (consumo de electricidad entre la producción total de cada rama), se puede observar una importante disminución de todo el sector industrial, así como para algunas de las principales ramas industriales. (Figura 6). Entre 1987 y 1993, el consumo de energía por unidad de producción disminuyó para el caso de las industrias del cemento, siderurgia, química, minería y aumentó para la celulosa y el papel. Esto sugiere un aumento importante de la eficiencia del uso de la electricidad para estas ramas.

FIGURA 6
INTENSIDADES ELECTRICAS DEL SECTOR INDUSTRIAL
(ENERGIA POR TONELADA PRODUCIDA)
(1988=1)



A reserva de un análisis más detallado sobre el consumo de electricidad en el sector industrial, el análisis elaborado aquí, sugiere que la intensidad eléctrica para el sector industrial tuvo una importante disminución debido a que:

- Diversas ramas industriales intensivas en electricidad, con excepción de la celulosa y el

² Fuente: Comunicación directa con el área de tarifas de CFE.

papel, redujeron el consumo de energía eléctrica por unidad de producción.

- Algunas ramas industriales intensivas en electricidad como el caso del aluminio tuvieron una caída en la producción y
- Un crecimiento en las ramas productiva de menor intensidad eléctrica.

La importante disminución en la intensidad eléctrica, así como la caída en la producción de la industria del aluminio se debió de manera importante al aumento significativo del precio de la electricidad para el sector industrial (Sección 3). En el primer caso, la disminución en la intensidad provino probablemente de aumento en la eficiencia energética de la producción mediante medidas de mantenimiento y cambio tecnológico. En el segundo caso, como se menciona anteriormente, se debió a una caída en la producción.

De acuerdo con las estimaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1994), basadas en el crecimiento supuesto del PIB por ramas industriales y en el precio de la electricidad, las ventas de energía eléctrica para la minería y la manufactura, aumentarán en el año 2003, casi al doble que en 1993. Esto significa un crecimiento anual promedio de entre el 5.5 y el 6.6% para ese periodo y que la capacidad instalada para suministrar la electricidad requerida para la industria debería crecer de 32.3 TW en 1993 a 60.8 TW en el 2003.

Un análisis sobre el uso de la energía en el sector industrial en los Estados Unidos (EPRI, 1992) reporta que la energía eléctrica utilizada por la industria esta dividida de la siguiente manera. Los motores consumen cerca del 70% de la electricidad del sector industrial, procesos de calor cerca del 8%, 13% los procesos electrolíticos y 9% la iluminación. Un estudio similar para la India, reporta un porcentaje semejante para la participación de los motores eléctricos en el consumo de electricidad del sector industrial (Anand y Kothary, 1990). Debido a que la participación de las ramas industriales en la India es semejante a la mexicana, con excepción de la petroquímica, es factible suponer que en el caso de México, la demanda eléctrica debida al uso de la electricidad por motores industriales es mayor al 50% del consumo eléctrico del sector.

Baldwin (1986), quien recientemente evaluó las oportunidades de ahorro de energía para el caso de los motores eléctricos en los Estados Unidos, estima que una reducción de cerca del 44% del consumo de electricidad utilizada por los motores puede ser obtenida a un costo de energía ahorrada de \$0.49 dls/ kWh, cerca de 10 a 30% el costo promedio del kWh generado. Las oportunidades para el ahorro de electricidad en los motores pueden dividirse en :

Motores eficientes: Inducción convencional de alta eficiencia, conmutación electrónica e imán de sincronía AC permanente, corazón magnético amorfo, homopolar de alta rapidez, etc.

- Selección y mantenimiento: corrección de sobreequipamiento y sobredimensionamiento, mejoras en el enfriamiento y la limpieza, etc.
- Control de motores: Ajuste electrónico de tracción o transmisión de los motores (convertidores de frecuencia), recuperación de deslices y alternativas hidráulicas, velocidades variables, controladores de factor de potencia, manejo del ciclo de carga, etc.
- Mejoras en lubricación y mantenimiento
- Afinaciones eléctricas: balance de fase, mejoras en la forma de la onda y estabilidad en el voltaje, corrección de factor de potencia, reducción de las pérdidas de distribución en la planta.

Por supuesto que el potencial de ahorro depende de la eficiencia de los motores existentes al igual que de la oportunidad de acceso a motores más eficientes. Es significativo el caso de la India, donde un estudio demuestra que existe un potencial de ahorro que es económicamente rentable de cerca de 31.4 TWh (19%) siempre y cuando a partir de 1990 se promueva la instalación de equipo eficiente en las nuevas plantas. Esta estimación no toma en cuenta el potencial de ahorro debido a la introducción de motores de velocidad variable en las plantas que están actualmente en funcionamiento.

En el caso de México, se requeriría hacer un estudio detallado de las condiciones tecnológicas de la industria en sus diversas ramas. Es significativo que en la India se estima un ahorro de

energía en los motores eléctricos similar a la proyección de la demanda de CFE para el sector industrial, calculando un costo de energía ahorrada menor al del costo promedio de generación eléctrica. Por supuesto que no puede trasladarse el resultado de un análisis de un país a otro, sin embargo, la comparación entre dos países del tercer Mundo, expone la viabilidad de invertir en ahorro de energía a un costo menor que la construcción de nuevas plantas generadores de electricidad.

Una forma adicional de ahorro de electricidad para el sector industrial, que puede ser aplicada también al sector comercio y de servicios es el de la cogeneración. Esta forma de generación de energía es la producción conjunta de energía térmica y eléctrica a partir de la misma fuente. Su importancia radica en la eficiencia de producción de ambas formas de energía y en el traslado de la generación centralizada a la descentralización de la energía eléctrica por las propias industrias. La cogeneración puede aplicarse en la mayoría de los procesos industriales, comerciales y de servicios que requieran para su funcionamiento tanto vapor o gases calientes, como electricidad.

Con la nueva reglamentación del servicio público federal de energía eléctrica (1992), los excedentes de la cogeneración podrán ser vendidos a CFE e integrados a la red interconectada a nivel nacional. Como se menciona en la introducción de este artículo, este cambio en la reglamentación del servicio eléctrico, permite la generación eficiente de energía sin representar un riesgo para CFE. De acuerdo con una encuesta reportada por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía -CONAE (1994), se encontró que en 37 empresas (6 metalúrgicas, 6 azucareras, 8 papeleras, 10 químicas, 3 cervecerías, 2 textiles y una cementera) existe un potencial eléctrico de excedentes de autoabastecedores de cerca de 410 MW. Al promover la autogeneración de energía eléctrica mediante la cogeneración, CFE establece un potencial de ahorro que proviene de no contabilizar el crecimiento en la demanda de las industrias que adquirirán su equipo de cogeneración y del excedente que será integrado a la red nacional. Por otro lado, los recursos primarios de generación son utilizados en forma más eficiente al sustituirse el suministro directo de electricidad por la cogeneración.

3.1.2. Sector residencial

El sector residencial es un componente esencial de la demanda eléctrica debido a su crecimiento y a su importancia en la demanda pico (mayor demanda entre las 17 y las 22 hrs.). Entre 1970 y 1990, el consumo eléctrico del sector residencial tuvo un crecimiento promedio de 9% anual, 2 puntos porcentuales por encima del crecimiento de la demanda eléctrica a nivel nacional. De la misma manera el número de usuarios eléctricos en este sector aumentó de 5844 millones en 1974 a 16192 millones en 1993.

Dos factores primordiales promovieron el crecimiento en la demanda del sector residencial: el incremento en la electrificación y el aumento en el equipamiento de los hogares. Entre 1970 y 1990, el porcentaje de hogares con acceso a la red eléctrica se incrementó de 59 a 89% (INEGI, 1970; 1990). Asimismo, se estima que entre 1980 y 1990 el aumento en la saturación de refrigeradores fue de 42 a 62% y el de televisores de 54 a 78% (Sheinbaum, 1994).

Los principales usos eléctricos del sector residencial son la iluminación, que representa entre el 30 y 40% de la demanda residencial, la refrigeración, el uso para televisores y en los estados del norte de la República, el aire acondicionado (Sheinbaum, 1994; Masera, *et al.*, 1991). Por otro lado el análisis de los ábacos de consumo del sector residencial (número de usuario por bloque de consumo) muestra el desplazamiento de un alto porcentaje de usuarios de los bloques de menor consumo hacia los bloques de consumo medio. Mientras que en 1983 el 35% de los usuarios consumían menos de 50 kWh al mes y 31% entre 50 y 150 kWh al mes; en 1991 tan sólo el 20% de los usuarios consumía menos de 50 kWh al mes y en cambio 56% de los usuarios utilizaban entre 50 y 150 kWh al mes. Aún así, para 1991, tan sólo el 10% de los usuarios eléctricos consumían el 35% del consumo total.

De acuerdo con los escenarios económico estimados por la propia CFE, las ventas totales de electricidad destinadas al sector residencial crecerán a un ritmo de cerca de 0.6% anual si hay

un crecimiento bajo y a 2.4% para crecimiento económico alto. Esto significará una demanda de entre 10 a 20 TWh adicionales a los actuales. Existe, sin embargo, un potencial de ahorro importante para el sector residencial que no requiere de grandes inversiones y que el propio usuario puede hacer de manera diferida (Reddy, 1991; Dutt, 1993).

En la iluminación por electricidad, un ahorro de energía de entre 50 y 75% proviene de la sustitución de focos incandescentes por compactos fluorescentes. Existen diversos trabajos que reportan la viabilidad económica de esta sustitución para la mayoría de los estratos de consumo de electricidad residencial. El más reciente se basa en un estudio realizado en las ciudades de Guadalajara y Monterrey (Sathaye, *et al.*, 1994). Se estima que el ahorro proveniente de la sustitución de 1.5 millones de focos incandescentes por compactos fluorescentes puede llegar a ser de hasta 135 GWh anuales y un diferimiento de la demanda pico de cerca de 78 MW.

En el caso de los refrigeradores, en 1994 se realizó un esfuerzo importante por parte de CFE y los productores de electrodomésticos para fijar normas máximas de consumo eléctrico para refrigeradores y aire acondicionado. Las normas, que entraron en vigor en enero de 1995, proponen un ahorro del 25% entre los nuevos refrigeradores y el refrigerador promedio de descongelado manual del 25% y 14% para los automáticos.

La CONAE estima que si se venden un millón de refrigeradores anuales (como en 1994), esto promoverá un ahorro de 40 MW en un año y de 1.4 TWh para el año 2000 (CONAE 1994).

Respecto al aire acondicionado, un ahorro significativo puede lograrse con la adquisición de aparatos eficientes. El modelo actual, aire acondicionado por cuarto, tiene un consumo promedio de 1400 kWh al año. En el caso de aires acondicionados, también fue aprobada una norma de máximo consumo que entró en vigor en enero de 1995. Para este caso, un ahorro del 20% respecto al aire acondicionado promedio y a una venta anual de 160 mil aires acondicionados tipo cuarto, la norma promoverá un ahorro de 5.6 TWh para el año 2000.

En el caso de la televisión se pueden lograr ahorros de hasta el 50% dependiendo del modelo y el tamaño del mismo. En promedio un televisor en México tiene una potencia de entre 80 y 100 Watts (Fernández, 1991; Friedmann, 1993). En los Estados Unidos, ésta es de 50 Watts.

3.1.3. Sector comercial

De acuerdo con la CFE, el sector comercial está clasificado como usuario de las tarifas para servicio general de baja tensión (tarifas 2 y 3) e incluyen establecimientos comerciales, de servicios y micro industrias. Para 1993, el sector comercial contaba con 2 millones de usuarios con un consumo promedio anual de 4, 883 kWh por usuario. De acuerdo con el análisis de estas tarifas, entre 1970 y 1983, la tasa de crecimiento promedio anual para el sector comercial fue de 5.0% y de 1983 a 1993 de 4%.

Existen pocos estudios sobre el uso de la electricidad en este sector. Sin embargo, se estima que la mayor parte del consumo se va en iluminación y otra parte importante es consumida por el aire acondicionado y en menor medida calefacción.

De acuerdo con CFE, el pronóstico de crecimiento del sector comercial entre 1993 y el año 2003 es de entre 4.3 y 5.2% anual, lo cual, en el escenario de mayor crecimiento económico significarían 15.7 TWh de consumo para el año 2003.

El aumento en la eficiencia de la iluminación en el sector comercial proviene del mejoramiento de las tres partes componentes del sistema de iluminación: el balastro, los tubos fluorescentes y luminaria. La sustitución de balastros electromagnéticos por electrónicos los tubos más eficientes y luminarias de espejo pueden aumentar la eficiencia del sistema en un 30%, 10% y 40% respectivamente. La sustitución de todo el sistema podría aumentar la eficiencia en un cerca del 70% (Crestani, 1989).

En un estudio realizado en 1990 (Sheinbaum, 1992), se demuestra que el máximo potencial de ahorro en iluminación sería de entre 1 y 2.8 TWh, y estaría dado por el cambio de tubos

fluorescentes de baja a alta eficiencia, con balastro electrónico y luminarias de espejo.

3.1.4 Sector servicios

El consumo de energía del sector servicios está catalogado por la CFE como alumbrado público, bombeo de aguas negras y potables (con excepción de los grandes usuarios de bombeo) y servicio temporal que incluyen las tarifas 5, 6, y 7 respectivamente. Entre 1970 y 1983, la tasa media anual de crecimiento del sector servicios fue de cerca del 8% anual, mientras que de 1983 a 1993 se redujo a 3% anual. De acuerdo con la propia CFE, esta importante reducción se debió a la sustitución de lámparas de mercurio e incandescentes por lámparas de sodio a alta presión que son significativamente más eficientes y a que muchos servicios de bombeo se ampliaron y pasaron a la contabilizarse dentro la tarifa de uso general.

CFE estima que el crecimiento de 1993 a 2003 será de 2.4% anual para un escenario económico alto y de 1.2% para un escenario económico bajo. En el primer caso, esto significaría un consumo de 6.7 TWh para este sector.

En este caso, las mayores opciones de conservación provienen de la sustitución de las lámparas de alumbrado público en las zonas urbanas. Sustitución que ya se está llevando a cabo. En la Ciudad de México, por ejemplo casi el 100% del alumbrado público es con sodio de alta presión.

3.2.5 Agropecuario

El uso de la electricidad para el sector agrícola proviene principalmente del bombeo de agua. Entre 1970 y 1993, el uso de la electricidad para este sector aumentó a una tasa del 6.8% anual. Sin embargo su participación en la demanda nacional disminuyó del 7 al 5% para los mismos años. Entre 1989 y 1993 se registra una disminución en la demanda de cerca de 1.5 TWh. De acuerdo con la propia CFE, se estima que alrededor de un tercio de esta reducción se debe a los factores climáticos, mientras que el resto en una respuesta al incremento del 31% de los precios medios reales de la electricidad (CFE 1994).

Los escenarios de CFE estiman que para una situación de crecimiento económico alto, el sector agrícola llegará a consumir un total de 7.6 TWh para el año del 2003.

La conservación de electricidad en este sector podría lograrse al aumentar la eficiencia del bombeo agrícola. En un estudio realizado en la India en el área de Gujarat, se encontró que con sólo cambiar las líneas de succión y válvulas de alta fricción por aquellas de baja fricción, se podía encontrar un ahorro de energía de cerca del 22%. Llevando a cabo esta sustitución tecnológica, que resultaba ser costeable para el agricultor, se podían llegar a ahorrar cerca de 15 TWh de los 43 TWh programados.

3.1.6 Autoconsumo del sector energético

Este se refiere al consumo de electricidad de la propia CFE y de PEMEX. Su participación en la demanda nacional es menor que la de los demás sectores aunque comparable a la del agropecuario. Su importancia radica en que ha tenido una tasa de crecimiento anual de 1970 a 1993 de cerca del 9%, equiparable a la del sector residencial.

Una importante parte del consumo de electricidad de este sector es la iluminación de las instalaciones en donde podría encontrarse un importante potencial de ahorro. CFE no reporta un escenario de crecimiento para este sector, ya que lo coloca dentro de lo que llama gran industria. Debido a la carencia de mayor información sobre este sector no es posible evaluar un potencial de ahorro.

4. Conclusiones

Entre 1970 y 1993 la capacidad instalada de CFE creció a un ritmo promedio anual del 7%. Suponiendo una eficiencia promedio de planta del 30%, los coeficientes de CO₂ y NO_x asociados a la producción de energía eléctrica se mantuvieron prácticamente constantes. Lo que significa que las emisiones de los principales gases invernadero debidos al uso de la electricidad se incrementaron en la misma proporción que la oferta de energía eléctrica.

La opción ideal para los escenarios futuros es que las emisiones permanezcan a su nivel de 1993 para ello la capacidad instalada de CFE debe mantenerse constante, conservando la estructura de generación actual o crecer utilizando fuentes renovable de energía.

Bajo estas condiciones, CFE tiene como opciones para satisfacer una demanda creciente sin incrementar su capacidad instalada: a) incrementar la eficiencia de generación, b) disminuir las pérdidas por transmisión y distribución o bien c) influir en la demanda final de energía, ya sea disminuyendo la diferencia entre la demanda máxima y la demanda promedio o aumentando la eficiencia del uso final de la energía eléctrica.

De acuerdo con lo expuesto a lo largo del trabajo en sólo cuatro de los sectores puede encontrarse, en teoría, un ahorro potencial de cerca 25% (Tabla 6).

Tabla 6 Estimación de potencial de ahorro de electricidad

Industrial (1)	~10%
Residencial (2)	~10%
Comercio(3)	~3%
Agrícola (4)	~2.5%

1 Mantenimiento y aumento en la eficiencia de motores. Cogeneración.

2 Iluminación, refrigeración, aire acondicionado

3. Iluminación

4. Aumento en eficiencia de las bombas de riego

En teoría, diferir cerca del 25% de las ventas programadas para el año 2003 equivaldría a cerca de 40 TWh, 60% del crecimiento programado, o con un cálculo grueso, el diferir la construcción de 25 plantas de 300 MW funcionando a un factor de planta del 60%. Si tomamos en cuenta que una planta de 300 MW tiene un costo aproximado de 360 millones de dólares.

REFERENCIAS

- Anand, S. and V. S. Kothar, 1990. Characterization of electric motors in industry and energy conservation potential in Indizill. Tata Energy Research Institute. New Delhi.
- Alonso, A., R. Cruz and E. Fugarolas, 1994. Futuros del sector eléctrico. En Reséndiz Nuñez D. (coordinador). El sector eléctrico en México. Comisión Federal de Electricidad- Fondo de Cultura Económica. México D. F.
- Baldwin, S., 1986. New opportunities in electric motor technology. *IEEE Technology and Society Magazine*. March.
- Comisión Federal de Electricidad, 1994. Desarrollo del mercado eléctrico 1989-2003. México D. F.
- Comisión Federal de Electricidad, 1992. Estadísticas del sector eléctrico. México D. F.
- Comisión Federal de Electricidad, 1991. Costos y Prámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Servicio Eléctrico (COPAR). México D. F.
- Comisión Nacional de Ahorro de Energía- CONAE, 1994. Informe de Actividades 1994. México D. F.

- Crestani, S., 1989. Iluminacao 2, Perspectivas tecnológicas do reator fluorescente do Brasil. *Electricidad Moderna*. Septiembre.
- Dutt, G., 1993. Energy End Use: An Environmentally Sound Development Pathway. Asian Development Bank. Manila, Philippines.
- Electric Power Research Institute-EPRI. Electric Motors, 1992. EPRI- Palo Alto California, USA.
- Fernández, L., 1991. Usos Finales de la Energía en la Ciudad de México. En Quintanilla J. (ed.) Primera reunión internacional sobre energía y medio ambiente en el sector residencial mexicano. Universidad Nacional Autónoma de México-University of California. México D. F.
- Friedmann, R., 1993. Mexico's residential sector: Main electric end uses and savings potential. In R. Ling and H. Wilhite (eds.). Proceedings of the 1993 ECEEE Summer Study: The Energy Efficient Challenge for Europe. The European Council for an Energy Efficient Economy, Oslo, Norway.
- Howarth, R., y L. Schipper, 1991. Manufacturing Energy Use in Eight OECD Countries: Trends through 1988. *Energy Journal*, Vol. 12 (4): 15-20.
- Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), 1970, 1980 y 1990. Censo Nacional de Población y Vivienda., México D. F.
- Masera O., O. De Buen y R. Friedmann., 1991. Consumo Residencial de Energía en México: Estructura, Impactos Ambientales, Potencial de Ahorro. En Quintanilla (eds). Primera Reunión Internacional sobre Energía y Medio Ambiente en el Sector Residencial Mexicano. México D. F.
- OECD, 1991. Estimation of green house gas emissions and sinks. Final Report from the OECD experts meeting, August.
- Pedrero, R., 1994. Visión económica del sector eléctrico. En Reséndiz Nuñez D. (coordinador). El sector eléctrico en México. Comisión Federal de Electricidad- Fondo de Cultura Económica. México D. F.
- Reddy, A. K., 1991. Barriers to improvements in energy efficiency. Lawrence Berkeley Laboratory Report. LBL-31439. Berkeley CA.
- Sarabia, A. and G. Rodríguez, 1994. Apéndice estadístico. En Reséndiz Nuñez D. (coordinador). El sector eléctrico en México. Comisión Federal de Electricidad- Fondo de Cultura Económica. México D. F.
- Sathaye, J., R. Friedmann, S. Meyers, O. De Buen, A. Gadgil y E. Vargas, 1994. Economic analysis of ILUMEX: A project to promote energy efficiency residential lighting in Mexico. Lawrence Berkeley Laboratory Report. LBL-34877. Berkeley, CA.
- Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal (SEMIP), 1966-85, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991. Balance Nacional de Energía. México D. F.
- Sheinbaum, C., 1994. Tendencias y perspectivas de la energía residencial en México: Estudio comparativo con las experiencias de conservación de los países de la OCDE. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Sheinbaum, C., 1992. Ahorro de electricidad para iluminación comercial. En XIV Memorias de ATPAE. México D. F. Noviembre 1992.

Emisiones de Metano de la Industria Petrolera

D. H. CUATECONTZI, J. GASCA, F. GUZMAN

Gerencia de Ciencias del Ambiente, Instituto Mexicano del Petróleo

RESUMEN

Se presentan las estimaciones de las cantidades de metano emitidas a la atmósfera por las operaciones de producción de petróleo crudo, producción de gas no asociado, así como las debidas al procesamiento, distribución y uso de gas natural en México. Estas estimaciones fueron determinadas utilizando de manera combinada los procedimientos básico (Tier-1) y medio (Tier-2) de la metodología del IPCC para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. Se presenta la justificación para que México sea reclasificado en la división "Resto del Mundo" para fines de aplicación de la mencionada metodología. Se discuten las particularidades de la metodología IPCC y se proponen los trabajos que deben realizarse para mejorar las estimaciones de las emisiones de metano provenientes del sector petrolero.

Las emisiones totales de metano del sector petrolero en México, en 1990, fueron calculadas en 970 Gg. Se muestran las contribuciones relativas de las emisiones de metano debidas a las diferentes operaciones involucradas en la producción y aprovechamiento del gas natural. Se estima la fracción que representa la pérdida de metano en la producción nacional de gas natural.

ABSTRACT

The methane emissions to the atmosphere derived from the production of crude oil, non-associated gas production, as well as the processing, distribution and use of natural gas in Mexico are estimated. The amounts estimated were obtained by combining the basic (Tier-1) and the medium (Tier-2) procedures in the IPCC methodology to determine the greenhouse gases emission inventory. Arguments are given to propose that Mexico should be reclassified in the "Rest of the World" category when applying the IPCC methodology. Some particular aspects of the IPCC methodology are discussed and future work is proposed to improve the methane emission estimates from the oil sector.

The total methane emissions from the oil sector in Mexico, in 1990, were estimated as 970 Gg. The relative contributions to the methane emissions from each of the operations involved in the production and process of natural gas are shown. A fraction is estimated for the methane losses in the Mexican oil and gas industry.

1. Introducción

El metano es indudablemente uno de los principales gases a considerar en el cambio climático global ya que contribuye al llamado efecto invernadero. Las emisiones de metano a la atmósfera debidas a fugas en el sector energético se originan en tres fuentes principales, a saber:

- Manejo del gas natural asociado. Durante la producción de petróleo, se produce una cierta cantidad de gas asociado que no puede comercializarse con ganancia económica. Tradicionalmente este excedente de gas se ventea o se quema. Otra manera de disponer de este gas es reinyectarlo, cuando las condiciones del yacimiento lo permiten.
- Sistemas de seguridad y relevo. Los sistemas que manejan hidrocarburos se diseñan normalmente con dispositivos de seguridad para controlar aumentos bruscos de presión o para manejar el gas disponible en el sistema durante una emergencia. Con este fin se instala una línea de venteo o un quemador. La presencia de estos dispositivos provoca una fuga constante de metano, ya que para prevenir la formación de una atmósfera explosiva se purgan constantemente con gas natural.
- Fugas en la totalidad del sistema de gas natural.

El metano es el compuesto más importante del gas natural y en consecuencia cualquier emisión durante las operaciones relacionadas contribuirán con metano a la atmósfera. Se considera que las emisiones mundiales fugitivas de metano, provenientes de las actividades relacionadas con el petróleo y el gas, son probablemente entre 30 y 70 Tg por año (EPA, 1994). Esto incluye todas

las emisiones por producción, procesamiento, transporte y uso de petróleo y gas natural aparte de aquellas derivadas de la combustión no productiva.

El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) ha estado colaborando con el Instituto Nacional de Ecología (INE) en el Estudio de País: México, estudio en coordinación con la Universidad Nacional Autónoma de México y la participación de varias instituciones científicas y académicas nacionales. En particular, el IMP ha contribuido en las determinaciones de las emisiones de gases invernadero directamente relacionadas con la industria del petróleo. Para ello ha contado con, y agradece, el apoyo del INE, la Agencia de Protección del Ambiente de los EUA (EPA) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

2. Metodología

Las emisiones de metano fueron determinadas con base en las recomendaciones de la Guía para los Inventarios Nacionales de Gases Invernadero del IPCC. Este contiene métodos sencillos e hipótesis que cubren la mayor parte de las fuentes y sumideros de gases invernadero, además de discutir algunos otros métodos para que los diversos países cuenten con otras opciones, de diferente nivel de detalle y complejidad, según sus necesidades y capacidades. Adicionalmente, este documento indica el formato del informe para lograr una presentación de los resultados de manera uniforme, consistente y comparable para todos los inventarios nacionales.

Para el caso de las emisiones fugitivas derivadas de las actividades relacionadas con el petróleo y el gas natural, la metodología toma en cuenta lo siguiente:

- Emisiones durante operaciones normales, tales como las asociadas a venteo y quemadores durante la explotación del petróleo y gas, fugas crónicas o descargas por venteo en procesos.
- Emisiones durante reparaciones y mantenimiento.
- Emisiones durante accidentes o fallas del sistema.

Las cifras presentadas en este trabajo fueron obtenidas utilizando los dos primeros niveles de la metodología: El procedimiento básico (Tier-1), o sea un enfoque basado en factores de emisión promedio para la producción; y el procedimiento medio (Tier-2), basado en un enfoque de balance de masa.

El procedimiento básico requiere conjuntar información sobre las actividades en México, la que se puede obtener en el Balance Nacional de Energía de 1990 (SEMIP 1991), seleccionar los factores de emisión de las tablas del IPCC, basados en información de diferentes regiones del mundo consideradas típicas, y multiplicar para calcular las emisiones para diferentes grandes subcategorías. Los factores de emisión que se aplicaron en este trabajo fueron los factores altos, contenidos en la Tabla 1-8, del cuaderno de trabajo del IPCC (Vol.2, 1993) para la Región Resto del Mundo, de acuerdo con las recomendaciones hechas por el grupo de consultores del ICF. Dichos factores de emisión fueron utilizados para las áreas correspondientes a pérdidas durante la producción de gas no asociado.

El procedimiento medio (Tier-2) se recomienda sólo para las emisiones de metano derivadas de la producción de petróleo y no se debe utilizar para las actividades de producción de gas no asociado, ya que éstas no están contempladas en este nivel. Para este segundo nivel se requieren datos e información típicos, usualmente disponibles, sobre petróleo y gas asociado. A partir de ellos se estiman las máximas emisiones potenciales a la atmósfera de metano provenientes de los diferentes sectores de la industria del petróleo y el gas. Con el objeto de reflejar más fielmente las emisiones reales, estos cálculos se escalan mediante factores de emisión apropiados. El balance de masa toma en cuenta aquellas cantidades de gas que no se aprovechan o se reinyectan y las que se emiten cuando se quema el gas. Los factores de emisión por fugas sirven para estimar las pérdidas tanto en los sistemas de control como en los de utilización del gas. Las emisiones calculadas a partir del procedimiento medio (Tier-2) corresponden a la producción de petróleo, al transporte y refinación de crudo y al procesamiento y distribución de gas natural.

3. Resultados

Los resultados han sido clasificados de acuerdo a las subcategorías que se sugieren en los documentos del IPCC para los sistemas de petróleo y gas.

3.1.-Producción

Cerca del 84% del total de gas producido en 1990 en México, 30 270 millones de metros cúbicos estándar, está asociado a la producción de petróleo. Del orden de 6.6% del gas producido fue reinyectado a los yacimientos, mientras que 2.7% fue quemado y el 90% fue procesado en plantas de gas. La Figura 1 ilustra los usos principales del gas natural producido en México.

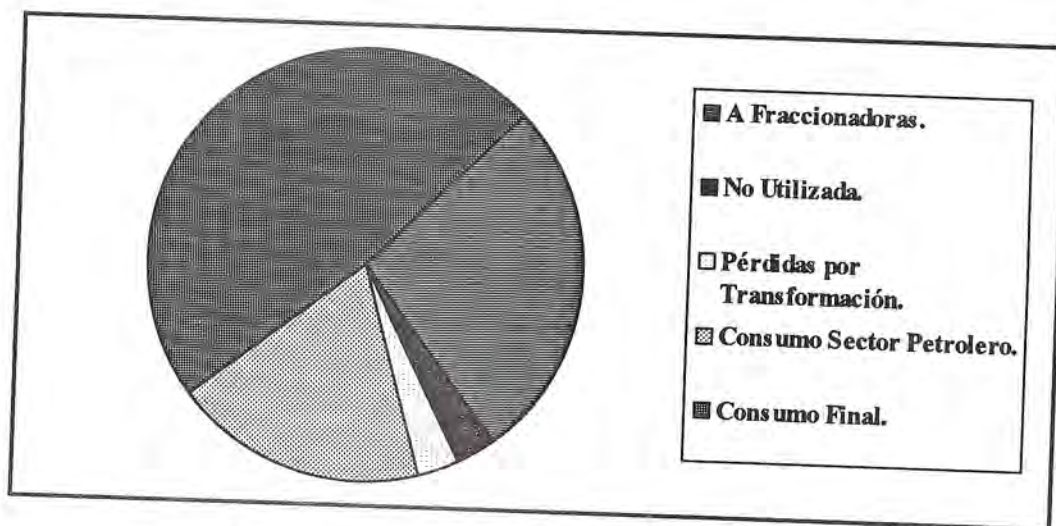


Figura 1. Usos de la producción de gas natural

Las emisiones de metano debidas a las operaciones de mantenimiento rutinario, venteo y quemadores asociados a la producción de petróleo se estimaron con el procedimiento medio (Tier-2) de la metodología del IPCC. Por otro lado, las emisiones provenientes del mantenimiento rutinario, venteo y quemadores durante la producción de gas no asociado se estimaron a partir del factor de emisión alto de la Tabla 1-8 del cuaderno de trabajo del IPCC (Vol.2, 1993) para la Región Resto del Mundo.

Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 1. Como se puede apreciar, 497.40 Gg de metano fueron emitidos en México en 1990 durante las operaciones de producción de petróleo y gas. De ellas, 83.3% fueron generadas en las áreas de producción del petróleo.

Tabla 1. Emisiones de metano en México, durante 1990, derivadas de la producción de petróleo y gas.

	Emisiones de CH ₄ Gg	%
<i>Venteo y Quemadores</i>		
Producción de Crudo	378.88	76.18
Producción de Gas	56.66	11.39
<i>Mantenimiento Rutinario</i>		
Producción de Crudo	35.48	7.13
Producción de Gas	26.03	5.23
<i>Exploración y Perforación</i>	0.33	0.07
Total	497.37	100.00

3.1.1.-Producción de petróleo

En este rubro se consideran aquellas cantidades de gas asociado que se producen, ya sea para su procesamiento o consumo posterior, o bien para ser reinyectadas, o utilizadas por dispositivos de control, o consumidas en equipos de combustión. También se toman en cuenta las fugas asociadas a estas operaciones, las que se estiman en 3% en todos los casos. La cantidad mínima estimada en este segmento es de 368 Gg/año, mientras que por fugas en el sistema de combustible, quemadores y reinyección se alcanza una cifra de 47 Gg/año. El factor de 3% supuesto para este rubro de fugas tiene una gran incertidumbre, por lo que es indispensable llevar a cabo investigaciones más detalladas para disminuirla.

3.1.2.-Producción de gas

Las emisiones de metano generadas en el área de producción de gas asociado son de 82.69 Gg/año, 8.53% del total de las emisiones fugitivas de metano. Estas emisiones se obtienen al aplicar los factores de emisión altos de la Tabla 1-8 del cuaderno de trabajo del IPCC (Vol.2, 1993) para la Región Resto del Mundo.

3.1.3.-Actividades de exploración y perforación

El total de emisiones debidas a las actividades de exploración y perforación son generalmente pequeñas comparadas a las de otras áreas del sector petrolero. En consecuencia, el procedimiento básico (Tier-1) es probablemente el apropiado para México. Como no se tienen datos de las emisiones de metano por pozo en nuestro país, se recurrió a la cifra representativa para los pozos de los EUA (0.07 Mg/pozo). El valor estimado para las emisiones debidas a exploración y perforación, 0.33Gg, es el menor de todos los encontrados para el sistema de gas natural y corresponde sólo al 0.03% del total de emisiones fugitivas de metano en nuestro país.

3.2.-Refinación, transporte y almacenamiento de petróleo

Las emisiones por estas actividades se presentan en la Tabla 2, que muestra que ellas son casi despreciables, porque representan tan sólo el 2.52% del total de emisiones fugitivas de metano. Los cálculos fueron hechos con el procedimiento medio (Tier-2) de la metodología del IPCC.

Para poder hacer estas estimaciones dos parámetros son importantes: el factor de solución del gas y su fracción de metano; ambos relacionados con el tipo de crudo que se trate. La

Tabla I-47 del manual de referencia del IPCC (Vol. 3, 1995) proporciona algunas estimaciones para estos parámetros tanto para instalaciones terrestres como mar adentro. Indudablemente, estos factores se podrían mejorar sustancialmente mediante determinaciones y simulaciones de procesos específicos para sitios seleccionados. En México la mayoría de las refinerías procesan mezclas de crudos, pero uno de sus componentes le impone características cercanas al petróleo crudo medio. Cuando se aplican los valores extremos del factor de solución de gas y la fracción molar asociados a este tipo de crudo, se encuentran los valores inferior y superior del intervalo representativo de las emisiones derivadas de la refinación, el transporte y el almacenamiento de petróleo, con el resultado realista situado dentro de este intervalo. Los valores resultantes de los extremos de este segmento son 15.6 y 24.4 Gg/año respectivamente.

Tabla 2. Emisiones de metano en México, durante 1990, derivadas del procesamiento de petróleo crudo.

	Emisiones de CH ₄	
	Gg	%
Transporte	7.69	31.52
Refinación	14.19	58.17
Almacenamiento	2.52	10.32
Total	24.40	100.00

3.3.-Procesamiento, conducción y distribución de gas

Las emisiones de metano por el procesamiento, conducción y distribución de gas durante 1990 se estimaron en 318.51 Gg/año, es decir 32.86% del total de las emisiones fugitivas de metano durante ese año. Este es el segundo valor en importancia dentro del sistema de gas natural.

Las emisiones por fugas en plantas industriales y termoeléctricas, así como en los sectores comercial y residencial, se estimaron en 129.02 Gg/año, o sea 13.31% del total de emisiones fugitivas.

Todos estos resultados se basaron en la aplicación del procedimiento medio (Tier-2) de la metodología del IPCC, suponiendo que las pérdidas asociadas eran 3% del gas en cada operación. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Emisiones de metano en México, durante 1990, derivadas del procesamiento de gas natural.

	Emisiones de CH ₄	
	Gg	%
Procesamiento Distribución y Conducción	318.51	71.17
Fugas en Plantas	126.79	28.33
Fugas Residenciales	2.24	0.50
Total	447.53	100.00

4. Conclusiones y discusión

La incertidumbre en los cálculos se puede estimar a partir de las diferencias en los resultados obtenidos con diferentes niveles de la metodología IPCC. Con el nivel básico (Tier-1) se obtiene para México un intervalo de 435 a 1069 Gg/año. Estas cifras provienen de aplicar los llamados factores de emisión mínimo y máximo respectivamente para la región Resto del Mundo (Cuatecontzi, 1995a). Por otro lado, al aplicar el nivel medio (Tier-2) para algunos de los rubros y el nivel básico (Tier-1) con los factores de emisión altos de la región Resto del Mundo para los otros rubros, se obtiene la cantidad de 970 Gg/año (Cuatecontzi, 1995b).

En otro estudio, las emisiones de metano para el sector petrolero de México se estimaron en un intervalo de entre 1000 a 1700 Gg/año (EPA, 1994). Sin embargo, México fue clasificado junto con los países de la OPEP, lo que en nuestra opinión no es adecuado considerando la diferencia de aprovechamiento de gas natural entre esos países y el nuestro (Cuatecontzi, 1994).

El IPCC proporciona una incertidumbre total del 60% para las emisiones de metano provenientes del sector petrolero (IPCC, 1995 Vol. 1). Con esta incertidumbre y tomando como base los 970 Gg/año, las emisiones de metano caerían en el intervalo de entre 474 y 1570 Gg/año. El valor mínimo de este intervalo es superior al valor mínimo de emisiones (435 Gg/año) obtenido con el nivel básico (Tier-1) (Cuatecontzi, 1995a) de la metodología IPCC para la región Resto del Mundo. Por otro lado, el valor máximo del mencionado intervalo es un poco inferior al valor máximo (1700 Gg/año) estimado por la EPA (1994) clasificando a México junto con los países de la OPEP. Dicho de otra manera, la dispersión de los resultados al ser clasificado en la región Resto del Mundo o en la correspondiente a los países exportadores de petróleo es también del orden del 60% si se toma como base el valor de 970 Gg/año. Este valor representa entre un 1.4% a un 3% de las emisiones globales fugitivas de metano. En la Figura 2 se muestran las diferentes estimaciones que se han hecho para las emisiones de metano del sector petrolero en México.

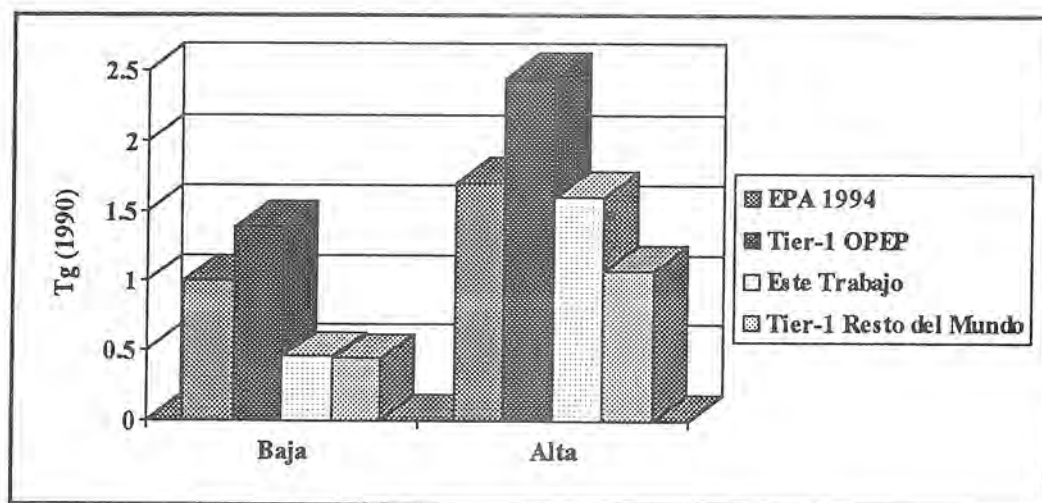


Figura 2. Diferentes estimaciones para México de las emisiones de metano del sector petrolero.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser mejorados significativamente si se cuenta con datos más confiables. En particular, se considera necesario mayor cuidado para establecer las estimaciones del venteo y quemadores de gas en la industria del petróleo. Análogamente, es conveniente mejorar las estimaciones por fugas de gas natural tanto en el procesamiento, distribución y conducción, como en las plantas industriales y de generación de potencia. En la Figura 3 se puede observar la contribución relativa de cada una de las etapas del procesamiento de gas natural a las emisiones fugitivas.

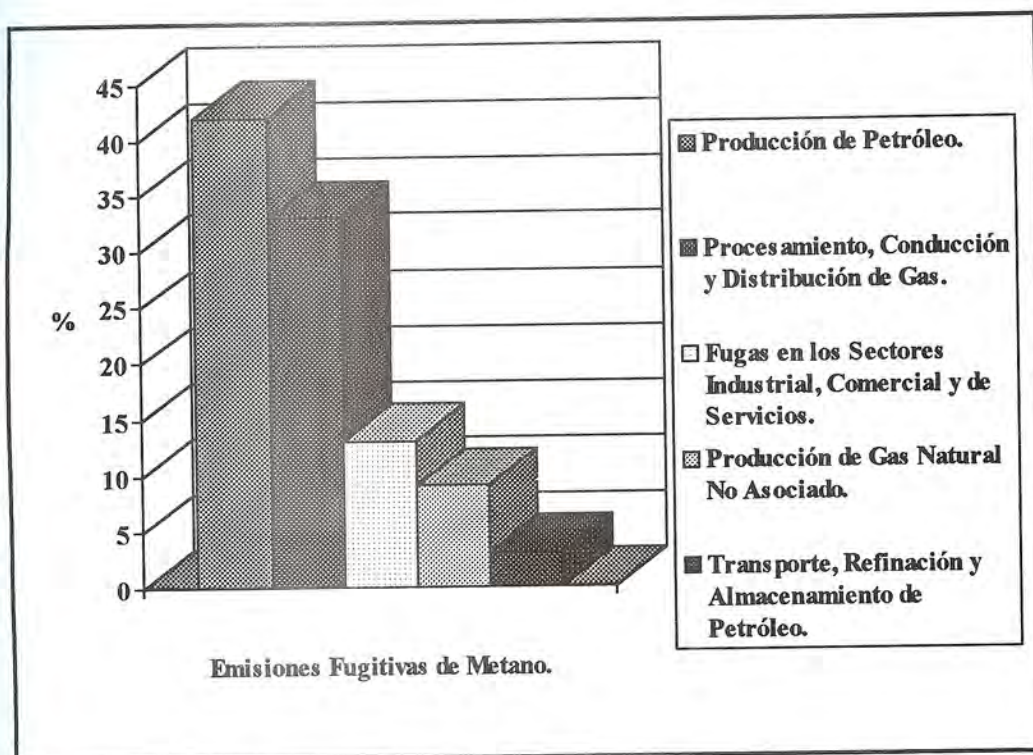


Figura 3. Contribución relativa de los diferentes sectores de la industria petrolera a las emisiones fugitivas de metano.

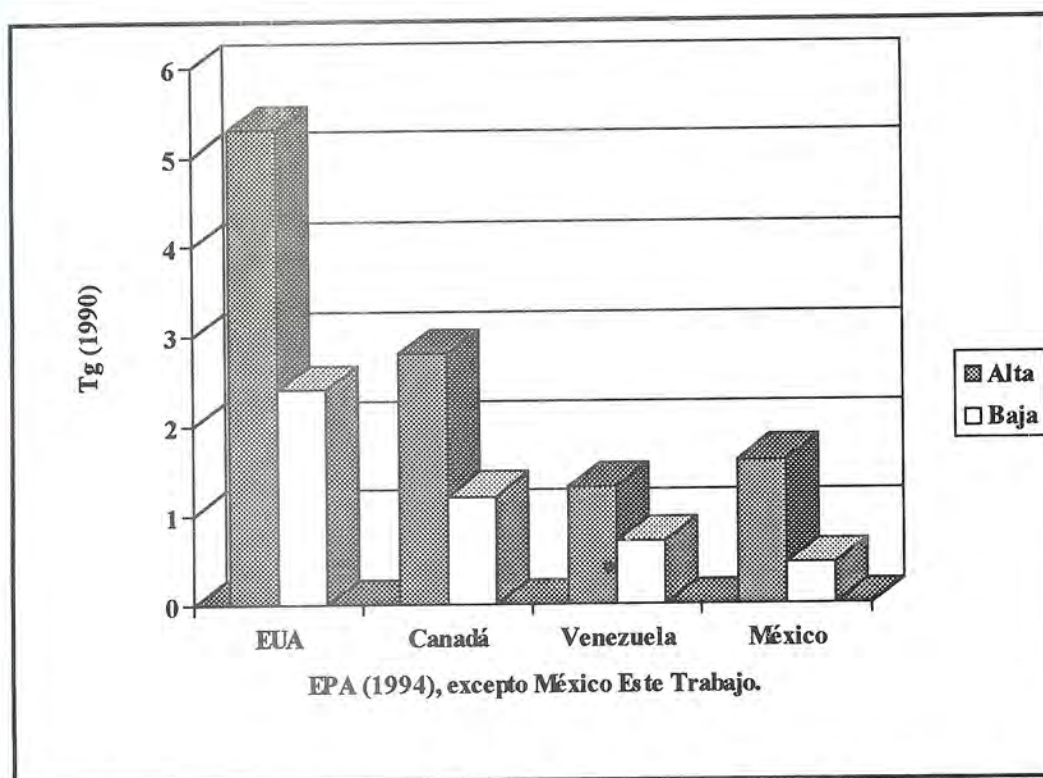


Figura 4. Emisiones totales fugitivas de Metano en el hemisferio norte de América.

En la Figura 4 se puede ver la contribución de cada uno de los países del hemisferio norte del continente americano con explotación petrolera importante a las emisiones fugitivas globales de metano.

REFERENCIAS

- Cuatecontzi, D., J. Gasca, F. Guzmán, 1994. Emissions from the Petroleum Industry. 1st. Report to UNEP México.
- Cuatecontzi, D., J. Gasca, F. Guzmán, 1995a. Emissions from the Petroleum Industry. 2nd. Report to UNEP México.
- Cuatecontzi, D., J. Gasca, F. Guzmán, 1995b. Emissions from the Petroleum Industry. 3rd. Report to UNEP México.
- EPA, 1994. International Anthropogenic Methane Emissions: Estimates for 1990. USA.
- IPCC/OECD, 1995. Green House Gas Inventory, Vol. 1 Reporting Instructions. USA.
- IPCC/OECD, 1993. Green House Gas Inventory, Vol. 2 Final Draft Workbook. USA.
- IPCC/OECD, 1995. Green House Gas Inventory, Vol. 3 Reference Manual. USA.
- PEMEX, 1991. Memoria de Labores 1990. México.
- SEMIP, 1991. Balance Nacional de Energía 1990. México.

Inventarios de emisiones de metano y óxido nitroso por actividades agropecuarias en México durante 1990. Resultados a partir de las metodologías de la EPA y el IPCC

GONZALEZ AVALOS, E., RUIZ SUAREZ, L. G.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México

ABSTRACT

In this work results from the application of EPA (Safley, L.M. *et al*, 1992) and IPCC (IPCC, 1994) methodologies to estimate methane emissions from cattle manure in Mexico are shown; account was taken of cool, temperate and warm regions, its function (food or milk production), and herd stratum. Volatile solids (VS) were calculated previously starting from herd energy intake (food intake). We compare the emission factors of both methodologies for this source, IPCC factors are 6.3 lowest than EPA factors. We show the results on methane emission from other livestock species manure, cattle enteric fermentation, and flooded rice fields, in agreement to tier 1 IPCC methodology. Furthermore we estimate nitrous oxide emissions by nitrogen fertilizer use in agricultural soils. Methane emissions from livestock are 1.85 Tg, and 35 Gg from rice fields. Methane emissions from livestock enteric fermentation are 1.80 Tg (97.37% of the livestock emissions) from which 1.62 are due to cattle (90.00%), distributed in 21.05% and 68.95% for dairy and non-dairy cattle, respectively. All other livestock species produced 180.3 Gg of methane, equivalent to 9.99%. Methane emissions from livestock manure were 48.802 Gg, equivalent to 2.63% of the livestock emissions; from these, 24.798 Gg are due to cattle (1.34%), and the remainder 1.29%, are due to other species. On the other hand, nitrous oxide (N_2O) emissions were 5.51 Gg.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías para la estimación de las emisiones de metano, propuestas por la EPA (Safley, L.M. *et al*, 1992) y el IPCC (IPCC, 1994), para los desechos del ganado bovino en México; considerando las regiones frías, templadas y cálidas, la función (carne o leche) y estratos, del hato. Previamente se calculan los sólidos volátiles a partir de la estimación de la energía ingerida por los bovinos, vía el alimento. Se hace una comparación de los factores de emisión propuestos en cada una de las metodologías para esta fuente. El IPCC propone factores 6.3 veces menores que los propuestos por la EPA. Se presentan los resultados en la estimación de las emisiones de metano por desechos de las demás especies de ganado y por fermentación entérica en bovinos, así como las debidas a los arrozales, siguiendo para ello la metodología del IPCC en una primera aproximación. Se calculan además las emisiones de óxido nitroso por la aplicación de fertilizantes nitrogenados a suelos agrícolas. Se reporta que las emisiones de metano por el ganado son de 1.85 Tg, y por arrozales de 35 Gg. Por fermentación entérica del ganado se emitieron 1.80 Tg (97.37% de las emisiones del ganado), de las cuales 1.62 Tg corresponden al ganado bovino (90.00%), distribuidas en 21.05% y 68.95% para ganado lechero y no lechero, respectivamente. Las demás especies produjeron 180.3 Gg de metano, equivalente al 9.99%. Las emisiones de metano por desechos del ganado fueron de 48.802 Gg, las cuales representan el 2.63% de las emisiones del ganado; de estas, 24.798 Gg son de bovinos (1.34%), y el restante 1.29% es para las demás especies. Se reporta además que se emitieron 5.51 Gg de óxido nitroso (N_2O).

Introducción

En México se empezó a recabar información para llevar a cabo un inventario de emisiones de metano debidas a actividades pecuarias en general. Se confirmó que para la fermentación entérica del ganado bovino, de acuerdo a la metodología propuesta por el IPCC en 1991 (IPCC, 1991) no se contaba con la información requerida en su totalidad. Luego de revisar la metodología propuesta por la EPA en 1992 (Safley, L.M. *et al*, 1992) se observó que se podía contar con toda la información para el caso de los desechos del ganado bovino, la cual incluía una estructura por edades, función, clima, sistema de explotación y región geográfica, del hato. Todo lo anterior relacionado con la masa del animal, la dieta típica por sistema de producción de ganado y el sistema de manejo de desechos.

Tomando en consideración la metodología de la EPA, misma que se resume en la fórmula:

$$\sum_k \sum_j \sum_i V S_i [N_i, D_i(TAM_i)] \cdot B_{oi} \cdot MCF_j \cdot CAF_{jk} \cdot \rho_{CH_4} \quad (1)$$

se llegaron a estimar las emisiones de metano por desechos de bovinos para los años 1982 a 1992, y su proyección al año 2025. Así, para el año de 1990 se estimó que las emisiones totales en México, por este concepto, fueron de 117.9 Gg (González Avalos, 1994).

En cuanto a la metodología propuesta por el IPCC (IPCC, 1994) para las emisiones por desechos del ganado, se tiene que:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum_i EF_i \cdot N_i \quad (2)$$

donde:

N_i = Número de animales del tipo i .

EF_i = Factor de emisión anual (kg) por tipo de animal i , y

$$EF_i = V S_i \cdot 365 \text{ día/año} \cdot B_{oi} \cdot 0.67 \text{ kg/m}^3 \cdot \sum_{jk} MCF_{jk} \cdot MS\%_{ijk} \quad (3)$$

$V S_i$ = Sólidos volátiles excretados al día (kg) por tipo de animal i , y

$$V S_i = EI \cdot (1 \text{ kg}/18.45 \text{ MJ}) \cdot (1 - DE\%/100) \cdot (1 - ASH\%/100) \quad (4)$$

EI = Promedio diario de energía ingerida (MJ/día) [Energy Intake].

$DE\%$ = Digestibilidad del alimento (%).

$ASH\%$ = Contenido de ceniza del desecho (%).

18.45 MJ/kg = Densidad aproximada de energía del alimento por kg de materia seca.

B_{oi} = Capacidad de producción máxima de metano (m^3/kg de VS) por los desechos producidos por tipo de animal i .

MCF_{jk} = Factores de conversión de metano por sistema de manejo de desechos j , para cada región climática k .

$MS\%_{ijk}$ = fracción de animales tipo i cuyos desechos son manejados usando el sistema j , en la región climática k .

En la ecuación (4) se observa que los sólidos volátiles están en función de la energía ingerida (EI) a través del consumo de alimento, de la digestibilidad del alimento ($DE\%$) y del contenido de ceniza en los desechos ($ASH\%$).

Energía ingerida y sólidos volátiles producidos

En México no se tienen datos de la energía ingerida por cada tipo de animal a través del alimento. A fin de resolver este problema se obtuvo la relación funcional entre la energía ingerida y la masa promedio del animal por cada estrato o edad, mediante la correlación de datos contenidos en la tabla B-1 del texto (vol.3) del IPCC (IPCC, 1994); la Figura 1 presenta el caso de los bovinos productores de carne.

Al considerar la regresión lineal en la Figura 1 y de una similar para bovinos productores de leche, se obtiene que la energía ingerida [MJ/día], vía el alimento, está dada por las ecuaciones:

$$EI(\text{carne}) = 0.265 TAM_i + 32.419 \quad (5)$$

$$\sum_k \sum_j \sum_i V S_i [N_i, D_i(TAM_i)] \cdot B_{oi} \cdot MCF_j \cdot CAF_{jk} \cdot \rho_{CH_4} \quad (1)$$

se llegaron a estimar las emisiones de metano por desechos de bovinos para los años 1982 a 1992, y su proyección al año 2025. Así, para el año de 1990 se estimó que las emisiones totales en México, por este concepto, fueron de 117.9 Gg (González Avalos, 1994).

En cuanto a la metodología propuesta por el IPCC (IPCC, 1994) para las emisiones por desechos del ganado, se tiene que:

$$\text{Emisiones de } CH_4 = \sum_i EF_i \cdot N_i \quad (2)$$

donde:

N_i = Número de animales del tipo i .

EF_i = Factor de emisión anual (kg) por tipo de animal i , y

$$EF_i = V S_i \cdot 365 \text{ día/año} \cdot B_{oi} \cdot 0.67 \text{ kg/m}^3 \cdot \sum_{jk} MCF_{jk} \cdot MS\%_{ijk} \quad (3)$$

$V S_i$ = Sólidos volátiles excretados al día (kg) por tipo de animal i , y

$$V S_i = EI \cdot (1 \text{ kg}/18.45 \text{ MJ}) \cdot (1 - DE\%/100) \cdot (1 - ASH\%/100) \quad (4)$$

EI = Promedio diario de energía ingerida (MJ/día) [Energy Intake].

$DE\%$ = Digestibilidad del alimento (%).

$ASH\%$ = Contenido de ceniza del desecho (%).

18.45 MJ/kg = Densidad aproximada de energía del alimento por kg de materia seca.

B_{oi} = Capacidad de producción máxima de metano (m^3/kg de $V S$) por los desechos producidos por tipo de animal i .

MCF_{jk} = Factores de conversión de metano por sistema de manejo de desechos j , para cada región climática k .

$MS\%_{ijk}$ = fracción de animales tipo i cuyos desechos son manejados usando el sistema j , en la región climática k .

En la ecuación (4) se observa que los sólidos volátiles están en función de la energía ingerida (EI) a través del consumo de alimento, de la digestibilidad del alimento ($DE\%$) y del contenido de ceniza en los desechos ($ASH\%$).

Energía ingerida y sólidos volátiles producidos

En México no se tienen datos de la energía ingerida por cada tipo de animal a través del alimento. A fin de resolver este problema se obtuvo la relación funcional entre la energía ingerida y la masa promedio del animal por cada estrato o edad, mediante la correlación de datos contenidos en la tabla B-1 del texto (vol.3) del IPCC (IPCC, 1994); la Figura 1 presenta el caso de los bovinos productores de carne.

Al considerar la regresión lineal en la Figura 1 y de una similar para bovinos productores de leche, se obtiene que la energía ingerida [MJ/día], vía el alimento, está dada por las ecuaciones:

$$EI(\text{carne}) = 0.265 TAM_i + 32.419 \quad (5)$$

$$EI(\text{leche}) = 0.243TAM_i + 52.371$$

(6)

donde TAM_i es la masa promedio de cada tipo de animal i .

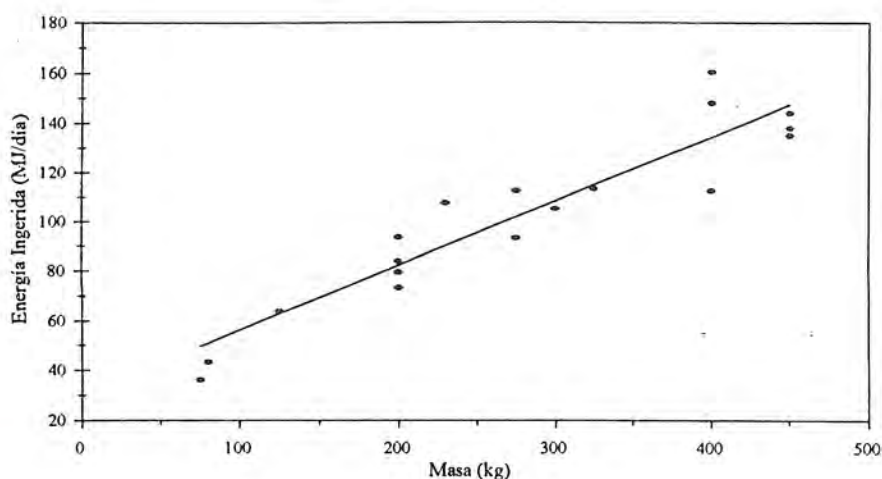


Fig. 1. Energía ingerida por bovinos productores de carne, asociada a la masa del animal.

Dado que en México se cuenta con información de la masa promedio por tipo de animal de cada sistema de producción, función, región geográfica y estrato; fue posible, al aplicar las ecuaciones (5) y (6), obtener para cada estrato de cada función, la relación entre la energía ingerida y la masa del animal. Con ello se pudo calcular la cantidad de sólidos volátiles al utilizar la ecuación (4), para luego estimar los factores de emisión por función y estrato al usar la ecuación (3).

Los climas

México posee una gama muy amplia de climas, desde los fríos y húmedos hasta los cálidos y áridos. Dentro del contexto de las emisiones de metano, la EPA y el IPCC proponen una clasificación climática simple aplicable a cualquier país, en la que el parámetro más importante para la producción de metano es la humedad, pues como puede verse en la tabla de climas (Tabla 1), para la EPA son los climas húmedos y subhúmedos quienes tienen asociados los factores de ajuste climáticos más grandes, en tanto que los climas secos tienen el factor de ajuste menor.

Puede observarse también que el IPCC establece una clasificación basada en la temperatura media anual de los climas húmedos y subhúmedos; para los climas secos no considera, al igual que la EPA, diferencias de temperatura.

Tabla 1: Los climas y sus intervalos de temperatura				
Koeppen ¹	Climas EPA	CAF ²	Temp. (C)	Climas IPCC
Af, Am, Aw	Cálidos *	1.00	25<T	Cálidos
A(C) , (A)C	Semicálidos *	1.00	15<T<25	Templados
Cf, Cm, Cw	Templados *	0.90	15<T<25	
BS1	Semiáridos **	0.50	***	Fríos o Aridos
BS0	Aridos **	0.50	***	
BW	Muy áridos **	0.50	***	
Cs	Semifríos *	0.80	T<15	
ET, EF	Fríos *	0.80	T<15	

¹ Clasificación climática de Koeppen modificada por E.García (UNAM, 1990).

² Factor de Ajuste Climático propuesto por la EPA (Safley, L.M. et al, 1992).

* Húmedos y subhúmedos.

** Cálidos, semicálidos y templados.

*** Cualquier temperatura.

La distribución de climas en México, siguiendo las metodologías de la EPA y el IPCC, están representadas en las Figuras 2 y 3, respectivamente. En estas gráficas se nota que los climas secos predominan en la región norte, y que los cálidos (húmedos y subhúmedos) cubren la mayor parte de las regiones sur y sureste.

Teniendo en cuenta la relación entre ambas clasificaciones, se establecen los porcentajes de territorio que abarca cada clima en las regiones norte, centro, sur y sureste del país. Al aplicar la hipótesis "al porcentaje de superficie correspondiente a cada clima en cada Estado, le corresponde igual porcentaje del ganado de la Entidad" (González Avalos, 1994), se obtienen las poblaciones ganaderas (N_i) por clima en las regiones consideradas.

Factores de conversión y factores de emisión de metano

Las metodologías de la EPA y del IPCC muestran que los Factores de Conversión de Metano (MCF) asociados a los climas son tales que:

$$MCF_{jk}(IPCC) \approx MCF_j \cdot CAF_k(EPA) \quad (7)$$

y

$$VS_i(IPCC) \sim VS_i(EPA) \quad (8)$$

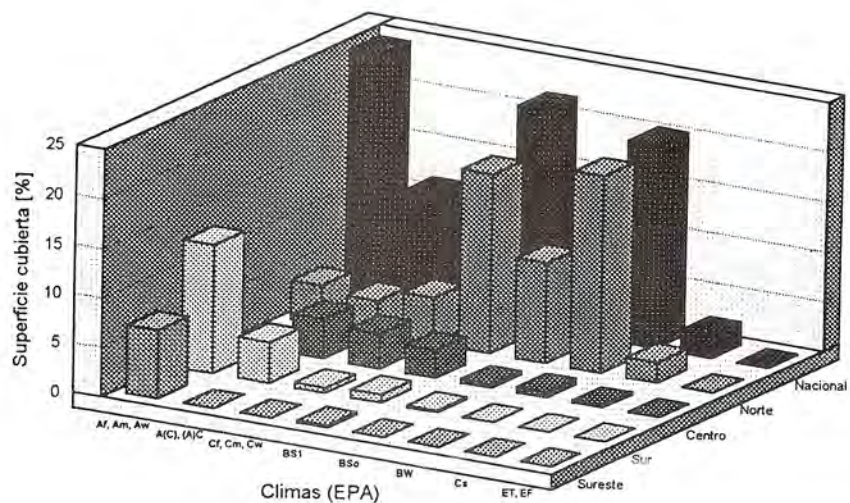


Fig. 2. Los climas en México por regiones, de acuerdo a la equivalencia entre Koeppen y la EPA.

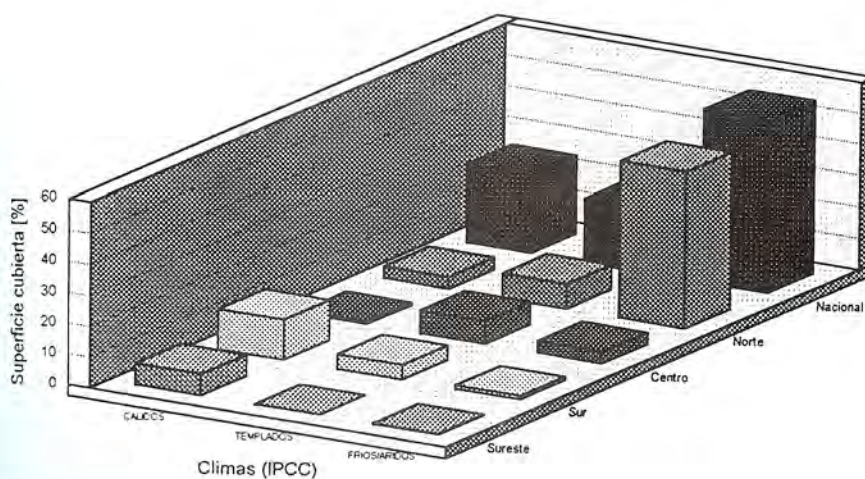


Fig. 3. Los climas en México por regiones, de acuerdo a la clasificación del IPCC.

con lo cual se establece la correspondencia entre los MCF de la EPA y el IPCC por función, sistema de producción y región climática. Los Factores de Conversión de Metano para cada metodología aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2: Factores de Conversión de Metano (MCF) del IPCC y la EPA, por desechos del ganado bovino.						
Sistema	Fríos/Aridos		Templados		Cálidos	
	IPCC	EPA	IPCC	EPA	IPCC	EPA
Intensivo	0.1	3.9	0.5	6.0	1.0	6.3
Semi-intensivo	0.5	5.1	1.0	7.8	1.5	8.2
Extensivo	1.0	6.2	1.5	9.5	2.0	10.0

Al comparar los MCF de una y otra metodología, se observa que los de la EPA son mayores a los del IPCC. Al aplicar los MCF de la Tabla 2 a la ecuación (3), los Factores de Emisión (EF) que se obtienen presentan diferencias del mismo orden a las de la Tabla 2; esto puede apreciarse en la Tabla 3.

Tabla 3: Razón entre Factores de Emisión de la EPA y el IPCC [EF(EPA)/EF(IPCC)] por desechos del ganado bovino.						
Sistema	Fríos/Aridos		Templados		Cálidos	
	Carne	Leche	Carne	Leche	Carne	Leche
Intensivo	26.34	14.53	19.36	20.12	11.93	2.87
Semi-intensivo	3.62	6.24	6.66	21.57	5.47	4.10
Extensivo	1.84	2.95	4.52	13.56	1.18	2.90

Al calcular el promedio pesado de los Factores de Emisión respecto al número de cabezas (N_i) por función del hato, sistema de producción y región climática (Tabla 4), se obtiene que los factores de la EPA son de un orden 6.3 veces más grandes que los del IPCC.

Tabla 4: Inventario de bovinos por sistema, función y clima. (miles de cabezas)						
Sistema	Fríos/Aridos		Templados		Cálidos	
	Carne	Leche	Carne	Leche	Carne	Leche
Intensivo	1,532.5	937.0	557.7	341.0	6,845.5	418.5
Semi-intensivo	6,453.2	1,265.5	2,348.5	460.5	2,882.4	565.2
Extensivo	6,036.4	1,479.0	2,196.8	538.3	2,696.3	660.6

Emisiones de metano por desechos de bovinos

A continuación se presentan los resultados en las emisiones de metano por desechos del ganado bovino, para ambas metodologías.

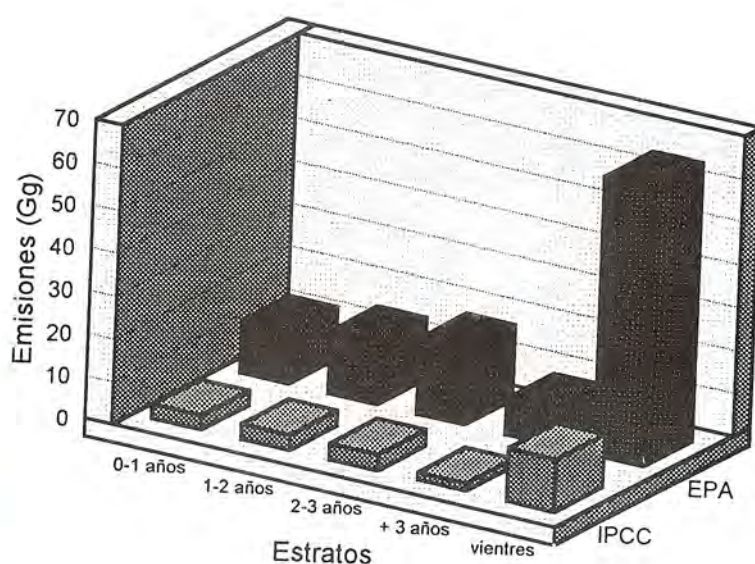


Figura 4. Metano emitido por desechos de bovinos en México durante 1990, de acuerdo a las metodologías de la EPA y el IPCC.

En la figura 4 puede observarse la diferencia que hay en la estimación de las emisiones de metano para esta fuente, al considerar las metodologías de la EPA y el IPCC. Estos resultados

indican que las emisiones según la EPA para los estratos 0-1 años, 1-2 años, 2-3 años, más de 3 años y vientres, exceden a las del IPCC en 3.64, 4.18, 4.64, 4.74, 5.24 veces, respectivamente. A nivel nacional las emisiones por EPA son 4.75 veces mayores que las del IPCC.

Emisiones de metano por desechos de otras especies

Se tiene información de las existencias de ganado no bovino para cada Estado del país (INEGI, 1991), mas no para la población animal en cada clima. Debido a ello se aplica la hipótesis de la distribución de bovinos por clima, enunciada anteriormente, a las demás especies ganaderas (falta demostrar su validez para especies no bovinas) y con ello se logra estimar la población animal de ovejas, cabras, caballos, mulas, asnos, cerdos y aves, en cada región climática del país. Los factores de emisión para esas especies fueron tomados del texto del IPCC, toda vez que en México no se dispone de tales factores. Las emisiones que se reportan corresponden a un primer nivel de aproximación. Los resultados se encuentran en la Tabla 5, en la cual se incluyen las emisiones por bovinos.

Tabla 5: Metano emitido por desechos del ganado y aves en México, 1990; aplicando la metodología del IPCC.	
Ganado	Emisiones (Gg)
Bovino carne	19.412
Bovino leche	5.386
Ovino	0.800
Caprino	1.554
Caballar	4.882
Mular / Asnal	1.938
Porcino	10.809
Aves	4.021
Total	48.802

En la Tabla 5 se observa que los desechos de bovinos y cerdos emiten el 72.96%. Las demás especies contribuyen todas ellas con 13.195 Gg, equivalente al 27.04% del total de metano por esta fuente.

Emisiones de metano por fermentación entérica del ganado

Esta fuente de emisiones requiere también de datos de población animal y de factores de emisión por tipo de animal para una primera aproximación en el cálculo de las emisiones. La metodología del IPCC proporciona los factores que fueron usados en los cálculos respectivos. La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos.

De conformidad con la Tabla 6, por fermentación entérica los bovinos productores de carne

emiten el 68% de metano, los bovinos lecheros el 21.05%, y las demás especies juntas apenas alcanzan los 180.295 Gg, equivalentes al 10% de las emisiones por esta fuente.

Tabla 6: Metano emitido por fermentación entérica del ganado en México, 1990; aplicando la metodología del IPCC.	
Ganado	Emisiones (Gg)
Bovino carne	1244.096
Bovino leche	379.945
Ovino	28.723
Caprino	52.167
Caballar	59.800
Mular / Asnal	24.038
Porcino	15.567
Total	1804.336

Emisiones de metano por cultivo de arroz

La metodología del IPCC para esta fuente de emisiones contempla la producción de arroz bajo tres regímenes de agua: inundación continua, inundación intermitente y régimen seco. En México se cuenta con datos del número de hectáreas cultivadas por riego y temporal, correspondiendo al primero el régimen de inundación continua, y al segundo el régimen seco. Esto concuerda con los valores que asigna el IPCC a nuestro país.

En el presente trabajo se consideró una temperatura media anual de 24 C para todas las regiones productoras de arroz en México, y en razón de ello se asoció el factor de emisión propuesto por el IPCC. En cuanto al periodo durante el cual la planta alcanza su madurez, la literatura consultada coincide con los valores que consigna el IPCC en su metodología.

Los resultados obtenidos indican que durante 1990 en México se emitieron 35 Gg de metano por el cultivo de arroz, tal como se presenta en la Tabla 7.

TABLA 7: Cultivo del arroz

Categorías de fuentes y sumideros	Datos de la actividad		Estimación de las emisiones	Factor de emisión conjunto
	A Area cultivada en Megahectáreas (Mha)	B Megahectáreas-días de cultivo (Mha-días)*	C Metano (Gg CH ₄)	D Factor de emisión medio de CH ₄ (kg CH ₄ /ha-día) D=C/B
1 Régimen inundado	54.500	130	35.0	0.269
2 Régimen intermitente	ND	ND	NC	NC
3 Régimen seco	65.108	135	0.0	0.000
TOTAL	119.61	---	35.0	-----

* = Fuente: Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. INEGI, 1991.
 ND = No hay datos.
 NC = No Calculado.

Emisiones de Oxido Nitroso por suelos agrícolas

La metodología del IPCC relativa a las emisiones de óxido nitroso por suelos agrícolas, en un primer nivel de aproximación, requiere datos de nitrógeno aplicado a los suelos a través de fertilizantes comerciales, fertilizantes orgánicos (desechos del ganado) y por fijación biológica. Los datos de suelos agrícolas fueron obtenidos de la FAO (FAO, 1993). Los datos de fertilizantes comerciales son del INEGI y de la FAO (INEGI, 1994; FAO 1991). El nitrógeno aplicado mediante fertilizante orgánico fue calculado al suponer que sólo los desechos de bovinos estabulados son colectados y esparcidos en los cultivos. De acuerdo al IPCC, el nitrógeno fijado biológicamente se calculó considerando una fijación de 25 kg/ha al año. Así, se estima que en México se emiten 5.51 Gg de óxido nitroso por este concepto. La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos.

TABLA 8: Suelos agrícolas

Categorías de fuentes y sumideros	Datos de la actividad			Emisiones estimadas	Factor de emisión conjunto
	A	B	C		
tipo de cultivo *	Cantidad de Nitrógeno aplicado en fertilizante y desechos (t N)	Area cultivada (ha)	Cantidad de Nitrógeno fijado biológicamente (t N)	Emisiones de N ₂ O (Gg)	(t N ₂ O/t N) 1000D/A
Todos los cultivos	2,409,730	24,710 X 10 ³ ^a	617.750 ^b	5.51	0.00271
* = Estos valores son para todos los cultivos del país, y corresponden a los coeficientes de emisión medio. a = Fuente: Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. INEGI, 1991. b = Con un suministro por deposición atmosférica de 25 kg N/ha al año.					

Conclusiones

El cálculo de las emisiones de metano por los desechos de las diversas especies ganaderas en México, se realizó siguiendo la metodología propuesta por la EPA y el IPCC. Para ello fue necesario aplicar importantes hipótesis relacionadas con las existencias de ganado en cada uno de los climas considerados, así como con el suministro de energía a través de los alimentos consumidos por el ganado. En este sentido se aplicó la hipótesis "al porcentaje correspondiente a cada clima en cada Estado le corresponde igual porcentaje del ganado de la Entidad", y con ello se estimó el número de cabezas en cada clima, según la EPA e IPCC; así mismo, al analizar la relación entre la masa promedio de los bovinos y la energía ingerida, conforme a los datos del IPCC para países en desarrollo, fue posible interpolar para las masas promedio de los bovinos en México y así encontrar los valores correspondientes de la energía.

Al comparar las emisiones por desechos para ambas metodologías, se observa que según la EPA se obtienen 117.9 Gg, y de acuerdo al IPCC 24.8 Gg, lo cual equivale a 4.75 veces más por la EPA respecto al IPCC. Esta diferencia se debe en principio a que los factores de emisión están en proporción de 6 a 1 para la EPA y el IPCC, respectivamente.

Las emisiones por desechos de bovinos productores de carne a nivel nacional representan el 78.28%, en tanto que el ganado lechero produce el 21.72%, de un total de 24.798 Gg de metano, mismas que equivalen al 50.81% del total de emisiones del país (48.802 Gg CH₄). En cuanto a las otras especies, es el ganado porcino el que sigue en emisiones, ya que alcanza el 22.15% del total nacional. Y las especies restantes, cubren el 27.04%.

En regiones frías o áridas, con el 55.23% del territorio, se emite el 22.27% (10.868 Gg CH₄) del total; en regiones templadas y cálidas, con el 20.10% y 24.67% de superficie, se emiten el 28.61% (13.96 Gg CH₄) y 49.12% (23.97 Gg CH₄), respectivamente.

Por fermentación entérica, los bovinos productores de carne contribuyen con el 68.94%, en tanto que los bovinos lecheros lo hacen con el 21.06%. Es decir, el ganado bovino produce el 90% de metano y las demás especies el 10%.

Las emisiones totales a nivel nacional para ambos procesos llegan a 1853.138 Gg, de las cuales el 97.37% corresponde a fermentación entérica. Sin embargo, algunos factores de emisión por fermentación corresponden a bovinos de 400 kg de peso, que es 23% mayor a su peso promedio

en México; por lo que es probable que con valores propios de dichos factores, la estimación de las emisiones disminuya sensiblemente al considerar el peso promedio real de los bovinos en nuestro país.

Las emisiones de metano por cultivos de arroz, conforme a la tabla 7, son de 35 Gg, lo cual corresponde al 1.88% del total. Las emisiones de metano, considerando las tres fuentes aquí incluídas, indican una contribución del 95.51% por fermentación entérica de todas las especies ganaderas, un 2.61% asociado a los desechos y el restante 1.88% para los arrozales. De aquí que las emisiones por actividades pecuarias son mucho más importantes que las asociadas a las agrícolas.

Se debe subrayar que los resultados, excepto para desechos de bovinos, provienen de una primera aproximación. En relación a las emisiones de óxido nitroso, éstas fueron calculadas considerando tres fuentes. El nitrógeno aplicado por fertilizantes comercial y orgánico, y por fijación biológica es de 79.6% y 20.4%, respectivamente. El total de emisiones es de 5.51 Gg, que equivale a 2.23×10^{-7} Gg/ha al año en el país.

REFERENCIAS

- FAO, 1991. Anuario estadístico de Fertilizantes, 1991. Roma, FAO, 1992.
- FAO, 1993. Anuario estadístico de la producción, 1993. Roma, FAO, 1994.
- González Avalos, E., 1994. Inventario de emisiones de metano por actividades pecuarias. El caso de los desechos del ganado bovino y su relación con los climas actuales y futuros en México. Tesis de Maestría en Ciencias (Geofísica), Facultad de Ciencias, UNAM. México. INEGI, 1991. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 1990. México, INEGI, 1991.
- INEGI, 1994. La Industria Química en México. México, INEGI, 1994.
- IPCC/OECD, 1994. Greenhouse Gas Inventory, 3 vol. IPCC, U.S.A., 1994.
- Safley, L. M. 1992. Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure. By L. M. Safley, Jr.; M. E. Casada, J. W. Woodbury, and Kurt F. Roos. U. S .A., United States Environmental Protection Agency (EPA), 1992.
- UNAM, 1990. Atlas Nacional de México. 3 Vols.

Los beneficios y los costos para México de un impuesto sobre el carbono: Un análisis usando el MCEG

ROY BOYD

Ohio University

KERRY KRUTILLA

Indiana University

ABELARDO MONCAYO

Ohio University

1. Introducción

Las preocupaciones respecto al calentamiento mundial han llevado la política energética a un primer lugar en la agenda de la política ambiental. Numerosas incertidumbres, sin embargo, complican la tarea de definir la política más adecuada para responder a los riesgos potenciales del calentamiento mundial. El impacto económico para la generación presente de una reducción del consumo de energía es una fuente de incertidumbre. Pero el impacto fundamental de las políticas de conservación de energía sobre el calentamiento mundial, y el valor de los beneficios económicos y ecológicos asociados con la reducción de los riesgos de calentamiento mundial, son los más grandes factores desconocidos [8, 9].

Un resolución de todas las incertidumbres de la información no es una precondition necesaria para justificar una acción orientada a reducir el consumo de energía y los riesgos de calentamiento mundial. Valdría la pena iniciar políticas de conservación de energía hoy, sean cuales sean los impactos del calentamiento ambiental, si tales políticas pudieran ser independientemente justificadas. Con este espíritu, la Academia Nacional de Ciencias ha sugerido que el que el precio de la energía refleje los factores ambientales externos del periodo en curso, y el que las inversiones en conservación de energía tengan un costo eficaz, son respuestas políticas prudentes [8]. Poner en marcha tales políticas para evitar futuros arrepentimientos (políticas "sin arrepentimientos," en adelante) podría reducir, como efecto lateral, las emisiones de CO₂, y daría lugar a que haya un reajuste de la política energética en el futuro, cuando se obtenga una mejor información respecto a la climatología mundial y a los riesgos ecológicos y políticos del calentamiento mundial.

El principal propósito de este estudio es la mejor evaluación de los beneficios netos para México de impuestos sobre el carbono dentro del tiempo presente, para determinar qué nivel de impuestos sobre la energía, de conservación de energía, y de reducciones de las emisiones de CO₂ pueden estar económicamente justificados. Con este propósito, combinamos estimaciones del valor monetizado de las reducciones de combustibles fósiles con estimaciones de costo generados con un modelo computable de equilibrio general o delineamos una escala de reducciones de emisiones de CO₂ donde los beneficios netos son positivos, un nivel óptimo de reducción de emisiones de CO₂ donde los beneficios netos se maximizan, y un punto en la escala de beneficios netos más allá del punto óptimo donde los beneficios netos declinan hasta el cero, al cual definimos como el nivel de reducción de emisiones "sin arrepentimientos."

2. Costos de la conservación de energía

Cuál es el nivel de reducción de energía que es económicamente beneficioso es obviamente una pregunta crucial para la política energética. Las investigaciones previas se han centrado en la evaluación de categorías de costos y beneficios fácilmente monetizadas, como por ejemplo el costo de las inversiones de capital en conservación de energía frente a los ahorros monetarios

resultantes de la baja de las cuentas de combustibles [8].

Una tendencia de la literatura convencional está basada en lo que se llama el enfoque "de abajo arriba" [6, 8, 12]. Es esencialmente un método de ingeniería para estimar costos, donde el procedimiento envuelve la identificación de aplicaciones finales, determinando cuánta energía puede reducirse en los varios usos finales mediante estrategias eficaces para conservar energía al menor costo posible. Agregando los resultados a través de las aplicaciones para determinar la energía total, las reducciones de emisiones en los Estados Unidos parece que están entre el 15% y el 50%, en relación con las diferentes presunciones sobre costos y el nivel de implementación de las políticas de conservación recomendadas [8].

Sin embargo, si las inversiones en conservación de energía son eficaces desde el punto de vista del costo, surge la pregunta, ¿por qué no se las implementa en forma más amplia? Se han citado como factores la aversión al riesgo entrañado por las tecnologías innovadoras, las limitaciones del capital disponible, y las barreras que dificultan o impiden la información [11]. Si todos estos factores fueran realmente barreras, el enfoque "de abajo arriba" exagera la eficacia del costo de las nuevas inversiones en conservación. Las barreras del riesgo y la información representan costos económicos reales.

Otra limitación que tiene el enfoque "de abajo arriba" es que no logra dar cuenta de los ajustes parciales o de equilibrio general del mercado. Como la implementación a gran escala de la tecnología para ahorro de energía tendrá sin duda impacto en el mercado, el ignorar los efectos de los precios puede introducir un sesgo en los estimaciones [5].

Los costos para el bienestar de la reducción de las emisiones de CO₂ mediante impuesto están significativamente influidos por la manera en que se ha estructurado la política impositiva. Por ejemplo, las pérdidas de bienestar en los países desarrollados como los Estados Unidos debidas a una política global para reducir las emisiones de CO₂ en un 50% varían entre 0.63% y 2.36%, de acuerdo a si se lleva a cabo la política a través de impuestos nacionales sobre el consumo, impuestos nacionales sobre la producción, o impuestos globales sobre la producción o el consumo [16]. Las diferencias entre las estimaciones resultan de los términos de los efectos del comercio y de las diferencias en el impacto de los ingresos en las diferentes regiones de la economía mundial. En este estudio adoptamos un enfoque basado en un modelo computable de equilibrio económico para evaluar el impacto sobre México de los costos de la creación de impuestos sobre el carbono. Consideramos una situación en la que el gobierno retiene el ingreso por concepto de impuestos sobre el carbono, de modo que hay un aumento del tamaño del gobierno, y presume que el ingreso hubiera sido elevado, en otro caso, mediante un impuesto sobre una suma global, que no distorsionaría los cálculos. Esta presunción generará estimaciones de costo más altas que otras presunciones; por ejemplo, la de que aumentar ingresos mediante un impuesto sobre el carbono evitaría la necesidad de producir los ingresos a través de otros impuestos distorsionadores, o la de que los ingresos por impuestos sobre el carbono serían equilibrados por la reducción de los impuestos distorsionadores de otras partes de la economía. Mostramos que aun para nuestra presunción de finanzas públicas, los beneficios netos de los impuestos sobre el carbono serán positivos en cierta escala cuando los beneficios para el ambiente sean explícitamente monetarizados. Nuestra contribución a la literatura es la de añadir una monetarización explícita de los beneficios ambientales, para obtener un análisis más amplio de los beneficios netos de los impuestos sobre el carbono.

3. Modelo Computable de Equilibrio General

El uso de un modelo computable de equilibrio general para simular los efectos de las políticas ambientales y energéticas se ha hecho cada vez más popular [2, 3, 4, 5]. En los últimos años, un creciente número de investigadores han empezado a usar estos modelos específicamente para analizar el impacto de los impuestos sobre el carbono. En el modelo CEG de México usamos un modelo estático que sigue de cerca la tradición de Shoven y Whalley [1, 4, 13, 15, 16]. Aunque el modelo está dentro de la corriente general de uso de estos modelos, es hasta cierto punto

distinto por su disgregación de los sectores agrícolas que usan intensamente la tierra y por la incorporación de la tierra como una aportación dentro de los procesos de producción. Como puede esperarse, el añadir a la tierra como un factor primario de producción afecta al factor de las reacciones de los precios a las políticas ambientales y a los efectos sobre la distribución de ingresos.

El modelo tiene 13 sectores de producción que generan bienes para consumo doméstico y para exportación a partir de tres factores primarios de producción, y la producción de otras industrias; seis clases de consumidores domésticos diferenciadas por su ingreso real; un sector de gobierno, y un sector extranjero (ver los Cuadros 1 y 2). Los factores correspondientes al capital y al trabajo son homogéneos y móviles dentro de los sectores, en tanto que el tercer factor, la tierra, es homogéneo pero sólo móvil dentro del subgrupo de los sectores correspondientes al uso de la tierra. Los precios de los bienes comerciados son endógenos en el modelo, ya que se presume que México es lo suficientemente grande como para influir en el precio de los bienes comerciados, y los bienes producidos domésticamente son imperfectamente sustituibles, o sea que la presunción de Arminton se mantiene. El gobierno mantiene un presupuesto balanceado en el país, y como el movimiento internacional del capital no está incluido en el modelo, la suma total del comercio también está balanceada.

Producción

Para los sectores que no incluyen uso de la tierra, se representa la producción como constante elasticidad de sustitución (CES) de la función del valor agregado de la aportación del capital y el trabajo, donde la elasticidad de sustitución puede variar entre 0 e infinito:

$$V = \phi [\delta_L(\sigma - 1)/\sigma + \delta_K(\sigma - 1)/\sigma]^{1/(\sigma-1)} \quad (1)$$

donde V = valor agregado, σ = elasticidad de la sustitución de la aportación, ϕ es un parámetro de la aportación, L es trabajo, K es capital, y los δ son parámetros compartidos definidos de manera que:

$$\delta_L, \delta_K > 0$$

$$\delta_L + \delta_K = 1.$$

Para los cuatro sectores que explícitamente usan la tierra como aportación, una aportación compuesta, Z , se define de modo que:

$$Z = [Y_1 K^{(\sigma_z-1)/\sigma_z} + Y_2 D^{(\sigma_z-1)/\sigma_z}]^{1/(\sigma_z-1)} \quad (2)$$

donde las Y 's son parámetros compartidos, σ_z es la elasticidad de sustitución encajada, y D representa la aportación de la tierra. La aportación compuesta Z reemplaza a K en la ecuación (1), cediendo a una función de producción CES encajada. El encajar las funciones permite a las elasticidades de sustitución variar entre las tres aportaciones primarias de producción.

Los rendimientos de las otras industrias productoras de bienes también entran en las especificaciones de producción - función como factores fijos componentes de la matriz nacional de insumos-rendimientos para los 13 bienes de producción.

Se presume que los productores tratan de obtener las máximas ganancias en un ambiente mercantil competitivo. Tratando los precios de rendimiento y los de los insumos como parámetros, la obtención de las máximas ganancias, basada en la tecnología de producción descrita, da como resultado la oferta de productos y convierte en factores las demandas de cada sector de producción y de cada factor de mercado del modelo.

Demanda

Los hogares están dotados de tierra, trabajo y capital que venden para financiar las compras de bienes y servicios domésticos o extranjeros, para ahorrar, o para pagar impuestos al gobierno. Un sistema preciso de demanda se especifica para cada una de las seis categorías de hogares (Tabla 2). La utilización de servicios públicos de parte de las familias se modela mediante la función:

$$U = U(P(X, L), F), \quad (3)$$

donde U es la utilización total de los servicios públicos, P es los servicios derivados del consumo de bienes y servicios, X (un vector de 13 dimensiones), y L es el tiempo libre. F es el consumo futuro, o los ahorros¹. Tanto $U(P, F)$ como $P(X, L)$ se toman como funciones de CES². La restricción de gastos de los consumidores puede escribirse como sigue:

$$\sum_{i=1}^{13} P_i X_i + TX + SA \leq \sum_{i=1}^3 F_i + TR, \quad (4)$$

donde P_i es el precio del consumo i th de bienes y servicios, X_i ; TX son los pagos de impuestos, SA es los ahorros, F_i es el ingreso proveniente de la dotación del factor i th, y TR es las transferencias de pago del gobierno. Llevando a su máximo la función encajada de utilización de servicios (3), con respecto a una restricción de los gastos (4), simultáneamente determina los niveles de consumo de 13 bienes y servicios, la cantidad de la oferta de trabajo, y el nivel de ahorros del consumidor.

Como los datos sobre gastos para las categorías de bienes de consumo no se igualan necesariamente a los bienes de producción, una matriz de transformación con un coeficiente fijo se usa para traducir la demanda de bienes y servicios del consumidor a las correspondientes demandas de bienes de producción. Las decisiones sobre ahorros también se traduce a un vector de demandas de inversión para los 13 bienes de producción usando una matriz con un coeficiente fijo de insumo - rendimiento³.

Gobierno

El sector del gobierno en el modelo se trata como un sector separado de una manera semejante al tratamiento en [1]. El sector del gobierno está modelado con una sanción de gastos semejante a las funciones de gastos de familia; por lo mismo, los ingresos derivados de los impuestos sobre la energía se gastan de acuerdo a la función de gastos. El gobierno también redistribuye los ingresos a través de transferencias de pago.

Los impuestos en el modelo están expresados *ad valorem*, e incluyen impuestos a la renta, al trabajo, al capital, a la propiedad, a la energía, y otros impuestos a las ventas y a la producción. Donde resulta aplicable, los impuestos están basados en tasas impositivas marginales. Para capturar el efecto de aliciente del sistema de impuestos, el impuesto marginal más alto se cobra sobre una base de ingresos relevante. En vista de que este sistema resulta en impuestos excesivos,

¹ Aunque el modelo es estático, el canje de los servicios públicos presentes y futuros está modelado para capturar las ramificaciones del periodo económico corriente (precio relativo y cambios de rendimiento) de las políticas que afectan los ahorros y las inversiones. Debe también notarse que la especificación de los servicios públicos presume implícitamente que los consumidores tienen expectativas miopes con respecto al futuro, ya que, con expectativas miopes, la tasa corriente de rendimiento del capital y otros precios corrientes son la única información que se necesita para tomar decisiones respecto al canje de los servicios públicos presentes y futuros.

² Estas son las presunciones usuales de forma funcional en la literatura de Shaven y Whalley [1, 13, 15, 26].

³ Porque en los balances presupuestarios del modelo los ahorros apenas igualan las inversiones.

la diferencia entre los ingresos generados por la tasa de impuesto marginal más alta y la tasa promedio de impuestos se devuelve a los consumidores como una suma global.

Comercio

El comercio exterior es el componente final del modelo. El rendimiento de 11 de los 13 sectores productivos puede ser tanto exportado como consumido domésticamente; los artículos extranjeros (importaciones mexicanas) están también delineados por sector de producción. Las listas de artículos importados dependiendo del precio se derivan de las estimaciones de elasticidad que se encuentran en la literatura. Como se anotó antes, los bienes producidos en el exterior y los producidos domésticamente se presume que son imperfectamente sustituibles.

Calibración y datos

El modelo está calibrado a 1988, año base para los datos. Diversos ajustes de los datos son necesarios para imponer una estructura de equilibrio general sobre la economía. Hemos seguido el procedimiento de calibración sugerido por Ballard *et al.* [1]. Para el lector interesado, las fuentes del proceso de calibración están completamente descritas allí. Los datos del año base (1988) se obtuvieron para lo siguiente: ingresos y gastos para cada una de las categorías de ingresos; la cantidad de importaciones y exportaciones de cada uno de los sectores comercializados; uso de la tierra, el trabajo y el capital de parte de cada uno de los sectores de producción, y su nivel de rendimiento; coeficientes para la matriz de transformación entre el rendimiento industrial y los bienes de consumo; inversión por sector, ingresos y gastos del gobierno.

Los datos sobre gastos de los consumidores en bienes terminados, por categoría de ingresos, provienen de la *Encuesta Nacional de Ingresos y Gasto de los Hogares 1988*, publicado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (I.N.E.G.I.). Los datos sobre Importaciones y Exportaciones provienen de *International Financial Statistics*, diversas ediciones, publicadas por el Fondo Monetario Internacional, y *The Mexican Economy 1993*, publicado por el Banco de México, y el *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*, publicado por I.N.E.G.I. Los datos sobre insumos, rendimientos y el uso de la tierra, el trabajo y el capital vienen de un cuadro sobre Insumos-Rendimiento proporcionada por el Instituto Nacional de Ecolofa - Dirección General de Investigación y Desarrollo, tanto como del *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. Estas mismas fuentes fueron usadas para calcular la matriz de transformación, así como para encontrar los niveles de inversión por sector. Los niveles y tasas de impuestos fueron obtenidos directamente de documentos provenientes de varias agencias del gobierno mexicano. Los datos sobre gastos de gobierno vienen de *El Ingreso y Gasto Público en México 1988*, de I.N.E.G.I. y de *The Mexican Economy 1993*. Las transferencias de gobierno proceden de *El Ingreso y Gasto Público en México 1988* y de *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de Hogares 1988*.

4. Beneficios ambientales

El aspecto ambiental del estudio se basó en un proyecto financiado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos y conducido por Viscusi [20]. La proyección se basó en una extensa revisión de los estudios sobre la relación costo-beneficio y en un análisis regulatorio generado del esfuerzo investigador federal asociado con el programa regulatorio de EPA [17, 18, 19, 20]. Las investigaciones realizadas por RFF [14] y el informe de NAPAP [7] se examinaron también. La información sobre daños ambientales asociados con emisiones de contaminantes fue destilada de estas fuentes e integrada en una base de datos unificada. Los estimativos de daños ambientales asociados con el uso de varios combustibles fósiles fueron entonces estimados usando una metodología respecto al alcance y a la metodología de este estudio.

Para derivar estimaciones sobre el ambiente, el estudio presumió que los daños marginales asociados con las emisiones de combustibles fósiles eran iguales a los daños promedio, y que los daños promedio eran constantes por unidad de emisión. La presunción de que los daños al ambiente eran lineales con respecto a las emisiones es obviamente una simplificación analítica, pero es consistente con las presunciones que guían el análisis regulatorio de la EPA, así como los limitados datos disponibles sobre la naturaleza de las relaciones envueltas en los daños al ambiente.

Se calcularon los beneficios totales, en pesos, de la reducción de la emisión de combustibles fósiles al nivel más bajo, después de los impuestos, para cada nivel de impuesto sobre el carbono que se consideraba. Debido a numerosas incertidumbres (por ejemplo en lo relativo a los efectos sobre la salud del sulfato proveniente de la quema del carbón de piedra, y la química de las emisiones de NO_x y los VOC's en la formación del smog) se generaron estimaciones altas y bajas para cada nivel de impuestos. Bajo la presunción de linealidad, los beneficios en pesos asociados con el cambio en las emisiones establecieron la unidad de daño por unidad de contaminación.

Las categorías de los factores externos considerados fueron bastante extensas (ver Cuadro 3). Para todas las fuentes de energía, se estimó el daño asociado con la emisión de partículas⁴. Las emisiones de óxido de sulfuro que resultan de las partículas de sulfato asociadas con los combustibles para motores y las fuentes estacionarias de combustión se incluyeron también⁵, así como los efectos de los contaminantes del aire sobre las concentraciones ambientales de ozono⁶. Los componentes finales del análisis de los daños incluyeron una evaluación de los factores externos de visibilidad, asociados principalmente con la emisiones de óxido de sulfuro provenientes de las plantas de energía eléctrica que funcionan con carbón de piedra⁷, y el nivel potencial de casos de cáncer asociado con las emisiones de vehículos a motor⁸.

Estas estimaciones de beneficio ambiental, por supuesto, están generadas fuera del marco del modelo CEG. Surge la pregunta: ¿Resulta el uso de estas estimaciones exógenas de beneficio ambiental en un sesgo que afecta los cálculos de los beneficios netos? Tomando en cuenta el aspecto de la producción dentro de la economía, los daños ambientales pueden ser considerados como costos fijos si los daños externos entraron en las funciones totales de gastos independientemente de sus propios niveles de producción. En este caso, las firmas elegirían sus niveles de rendimiento independientemente de los daños causados por la contaminación, y los costos ambientales podrían ser computados exógenamente (como pérdidas firmes). Una presunción semejante de separabilidad dentro de la demanda (que la contaminación es independiente de los niveles de consumo de los otros artículos de consumo) permitiría que los daños causados en los hogares por la contaminación sean calculados exógenamente. Estas presunciones, sin embargo implican formas funcionales específicas que pueden no ser válidas como regla general y pueden conducir a resultados sesgados.

Considerar que los costos de la contaminación y los daños que produce son directamente endógenos dentro del marco del modelo es una opción alternativa. La investigación en esta área sólo ha comenzado recientemente [13]. Considerar endógenos a los daños ambientales tiene la ventaja de dar consistencia a los cálculos. Sin embargo, se presentan grandes problemas empíricos respecto a la especificación numérica de parámetros para las funciones de costos y servicios públicos y a la precisión de las estimaciones de daños ambientales (Piggot *et al.* [13]). En vista de estos problemas empíricos, basar el análisis en estimaciones exógenas es un enfoque metodológico razonable, aunque imperfecto. Se necesitan investigaciones adicionales

⁴ Esta estimación se derivó de datos contenidos en [17].

⁵ Derivada de datos contenidos en [18].

⁶ Derivada de datos contenidos en [18].

⁷ Derivada de datos contenidos en [7].

⁸ Derivada de datos contenidos en [9].

para establecer una mejor base para la incorporación de los daños ambientales dentro del marco del modelo.

5. Simulaciones de política

Dentro del contexto del Modelo CEG mexicano y de las estimaciones de la EPA sobre daños ambientales que se describen más arriba, la simulación de una política "sin arrepentimientos" de impuestos sobre el carbono es una cuestión que no ofrece dificultades. Inicialmente se hace funcionar el modelo CEG bajo las tasas de impuestos que prevalecieron en realidad durante el año base de 1988. Esto se hace para ver si el modelo puede reproducir el nivel real de actividad económica que ocurrió en cada sector durante ese año. Ese fue en verdad el caso, y las cantidades y precios para cada uno de los sectores de producción del modelo se presentan en el Cuadro IV. El Cuadro V da los números correspondientes a cada uno de los sectores de consumo del modelo, y el Cuadro VI presenta diversas categorías de bienestar económico para cada agente (inclusive el gobierno). El Cuadro VII entonces presenta las emisiones de CO₂ de petróleo y carbón de piedra para 1988 junto con los correspondientes daños ambientales (calculados a base del coeficiente de la EPA que se presenta en la sección precedente).

El modelo CEG se puso nuevamente en operación bajo una variedad de diferentes posibilidades de impuestos. Presumiendo que el petróleo y el carbón de piedra entran en las funciones de producción de todos los sectores de rendimiento como insumos fijos (ver Leontief) pusimos un impuesto *ad valorem* sobre los combustibles fósiles, y comparamos los resultados de la simulación con los del año base. Al hacerlo, pudimos entonces calcular el impacto de tal impuesto sobre el uso de los combustibles fósiles, el bienestar de los consumidores, y las recaudaciones del gobierno de México.

El carbón de piedra se sujetó siempre a una tasa impositiva que era aproximadamente el doble de la del petróleo, para reflejar así su contenido relativamente alto de carbono. Más aún, los impuestos sobre la energía se aplicaron tanto sobre los productores domésticos de energía como sobre los importadores de energía, obteniendo de facto un impuesto de amplia base sobre el consumo de combustibles fósiles. Se puso a los productores primarios un impuesto basado en la presunción de que los costos de transacción de la administración de impuestos sería relativamente bajo debido al relativamente pequeño número de productores en la industria. Se incluyeron impuestos sobre las importaciones por dos razones: (1) Si no se crearan impuestos sobre las importaciones, la demanda de energía se dirigiría de los productores domésticos a los importadores, lo que sería injusto para los productores domésticos, y (2) el incremento de las importaciones tendría el efecto lateral, no deseado, de aumentar los precios mundiales de energía y producción de combustibles en otros lugares del mundo, contrabalanceando parcialmente la meta de la política, que es reducir las emisiones mundiales de CO₂.

Las simulaciones envolvieron la creación de impuestos a niveles sucesivamente más altos, y registrar los diversos impactos de esta operación sobre la economía mexicana. Los efectos de las políticas impositivas sobre el consumo de energía se tradujeron en beneficios ambientales usando las cifras de costos ambientales del Cuadro VII. El ejercicio entero se repitió entonces, presumiendo que la energía era un insumo variable de la producción como parte de un análisis de "sensibilidad," y al hacerlo nos fue posible determinar el nivel "sin arrepentimiento" de los impuestos sobre una amplia escala de presunciones alternativas respecto a las posibilidad de sustitución de los factores.

6. Resultados empíricos

El cuadro VIII presenta los costos de la eficiencia económica y las correspondientes ganancias en beneficios ambientales que resultan de una amplia escala de tasas impositivas *ad valorem* sobre el carbón de piedra y el petróleo. Como puede verse allí, estas tasas van del 5% al 100% sobre el carbón de piedra y del 2.5% al 50% sobre el petróleo. Tomando en cuenta el hecho

de que las estimaciones de costo y de daños están sujetas a una gran incertidumbre, los costos económicos de eficiencia se presentan en relación tanto con el caso en que la energía entra en la producción como un insumo fijo (que en adelante se mencionará como el caso de baja posibilidad de sustitución (LS)), y el caso en que la energía entra en la producción como un insumo variable (que en adelante se mencionará como el caso de alta posibilidad de sustitución (HS)). Además, por cada caso que se ha considerado, los beneficios ambientales están calculados mediante el uso tanto de las cifras de costos bajos y altos de factores externos derivadas de Viscusi [20]. Finalmente, se presenta la reducción de las emisiones de CO₂ para cada nivel de uso de energía.

Los resultados de este ejercicio son reveladores. Volviéndonos primero a las cifras sobre pérdidas de bienestar económico, encontramos que tales pérdidas son más bajas en el caso HS que en el caso LS para cualquier nivel dado de impuestos sobre energía. Esto refleja el hecho de que cuando el costo económico de este impuesto es menor, las firmas pueden más fácilmente sustituir tierra, trabajo y capital por energía. En ambos casos, los costos del bienestar económico son relativamente modestos al principio y aumentan de una manera lineal. Cuando la tasa impositiva aumenta a niveles extremadamente altos (por ejemplo 50% sobre el petróleo y 100% sobre el carbón de piedra) los costos son altos y aumentan en forma exponencial. Esto refleja el hecho de que los precios de energía extremadamente altos estorbarán mucho la producción a través de toda la economía y reducirán severamente las compras de los consumidores domésticos.

Volviéndonos luego a los beneficios económicos de un impuesto sobre la energía, vemos que estos beneficios son sustancialmente más grandes en el caso HS. Esto es debido a que el consumo de carbón de piedra y de petróleo se reduce más cuando otros factores de producción pueden sustituirlo. Debe también notarse que en todos los casos las estimaciones bajas y altas se diferencian en un gran orden de magnitud. Esto sirve para subrayar la gran cantidad de incertidumbre que está conectada con el cálculo de los daños ambientales debidos a la contaminación del aire. Estas incertidumbres hacen difícil estimar tanto el nivel "óptimo," como el nivel "sin arrepentimiento" de los impuestos sobre la energía. En verdad, bajo la estimación de bajo daño ambiental no se necesita ningún impuesto adicional sobre la energía tanto en el caso LS como en el caso HS. Bajo la estimación de alto daño ambiental, en contraste, nuestras cifras sugieren que en el caso LS tanto el nivel "óptimo" como el nivel "sin arrepentimiento" ocurren cuando hay impuestos adicionales sobre el petróleo de 25% a 50% e impuestos adicionales sobre el carbón de piedra de 50% a 100%. Además, en el caso HS tanto el nivel "óptimo" como el nivel "sin arrepentimiento" de las emisiones ahora implican aumentos de mucho más de 100% de todos los impuestos sobre energía.

Tal vez la mejor estrategia sería tomar el punto medio de las estimaciones altas y bajas de daños ambientales y usar esta "mejor conjetura" de los daños ambientales para calcular los niveles "óptimo" y "sin arrepentimiento" de los impuestos sobre la energía. En esta forma, los resultados LS sugieren que un aumento "óptimo" de los impuestos sobre el petróleo estaría entre el 7.5% y el 10%, en tanto que un aumento "sin arrepentimiento" de los impuestos sobre el petróleo estaría entre el 10% y el 12.5%. En el caso HS, el aumento "óptimo" de impuestos sobre el petróleo estaría en el 25%, en tanto que el nivel "sin arrepentimientos" estaría alrededor del 50%. En todos los casos, por supuesto, el impuesto sobre el carbón de piedra sería el doble que el del petróleo.

7. Conclusiones e implicaciones para la política

Un desarrollo importante que emergió de la reunión de 1992 en Río de Janeiro fue la dedicación de parte de la mayoría de los participantes al concepto de "desarrollo sostenible." En verdad, este concepto ha sido abrazado por la mayoría de los países de la comunidad internacional, y es una de las metas principales de la Organización Mundial de Comercio (OMC), recientemente creada. Dos de las metas primarias del "desarrollo sostenible" son (1) reducir las emisiones de CO₂, a las que se ha atribuido responsabilidad por el "Calentamiento Mundial," y (2) conservar la energía para evitar la terminación de las reservas de combustibles fósiles.

Las simulaciones sobre las que versa el presente estudio han confirmado que, probablemente, los precios de los combustibles fósiles en México son demasiado bajos, y que la creación de impuestos de amplia base sobre estas formas de energía está justificada hoy. Como se explicó al comienzo, México haría bien en adoptar una política de impuestos "sin arrepentimiento," mediante la cual aumentarían las recaudaciones a través de un impuesto sobre la energía y se obtendría una recaudación más baja a través del impuesto al valor agregado. Nuestros resultados sugieren que un impuesto de alrededor del 10% al 20% sobre el petróleo y del 20% al 40% sobre el carbón de piedra generaría ahorros ambientales que compensarían en forma más que suficiente las pérdidas de bienestar causadas por las distorsiones económicas asociadas. Al mismo tiempo, las emisiones mexicanas de CO₂ se reducirían notablemente, y México podría cumplir con sus compromisos internacionales de buscar el "desarrollo sostenible" en la manera menos dolorosa posible.

Cuadro I
Sectores de Producción

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1. Manufacturas | 8. Ganadería |
| 2. Minas de Carbón | 9. Forestería |
| 3. Otras Minas | 10. Agricultura |
| 4. Servicios | 11. Electricidad |
| 5. Productos químicos | 12. Pesca |
| 6. Petróleo | 13. Procesamiento de alimentos |
| 7. Finanzas/Bienes raíces | |

Cuadro II
Sectores de Consumo

- | | |
|-------------------------------------|------------------------|
| 1. No durables | 8. Vehículos a motor |
| 2. Gasolina | 9. Alcohol y Tabaco |
| 3. Muebles y Electro-
domésticos | 10. Transporte |
| 4. Lectura y Descanso | 11. Ahorros |
| 5. Servicios | 12. Servicios Públicos |
| 6. Servicios Financieros | 13. Alimentación |
| 7. Vestidos y joyas | 14. Vivienda |

Cuadro III
Categoría de Contaminación

Plomo
Partículas
Oxidos de Sulfuro, Excluyendo SO₄, Mortalidad
SO₄, Mortalidad
Ozono
Visibilidad
Aire Tóxico de Automóviles

Cuadro IV
Rendimiento de Todos los Sectores de Producción
en el año base
(Billones de Nuevos Pesos)

	Rendimiento	Precio
1. Manufacturas	244.50	1.0000
2. Minas de carbón	.9877	1.0000
3. Otras Minas	9.6045	1.0000
4. Servicios	296.671	1.0000
5. Petroquímicos	14.7696	1.0000
6. Petróleo	31.5834	1.0000
7. Finanzas/Bienes raíces	9.95982	1.0000
8. Ganadería	18.6052	1.0000
9. Forestería	1.9418	1.0000
10. Agricultura	23.2455	1.0000
11. Electricidad	7.0144	1.0000
12. Pesca	1.5887	1.0000
13. Procesamiento de alimentos	60.9141	1.0000

Cuadro V
Rendimiento de todos los Sectores
En el año base
(Billones de Nuevos Pesos)

	Cantidad	Precio
1. No durables	10.6434	1.0000
2. Gasolina	12.7619	1.0000
3. Muebles y Electrodomésticos	12.5116	1.0000
4. Lectura y descanso	4.5141	1.0000
5. Servicios	51.0824	1.0000
6. Servicios Financieros	1.3317	1.0000
7. Vestidos y joyas	24.9149	1.0000
8. Vehículos a motor	23.1617	1.0000
9. Alcohol y Tabaco	4.7437	1.0000
10. Transporte	14.0997	1.0000
11. Ahorros	52.1468	1.0000
12. Servicios Públicos	4.8481	1.0000
13. Alimentación	121.411	1.0000
14. Vivienda	103.336	1.0000

Cuadro VI

Bienestar de Agentes Domésticos
(Billones de Nuevos Pesos)

	Bienestar Económico
Agente 1	10.4895
Agente 2	24.2842
Agente 3	154.4940
Agente 4	261.9680
Total	451.2357
Gobierno	94.6749

Nota - Agente 1 - el más bajo Nivel de Ingresos
 Agente 2 - 2do Nivel de Ingresos
 Agente 3 - 3er - 6to Nivel de Ingresos
 Agente 4 - 7mo - 10 Nivel de Ingresos

Cuadro VII

Parámetros de Daño Ambiental

Estimación baja

	Daño en Pesos Por Quad	Quad total	Total de da nos en pesos
Carbón de piedra	9.75E + 08	0.987	9.6233E +08
Petróleo	3.93E + 08	9.75	3.8318E + 09

Estimación alta

	Daño en Pesos por Quad	Quad Total	Total de Daños en Pesos
Carbón de Piedra	1.635E + 10	0.987	1.61375E +10
Petróleo	5.1E + 9	9.75	4.9725E + 10

Cuadro VIII
(Billones de Nuevos Pesos)
Caso 1 LS

Tasa(s) de Impuesto		Costo de emisiones de eficiencia	Beneficio		Cambio en CO ₂ (Billones de Tons)
Ambiental Carbón	Petróleo		Baja estimación	Alta estimación	
		\$	\$	\$	
5%	2.5%	-.407	.081	1.01	-.020
10%	5%	-.838	.156	2.146	-.040
15%	7.5%	-1.295	.331	4.48	-.086
20%	10%	-1.783	.312	4.305	-.078
25%	12.5%	-2.304	.391	5.401	-.101
50%	25%	-5.6821	.792	10.933	-.218
100%	50%	-100.1608	1.641	24.630	-.288

Caso 2 HS

Tasa(s) de Impuesto		Costo de eficiencia	Beneficio Ambiental		Cambio de emisiones de CO ₂ Billones de Tons
Carbón	Petróleo		Baja estimación	Alta estimación	
		\$	\$	\$	
5%	2.5%	-.401	.230	3.32	-.048
105%	5%	-.818	.461	6.57	-.095
15%	7.5%	-1.252	.685	9.76	-.142
20%	10%	-1.702	.906	12.89	-.188
25%	12.5%	-2.172	1.123	15.96	-.234
50%	25%	-4.927	2.156	30.40	-.458
100%	50%	-12.221	3.962	55.10	-.878

APENDICE

Modelo Empírico

I. Equilibrio Total por Sector

$$(1) Y_j + GE_j + UM_i = \sum_l RAS_{jl} + GD_j + CD_j + UX_j + INV_j$$

$$(2) \sum_c SL_c = \sum_j DL_j + GDL$$

$$(3) \sum_c SK_c = \sum_j DK_j + GDK$$

$$(4) \sum_c SD_c = \sum_j DD_j + GDD$$

donde

$$(5) GDL = \sum_j TL_j$$

$$(6) GDK = \sum_j TK_j$$

$$(7) GDD = \sum_j TD_j$$

II. Bienes de Consumo y Servicios

$$(8) CD_j = \sum_i Z_{ji} [GCE_j - TC_j]$$

$$(9) \sum_c RCS_{ic} = GCE_j$$

$$(10) E_j RCS_{ic} = SL_c + SK_c + SD_c + TRN_c - PIT_c$$

$$(11) GC_c = \sum_j RCS_{ic} - SAV_c + (1 - TAU_c)(ZTA_c - 1)SL_c$$

$$(12) GC_c = SL_c + SK_c + SD_c + TRN_c - PIT_c + (1 - TAU_c)(ZTA_c - 1)SL_c$$

$$(13) TE = \sum_c (SL_c ZTA_c TAU_c + SK_c + TAU_c - (\phi_c + TRN))$$

donde

$$\phi_c = SL_c TAU_c + SK_c TAU_c + SD_c TAU_c - PIT_c$$

III. Balance del sector exterior

$$(14) \sum_k (UM_k (EM_k / (1 + EM_k))) = \sum_k (UX_k + FE_k)$$

IV. Consistencia

$$(15) \sum_c (SL_c + SK_c + SD_c + TRN_c - PIT_c - Tc_c) = \sum_c CG_c$$

(El ingreso por hogar es igual a los gastos por hogar.)

$$(16) \sum_j (GSK_j + GE_j + TL_j + TK_j + TD_j + TXO_j) + GTL = \sum_c TRN + \sum_j (GDK_j + G_j) + GD_c$$

(El ingreso del gobierno más las dotaciones es igual a los desembolsos.)

$$(17) \sum_j (UM_j - UX_j) = 0$$

(Las exportaciones netas son igual a 0.)

$$(18) \sum_j (CD_j + GD_j + UX_j - GE_j - UM_j) = \sum_j (DL_j + DK_j + TL_j + TK_j + TXO_j)$$

V. Definiciones Variables

- Y_j Producción total en la sección j ($j = 1, 2, \dots, 13$)
 CD_j Demanda del consumidor por el producto j
 GE_j Dotación gubernamental del producto j
 UM_k Importaciones del producto k ($k = 1, 2, \dots, 11$)
 $ELRAS_{jL}$ Demandas intermedias de Insumo/rendimiento: Balance *RAS*
 GD_j Demanda gubernamental del producto j INV_j Inversión en el sector j
 UX_k Exportaciones del producto k
 SL_c Oferta de trabajo por hogar c ($c = 1, 2, \dots, 4$)
 SK_c Oferta de capital por hogar c
 SD_c Oferta de tierra por hogar c
 DL_j Demanda de trabajo en la industria
 DK_j Demanda de capital en la industria j
 DD_j Demanda de tierra en la industria j
 GDL Demanda gubernamental de trabajo
 GDD Demanda gubernamental de tierra
 TL_j Impuestos al trabajo en la industria j
 TK_j Impuesto al capital en la industria j
 TD_j Impuesto a la tierra en la industria j
 GCE_j Demanda de los consumidores por product de consumo I ($I = 1, 2, \dots, 14$)
 Z_{ji} Una matriz de transformación de 14 por 14
 RCS_{ic} Matriz de la demanda de cada hogar para cada artículo de consumo: balance *RAS*
 TC_j Gravamen sobre artículo de consumo j
 TRN_c Transferencia de pago al hogar c
 PIT_c Pago del impuesto a la renta del hogar c
 TAU_c Tasa marginal de impuesto a la renta para el hogar c
 SAV_c Ahorros del hogar c
 GC_c Consumo total del hogar c
 ZTA Coeficiente de consumo más ocio
 TE Dotaciones gubernamentales totales
 EM_k Elasticidad de la demanda de las exportaciones
 FE_k Sector de dotación/demanda de elasticidad ajustada de la demanda de las exportaciones
 GSK_j Dotación gubernamental de capital en la industria j
 GDK_j Demanda gubernamental de capital en la industria j
 GTL Impuestos a la renta del gobierno sobre sus propios empleados
 TXO_j Impuesto gubernamental sobre el rendimiento en la industria j
 TC_c Impuestos al consumo sobre el hogar c
 CG_c Consumo total del gobierno por hogar c

REFERENCES

1. Ballard, C. L., D. Fullerton, J. B. Shoven, y J. Whalley, 1984. A General Equilibrium Model for Tax Policy Evaluation, University Chicago Press, Chicago.
2. Bergnan L., 1993. General Equilibrium effects of environmental policy: A CGE-modeling approach, *Environ. Resource. Econom.* 1, 43-61
3. Borgess, A. M. y I. H. Goulder, 1988. Decomposing the impact of higher energy prices on long-term growth, en "Applied General Equilibrium Analysis" (H.E. Scarf and J.B. Shoven, Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge.
4. Boyd, R. y K. Krutilla, 1992. Controlling acid deposition: A general equilibrium assessment, *Environ. Resource. Econom.* 2.307-322 (1992).
5. Hozilla, M. y R. Kopp, 1990. Social cost of environmental quality regulations: A general

- equilibrium analysis, *J. Poli. Econom.* 98, 853-873.
6. Koomey, J. G., C. Atkinson, A. Meier, J. E. McMathon, S. Boghosian, B. Alkinson, I. Turuerl, M. D. Levine, B. Nordman, y P. Chan, 1991. The Potential for Electricity Efficiency Improvements in the U.S. Residential Sector, Lawrence Berkeley Laboratory.
 7. National Acid Precipitation Program, 1990. "National Ace Precipitation Program Report to the President and Congress," Washington, DC.
 8. National Academy of Sciences, National Academy of Engineering and Institute for Medicine, 1991. "Policy Implications of Greenhouse Warming," Washington, DC.
 9. Nordhaus, W. D., 1992. An optimal transition path for controlling greenhouse gases, *Science*, 58, 1315-1319.
 10. Nordhau, W. D., 1993. The Cost of Slowing Climative Change: A Survey, *Energy* 12, 37-65
 11. Office of Technology Assessment, 1993. U.S. Congress, "Industrial Energy Efficiency".
 12. Farce, A. P., R. Zeimber y J. J. Canti, 1993. "Reducing Carbon Emissions through Utility Demand-Side Management Programs." Prepared for 68th Annual WEA International Conference, Lake Tahas, CA.
 13. Piggot, J., J. Whalley, y R. Wigle, 1992. International linkages and carbon reduction initiatives, en "The Greening of World Trade Issues" (K. Anderson y R. Blackhurst, Eds). University of Michigan Press, Ann Arbor.
 14. Resources for the Future, 1988. "The Health and Agricultural Benefits of Reduction in Ambient Ozone in the United States" .
 15. Shoven, J. B. y J. Whalley, 1984. Applied general equilibrium models of taxation and international trade: An introduction and survey, *J. Econom. Lit.* 22, 281-322.
 16. Shoven, J. y R. Wigle, 1991. Cutting CO₂ emissions: The effects of alternative policy approaches, *Energy J.* 12, 109-124.
 17. U. S. EPA, 1986. Strategies and Air Standards Division, Regulatory Impact Analysis of the NAAOS for PM. Second Addendum".
 18. U. S. EPA, 1988. Office of Air and Radiation, "Regulatory Impact Analysis of NAAOS for Sulfur Oxide (Sulfur Dioxide), Draft Report.
 19. U. S. EPA, 1987. Office of Mobile Sources, "Air Toxic Emissions from Motor Vehicles".
 20. Viscusi, W. K., W. A. Magal, y A. Carlin, 1992. "The Full Social Energy Pricing Approach to Greenhouse Warming Policy," Report to the U.S. EPA.

Los efectos del ingreso y la inflación en la demanda de gasolina en México: estimaciones preliminares

LUIS MIGUEL GALINDO P.

Dirección de Economía Ambiental, Dirección General de Planeación Ecológica, Instituto Nacional del Consumidor

ABSTRACT

The main objective of this essay is to analyse the effects of the level of activity and the inflation rate on the demand for gasolines in Mexico. The main results indicate that there is a stable and long term relationship between the demand for gasolines and the level of activity and the inflation rate. The income elasticity is positive while the inflation rate elasticity is negative. All these results show that it is possible to specify an adequate econometric model, with satisfactory statistical properties, using only income and the inflation rate to simulate the behaviour of the real data. This econometric model is a just a preliminary version because it does not include the effects of the price index and the relative prices.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es analizar los efectos del nivel de actividad y la inflación en la demanda de gasolinas en México. Los principales resultados indican que existe una relación estable de largo plazo entre la demanda de gasolinas totales con el nivel de actividad y la inflación. La elasticidad ingreso es positiva mientras que la elasticidad con respecto a la inflación es negativa. Los resultados obtenidos indican asimismo que es posible especificar un modelo econométrico con propiedades estadísticas satisfactorias que simule adecuadamente el comportamiento de la demanda de gasolinas reales incluyendo exclusivamente los efectos del nivel de ingreso y la inflación. El modelo es sólo una versión preliminar que excluye los efectos de los precios relativos o el índice de precios.

Introducción¹

La emisión de contaminantes asociada al consumo de gasolinas ha alcanzado en algunas áreas del país niveles alarmantes. Esto ha conducido a la realización de diversos estudios para analizar las principales causas y consecuencias económicas del nivel y la tasas de crecimiento de la demanda de gasolinas (Romero 1993).

La teoría económica convencional considera que la demanda de cualquier mercancía depende en lo fundamental del nivel de ingreso o restricción presupuestal y de los precios relativos y absolutos (Varian, 1984 y Deaton y Muellbauer, 1980). No obstante, existen diversas hipótesis sobre los efectos de las diferentes variables económicas en el consumo de las gasolinas. Este trabajo tiene como objetivo centrarse en el análisis de las elasticidades del ingreso y la relevancia de la inflación como factores para determinar el consumo interno de las gasolinas. El trabajo se basa en el análisis del orden de integración de las series y la existencia de vectores de cointegración obtenidos a través del procedimiento de Johansen (Johansen 1988).

Este ensayo se divide en tres secciones. En la primera sección se presenta una síntesis del marco teórico del trabajo. En la segunda sección se incluyen los principales resultados econométricos. Finalmente, en la última sección se resumen algunas conclusiones y se comentan algunos de los resultados obtenidos.

Las estimaciones realizadas en este trabajo tienen sólo un carácter preliminar. La deficiencia principal del trabajo es la exclusión inicial del índice de precios o de los precios relativos para medir los efectos de sustitución o complementariedad con otros bienes.

¹ Agradezco los comentarios de Francisco Giner, Juan Carlos Belaustegigoitia, Eduardo Vega, Hugo Contreras, Carlos Gay y Lilia Domínguez. Desde luego, los errores son exclusivamente mi responsabilidad

1. Marco teórico

La teoría económica convencional considera que el consumo es una función de las preferencias de los individuos sujetos a una determinada restricción presupuestal. En ese sentido, el consumo de cualquier mercancía se asume como determinado por el nivel de gasto y el índice de precios, en donde esta última variable incluye los efectos de los precios relativos. En términos formales las demandas marshallianas pueden escribirse como: (Deaton y Muellbauer, 1980).

$$q_i = f(y, p) \quad (1)$$

sujeto a la siguiente restricción presupuestal:

$$y = \sum p_i q_i \quad (2)$$

donde q representa el consumo del bien i , y el nivel de gasto total de los agentes económicos, p el índice de precios. Substituyendo la ecuación (1) en (2) indica una restricción directa² a las funciones de demanda:

$$\sum p_i f(y, p) = y \quad (3)$$

Asimismo, se asume normalmente que las funciones de demanda son lineales y homogéneas de grado cero con respecto al gasto y al índice de precios³

$$f(\phi y, \phi p) = f(y, p) \quad (4)$$

Deaton y Muellbauer (1980) señalan que definiendo a las proporciones del ingreso como $w_i = p_i q_i / y$ entonces puede definirse a las elasticidades del gasto y del índice de precios como: (Deaton y Muellbauer, 1980).

$$e_i = \partial \log q_i(y, p) / \partial \log y \quad (5)$$

$$e_{ij} = \partial \log q_i(y, p) / \partial \log p_j \quad (6)$$

Donde los elementos de la diagonal de la ecuación (6) proporcionan las elasticidades precio propias y los elementos fuera de la diagonal son las elasticidades cruzadas. Las ecuaciones (5) y (6) permiten representar las restricciones básicas de la teoría de la demanda como: (Deaton y Muellbauer, 1980).

$$\sum w_k e_i = 1 \quad \sum w_k e_{ki} + w_i = 0 \quad \sum e_{ik} + e_i = 0 \quad (7)$$

Bajo estas condiciones, la especificación econométrica más utilizada en el análisis económico aplicado se define como: (Deaton y Muellbauer, 1980)

$$\log q_i = \beta_0 + e_i \log y + \sum e_{ik} \log p_k + u_i \quad (8)$$

Sin embargo, la estimación de la ecuación (8) presenta algunos problemas desde el punto de vista econométrico. En primer lugar, la estimación de la ecuación (8) está sujeta a la crítica de

² Esta restricción se conoce en la literatura económica como "the adding-up restriction"

³ Esta condición se conoce como la ausencia de ilusión monetaria.

regresión espuria (Granger y Newbold, 1974). Esto es, todas las variables en esta ecuación muestran cierta tendencia a crecer con el tiempo. De este modo, cualquier estimación por mínimos cuadrados ordinarios obtendrá altos coeficientes de correlación y coeficientes estadísticamente significativos. En segundo lugar, la estimación con variables que no son estacionarias presenta el problema de si las propiedades estadísticas de las series están adecuadamente representadas por una media y una varianza que tiende a modificarse en el tiempo (Spanos, 1986). En tercer lugar, los estimadores obtenidos por mínimos cuadrados ordinarios pueden ser sesgados en el caso en que el conjunto de las variables incluidas sean aleatorias (Spanos, 1986). El último problema está asociado al uso del procedimiento Johansen y el orden de integración de las series. Las pruebas de orden de integración sugieren que la demanda de gasolinas totales y el nivel de actividad es $I(1)$ sin embargo el índice de precios es $I(2)$ y la inflación $I(1)$. De este modo, la estimación de la ecuación (3) utilizando el procedimiento de Johansen produce un espacio de vectores mayor que uno. Ello implica que cualquier combinación de estos vectores es también una posible solución (Wickens, 1993) y que exista por tanto un problema en la interpretación de los coeficientes de los vectores de cointegración.

Con objeto de solucionar los problemas asociados al orden de integración de las series puede procederse a estimar una función en primeras diferencias que en nuestro caso corresponde a estimar la tasa de crecimiento de la demanda de gasolina. Esta solución sin embargo presenta el problema de que pierde la información asociada a las variables en niveles. La solución seleccionada en este trabajo consistió en utilizar un modelo de corrección de errores (Engle y Granger, 1987) estimado a través del procedimiento de Johansen para el nivel de ingreso y la inflación. Este modelo proporciona también información sobre la condición de homogeneidad.

Las ventajas del modelo de corrección de errores puede observarse asumiendo que la demanda de gasolinas puede aproximarse por la ecuación (9). Esta ecuación puede representarse como las ecuaciones (10) o (11) dependiendo de las restricciones que se impongan (Cuadro 1). Sin embargo, cada una de estas ecuaciones contiene diferentes problemas a considerar. La ecuación (10) proporciona información sobre la situación de equilibrio de las variables pero está sujeta a la crítica de regresión espuria. Por el contrario, la ecuación (11) no está sujeta a al crítica de regresión espuria o al sesgo de los estimadores pero pierde la información proporcionada por las variables en niveles:

$$Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + \beta_1 X_t + \beta_2 X_{t-1} + e_t \quad (9)$$

CUADRO 1: RESTRICCIONES EN LA ECUACIÓN (9):

ECUACIÓN	RESTRICCIÓN	SOLUCIÓN
(10) $Y_t = \beta_1 X_t + e_t$	$\alpha_1 = \beta_2 = 0$	EQUILIBRIO
(11) $\Delta Y_t = \beta_1 \Delta X_t + e_t$	$\alpha_1 = 1 \quad \beta_1 = -\beta_2$	DINÁMICA

Una solución a estos problemas puede obtenerse considerando el siguiente caso. La ecuación (9) puede reparametrizarse restando t_{t-1} en ambos lados y sumando $\beta_1[X_t - X_{t-1}]$ en el lado izquierdo:

$$\Delta Y_t = (\alpha_1 - 1)Y_{t-1} + \beta_1 \Delta X_t + (\beta_1 + \beta_2)X_{t-1} + e_t \quad (12)$$

Esta ecuación puede ser reparametrizada como la ecuación (13) en el caso en que los datos admitan imponer las restricciones sintetizadas en el cuadro 2. El segundo término de la ecuación

(13) se le conoce como el mecanismo de corrección de errores. El objeto de este término es el de corregir los desequilibrios que se generan en el período anterior. Esto es, (α_1) es menor que uno para garantizar condiciones de estabilidad del modelo por lo que $(\alpha_1 - 1)$ es negativo. El efecto de este término es entonces evidente. Cuando X_t es mayor que Y_t entonces el valor negativo del $(\alpha_1 - 1)$ hace que el efecto total del mecanismo de corrección de errores sobre ΔY_t sea positivo. Ello produce que Y_t se incremente en el período actual. Por el contrario, cuando Y_t es mayor que X_t entonces el efecto total de este término es negativo sobre ΔY_t reduciendo entonces su ritmo de crecimiento.

$$\Delta Y_t = \beta_1 \Delta X_t + (\alpha_1 - 1)(Y - X)_{t-1} + e_t \quad (13)$$

CUADRO 2: RESTRICCIONES EN LA ECUACIÓN (12):

$$(\alpha_1 - 1) = -(\beta_1 + \beta_2)$$

$$(\alpha_1 + \beta_1 + \beta_2) = 1$$

La ecuación (13) presenta varias ventajas sobre las ecuaciones (10) y (11). Todos sus términos son estacionarios $I(0)$. Ello permite que esta ecuación esté libre de la crítica de regresión espuria pero que simultáneamente no pierda la información proporcionada por las variables en niveles o solución de equilibrio.

Sin embargo, desde el punto de vista de la teoría económica existe un problema adicional por el uso de series $I(0)$. Davinson, Hendry, Srba y Yeo (1978) estimaron una función consumo determinada por el ingreso en el largo plazo. Sin embargo, Deaton (1977) y posteriormente Hendry y Ungern-Sternberg (1981) encontraron evidencia empírica de que la inflación afecta negativamente al consumo total². Cabe asimismo argumentar que en economías con una mayor inestabilidad la ilusión monetaria representa un factor importante sobre la determinación del consumo.

Atendiendo a estas consideraciones se procedió a realizar unas estimaciones preliminares utilizando el procedimiento de Johnsen y un modelo de corrección de errores para simular el comportamiento de la demanda de gasolinas totales en México. Las variables explicativas son el nivel de ingreso y la inflación.

Resultados econométricos

La información utilizada son datos mensuales del volumen consumido interno total de gasolinas, el índice de producción industrial y la inflación definida como la primera diferencia del índice de precios al consumidor. Todas las variables se usaron en logaritmos.

El Cuadro 3 resume las pruebas de orden de integración de la series. La prueba de Dickey Fuller y Dickey Fuller Aumentada (Dickey y Fuller, 1981) señalan que la demanda de gasolinas totales, magna sin, el índice de producción industrial y la inflación son series no estacionarias de orden $I(1)$. Estos resultados permitieron utilizar la prueba de Johansen con variables del

² En otro contexto pero con resultados similares sobre el efecto de la inflación en la demanda de dinero puede citarse al trabajo de Cagan (1956).

mismo orden de integración. Ello conduce a utilizar la inflación en vez del índice de precios provisionalmente.

CUADRO 1: ORDEN DE INTEGRACIÓN DE LAS SERIES.

VARIABLE	DF	ADF
gt	.50[.616]	.71[.482]
Δ gt	-9.90[.000]	-8.19[.000]
gms	4.33[.000]	4.69[.053]
Δ gms	-5.05[.000]	-2.66[.012]
y	.43[.664]	.62[.539]
Δ y	-7.86[.000]	-5.94[.007]
p	16.76[.000]	2.85[.340]
Δ p	-1.18[.243]	-.96[.340]
$\Delta\Delta$ p	-5.34[.000]	-5.92[.000]

DF=Dickey Fuller. ADF=Dickey Fuller Aumentada.

[...]=valores p.

1.1) La demanda de gasolinas totales

El análisis de vectores de cointegración obtenidos a través del procedimiento de Johansen indican la existencia de una relación estable de largo plazo entre la demanda de gasolinas totales, el nivel de ingreso y la inflación (véase cuadro 3). Los resultados indican la existencia de un sólo vector de cointegración que tiene además coeficientes con sentido económico.

CUADRO 3: PRUEBAS DE COINTEGRACION BASADAS EN EL PROCEDIMIENTO DE JOHANSEN:

Número de rezagos en el VAR=4.

Lista de las variables

gt y Δp

Muestra: 1992m1-1994m12 N=31 Número de rezagos en el VAR=4

Lista de valores característicos:

.64154 .26529 .14349 .0000

Hipótesis				
Nula	Alternativa	Estadístico	95% valor crítico	90% valor crítico
$r=0$	$r=1$	31.80	22.00	19.76
$r \leq 1$	$r=2$	9.55	15.67	13.75
$r \leq 2$	$r=3$	4.80	9.24	7.52

Prueba de cointegración de la razón de máxima-verosimilitud basada en la traza de la matriz estocástica:

Hipótesis				
Nula	Alternativa	Estadístico	95% valor crítico	90% valor crítico
$r=0$	$r \geq 1$	46.16	34.91	32.00
$r \leq 1$	$r=2$	14.35	19.96	17.85
$r \leq 2$	$r=3$	4.80	9.24	7.52

La ecuación (14) indica que la elasticidad ingreso de la demanda de gasolinas totales es de alrededor de .6. Por su parte, la elasticidad de la demanda de gasolinas totales con respecto a la inflación es negativa y de alrededor de .1. Este valor proporciona evidencia relativa sobre el rechazo de la condición de homogeneidad.

$$gt_T = -1.72 + .56y_t - .09\Delta p_t + u_t \quad (14)$$

Los resultados obtenidos utilizando la prueba de razón de máxima verosimilitud indican que los datos rechazan la hipótesis nula de que la elasticidad del ingreso es igual a uno y de que la elasticidad de la inflación sea cero.

CUADRO 4: RESTRICCIONES EN EL VECTOR DE COINTEGRACION.

RESTRICCION	$\beta_1=1$	$\beta_2=0$
GAS. TOTALES	$X^2(1)=11.34[.001]$	$X^2(1)=22.07[.000]$

El vector de cointegración se utilizó entonces junto con la metodología de lo general a lo específico para obtener un modelo econométrico final. El modelo estadístico general para la demanda de gasolinas totales es el siguiente:

$$\Delta lgt = \sum \alpha_i \Delta lgt_i + \sum \beta_i \Delta y_i + \sum \delta_i \Delta \Delta lpi + \phi ECM_{t-1} + u_t \quad (15)$$

Este modelo no muestra problemas de autocorrelación, heteroscedasticidad, forma funcional, especificación incorrecta o ausencia de normalidad en sus errores.

La especificación del modelo econométrico final se elaboró utilizando la metodología de lo general a lo específico (Davinson, Hendry, Srba y Yeo, 1988). En este procedimiento se incluyeron a los residuales del vector de cointegración como el término de corrección de errores

La reparametrización del modelo estadístico general condujo al siguiente modelo econométrico final:

$$(16) \quad \Delta gt_t = -.22 \Delta gt_{t-1} + .66 \Delta y_t - .04 \Delta \Delta p_t - .84 ECM_{t-1}$$

(se) (.18) (.13) (.03) (.32)

$$R^2=.68 \quad R^2=.64 \quad F(3,26)=18.47[.000] \quad SE=3.00\%$$

$$LM: X^2(12)=8.01[.784] \quad F(12,14)=.42[.927]$$

$$RESET: X^2(1)=.18[.667] \quad F(1,25)=.15[.697]$$

$$JARQUE-BERA: X^2(2)=2.58[.275]$$

$$WHITE: X^2(1)=.95[.328] \quad F(1,28)=.92[.345]$$

$$ARCH(4): X^2(4)=1.05[.902]$$

$$DF=-5.42 \quad ADF(4)=-3.05$$

$$CHOW PREDICTIVA: X^2(4)=2.10[.716] \quad F(4,22)=.52[.717]$$

La ecuación (16) tiene un alto coeficiente de determinación lo que indica que el modelo simula satisfactoriamente el comportamiento real de los datos. Esto puede observarse también en la

gráfica 1 que presenta los valores reales y los proyectados por el modelo. El modelo satisface todas las propiedades estadísticas, no tiene problemas de autocorrelación, heteroscedasticidad, forma funcional, mala especificación o carencia de normalidad en los errores y más aún los residuales son un proceso estacionario.

La ecuación (16) indica que el crecimiento de los valores rezagados de las gasolinas totales afectan negativamente el crecimiento actual de las gasolinas totales. Asimismo, se observa una elasticidad ingreso de corto plazo muy similar a aquella de largo plazo. Por su parte, la aceleración de la inflación tiene efectos negativos sobre el consumo total de gasolinas. El valor del coeficiente de la inflación en el corto plazo es menor que en el largo plazo. Finalmente se observa que el mecanismo de corrección de errores tiene el signo adecuado con un valor relativamente alto. Esto supone que la magnitud de la corrección supone ajustes relativamente rápidos.

Para analizar las condiciones de estabilidad del modelo se procedió a utilizar estimaciones recursivas. Los resultados resumidos en las pruebas CUSUM y CUSUMQ (gráficas 2 y 3) indican que los coeficientes tienden a ser estables durante todo el período.

Con objeto de analizar la capacidad predictiva del modelo se redujo el tamaño de la muestra hasta el tercer trimestre de 1994 y se proyectaron los últimos cuatro meses. Los valores proyectados tienden a simular satisfactoriamente los valores reales (gráfica 4). Asimismo el modelo pasa la prueba de cambio estructural de Chow.

1.2) La demanda de magna sin

El cuadro 5 presenta el análisis de los vectores de cointegración basado en el procedimiento de Johansen. El procedimiento de Johansen indica que existen tres vectores de cointegración entre la demanda de gasolina magna sin, el índice de producción industrial y la inflación. Esto sugiere que existen múltiples soluciones dadas por las combinaciones lineales entre estos vectores (Wickens, 1993). Se procedió entonces a utilizar como solución el vector asociado a la mayor raíz característica.

La ecuación (17) indica que la elasticidad ingreso de largo plazo es de alrededor de .8 y la elasticidad con respecto a la inflación es de -.6. Con objeto de analizar con mayor detalle estas estimaciones se procedió a imponer diversas restricciones en los vectores autoregresivos utilizados en el procedimiento de Johansen. Los resultados de estas restricciones, utilizando la prueba de razón de máxima verosimilitud, sintetizados en el cuadro 7, indican que los datos no rechazan la hipótesis nula de que la elasticidad ingreso sea uno pero tampoco que la elasticidad de la inflación sea cero. Eso sugiere que el tamaño de la muestra, el tamaño de la desviación estándar y el ajuste de el VAR sin restringir con el VAR restringido permitirían no rechazar también otras hipótesis.

CUADRO 7: RESTRICCIONES EN EL VECTOR DE COINTEGRACIÓN.

RESTRICCIÓN	$\beta_1=1$	$\beta_2=0$
MAGNA SIN	$X^2(1)=.006[.938]$	$X^2(1)=1.02[.312]$

Nuevamente la especificación del modelo econométrico final se elaboró utilizando la metodo-

CUADRO 5: PRUEBAS DE COINTEGRACIÓN BASADAS EN EL PROCEDIMIENTO DE JOHANSEN.

Lista de las variables

gms y Δp

Muestra: 1992m1-1994m12 N=31 Número de rezagos en el VAR=4

Lista de valores característicos:

.61914 .33631 .22083 .0000

Hipótesis

Nula	Alternativa	Estadístico	95% valor crítico	90% valor crítico
$r=0$	$r=1$	29.92	22.00	19.76
$r \leq 1$	$r=2$	12.70	15.67	13.75
$r \leq 2$	$r=3$	7.73	9.24	7.52

Prueba de cointegración de la razón de máxima-verosimilitud basada en la traza de la matriz estocástica:

Hipótesis

Nula	Alternativa	Estadístico	95% valor crítico	90% valor crítico
$r=0$	$r \geq 1$	50.36	34.91	32.00
$r \leq 1$	$r=2$	20.44	19.96	17.85
$r \leq 2$	$r=3$	4.80	9.24	7.52

CUADRO 6: VECTORES DE COINTEGRACION.

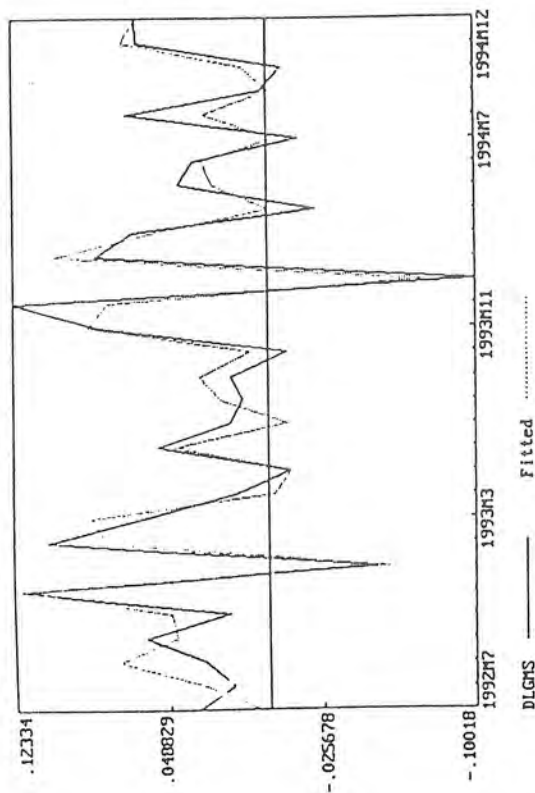
$$(17) \quad gms_t = -4.69 + .77y_t - .65\Delta p_t + u_t$$

$$(18) \quad gms_t = -118.55 + 8.91y_t + \Delta p_t + u_t$$

$$(19) \quad gms_t = -278 + 20.17y_t + \Delta p_t + u_t$$

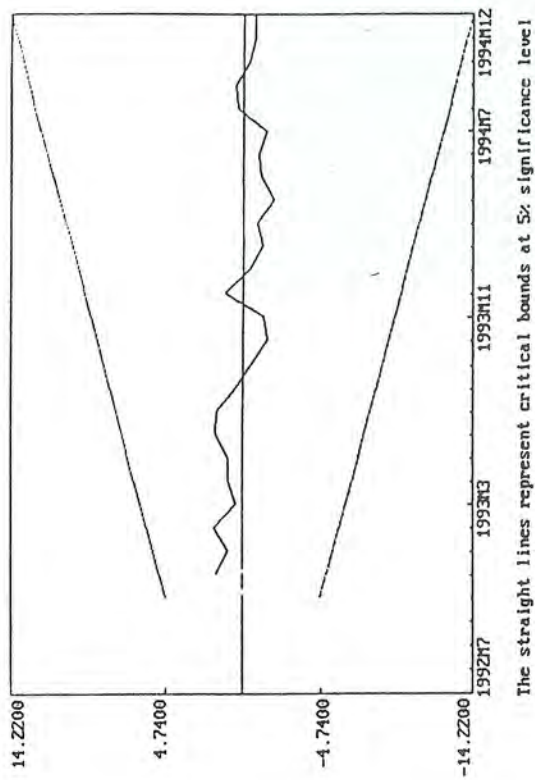
GRAFICA 1.

VALORES REALES Y PROYECCIONES DEL VOLUMEN DE GASOLINA MAGNA SIN.



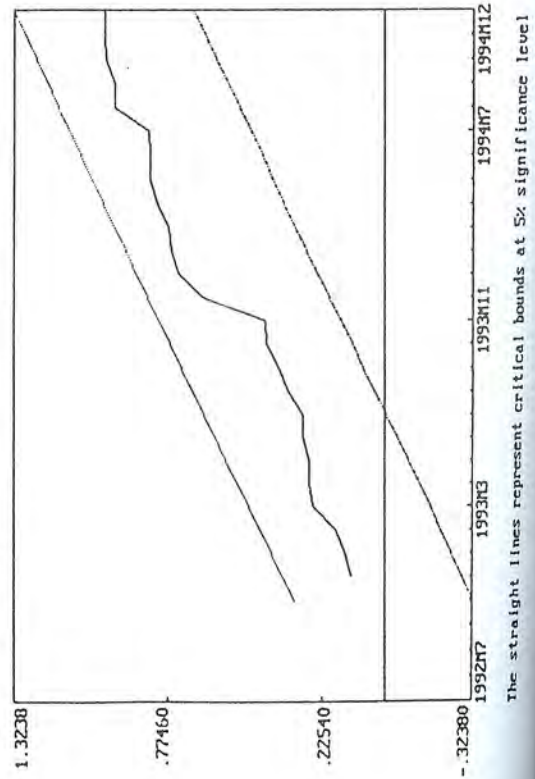
GRAFICA 2.

GASOLINA MAGNA SIN: CUSUM



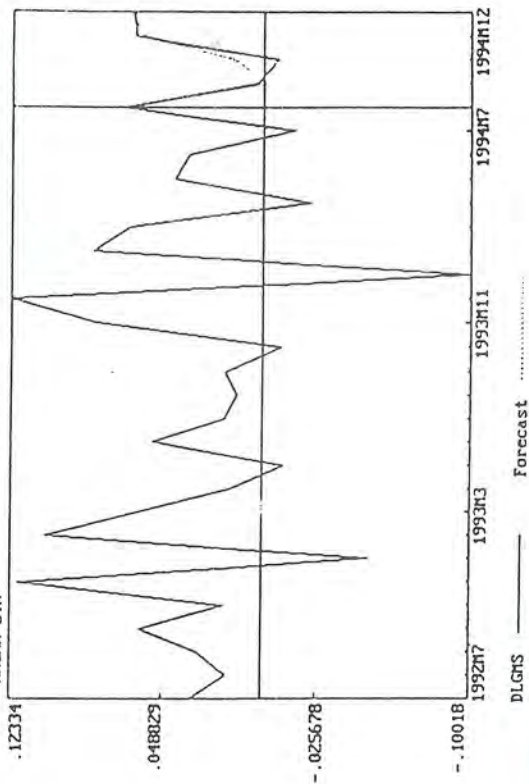
GRAFICA 3.

GASOLINA MAGNA SIN: CUSUMQ



GRAFICA 4.

PROYECCIONES PARA EL ULTIMO CUATRIMESTRE DEL VOLUMEN DE GASOLINA DE MAGNA SIN



logía de lo general a lo específico (Davinson, Hendry, Srba y Yeo, 1988). En este procedimiento se incluyeron a los residuales del vector de cointegración como el término de corrección de errores. El modelo estadístico general no tiene problemas de autocorrelación, heteroscedasticidad, forma funcional, especificación o ausencia de normalidad en los errores.

$$\Delta l g m s = \sum \alpha_i \Delta l g m s_i + \sum \beta_i \Delta y_i + \sum \delta_i \Delta \Delta l p_i + \phi E C M t - 1 + u_t \quad (20)$$

El modelo final es una adecuada representación del proceso generador de información (Spanos, 1986). Este modelo es una reparametrización admisible para los datos del modelo estadístico general. El modelo final tiene un alto coeficiente de determinación lo que sugiere que los valores proyectados simulan adecuadamente a los valores reales (véase gráfica 4). Asimismo, la ecuación (20) no tiene problemas de forma funcional, mala especificación o problemas de autocorrelación, heteroscedasticidad o problemas de normalidad en los errores. Asimismo, los residuales son estacionarios. También, se realizaron distintas pruebas para analizar la estabilidad en los coeficientes estimados. Para ello se estimó el modelo recursivamente y se le aplicaron las pruebas de CUSUM y CUSUMQ (gráficas 2 y 3). Con objeto de analizar la capacidad predictiva del modelo se redujo el periodo de estimación hasta el tercer trimestre de 1994 y se pronosticó el último cuatrimestre de este año. Los resultados obtenidos indican que el modelo rechaza la hipótesis nula de cambio estructural junto con una alta capacidad de predicción. La ecuación (20) indica que el modelo ajusta negativamente a sus propios valores rezagados lo que sugiere un proceso de ajuste dinámico adecuado. Asimismo, se obtiene una elasticidad ingreso positiva pero menor que la de largo plazo (.26). Por último se observa un ajuste positivo a los cambios en la tasa de inflación o la aceleración de ésta con un rezago de tres meses. Este resultado puede explicarse como consecuencia de la creación de burbujas inflacionarias que tienden a modificar los precios relativos. De este modo, el aceleramiento de la inflación puede provocar cambios en los precios relativos que reduzcan el precio relativo de la gasolina influyendo en los patrones de gasto.

$$\Delta g m s_t = -.57 \Delta g m s_{t-1} + .26 \Delta y_t + .14 \Delta \Delta p_{t-3} - .07 E C M_{t-1}$$

$$R^2=.80 \quad R^2=.78 \quad F(3,26)=36.63[.000] \quad SE=2.27\%$$

$$LM: X^2(12)=11.25[.507] \quad F(12,14)=.70[.729]$$

$$RESET: X^2(1)=.88[.347] \quad F(1,25)=.75[.392]$$

$$JARQUE-BERA: X^2(2)=.85[.651]$$

$$WHITE: X^2(1)=.37[.651] \quad F(1,28)=.35[.555]$$

$$ARCH(4): X^2(4)=2.22[.695]$$

$$DF=-7.17 \quad ADF(4)=-3.27$$

$$CHOW PREDICTIVA: X^2(4)=.77[.942] \quad F(4,22)=.19[.939]$$

3. Conclusiones y comentarios generales

Los principales resultados obtenidos en este trabajo pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

1) Es posible especificar un modelo econométrico adecuado para explicar la demanda de gasolinas

totales. Este modelo explica la demanda de gasolina atendiendo al nivel de ingreso y la tasa de inflación en México. Estos resultados son sólo preliminares ya que la teoría económica sugiere utilizar también como variables explicativas al índice de precios y a los precios de los bienes complementarios o sustitutos.

- 2) Las estimaciones obtenidas sugieren que la elasticidad precio de la demanda de total y magna sin esta entre .5 y 1 en el largo plazo. Asimismo, las pruebas de razón de máxima verosimilitud indican que no es posible rechazar que esta elasticidad sea uno en el largo plazo para el caso de magna sin. El valor de este coeficiente es mayor al obtenido en otros estudios. Ello puede explicarse por la ausencia de otros determinantes importantes tales como el índice de precios relativos y por el proceso de sustitución de gasolina nova por magna sin.
- 3) Las elasticidades de la demanda de gasolinas totales con respecto a la inflación son negativas y sustancialmente altas en el largo plazo. Esto representa evidencia en contra de la hipótesis de homogeneidad de la demanda. Estos resultados sugieren la necesidad de profundizar aún más en el análisis de la elasticidad precio de la demanda de gasolinas.
- 4) Los resultados obtenidos muestran aún varios problemas e inconsistencias. Destaca desde luego, la exclusión del índice de precios y los precios relativos como determinantes de la demanda de gasolina. La inclusión de estas variables y la estimación de sus elasticidades permitiría realizar análisis más precisos y comparar estos resultados con investigaciones previas. En estas condiciones es difícil argumentar que el modelo aquí estimado representa una solución satisfactoria al problema de la demanda de las gasolinas. No obstante, estas estimaciones preliminares representan un avance para conocer la dirección de los efectos del ingreso y la inflación en la demanda de gasolinas.

REFERENCIAS

- Cagan, P., 1956. The Monetary Dynamics of Hyperinflation, in M. Friedman (ed), *Studies in the Quantity Theory of Money*, Chicago, University press.
- Davinson, J. E. H., D. Hendry, F. Srba, y S Yeo, 1978. Econometric Modelling of the Aggregate Time-Series Relationship between Consumers, Expenditure and Income in the United Kingdom, *Economic Journal*, num. 88, diciembre, 661-692.
- Dickey, D. y W. A. Fuller, 1981. Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series With unit Root, *Econometrica*, vol. 49, no. 4, 1057-1072.
- Deaton, A. S., 1977, Involuntary saving Through Unanticipated Inflation, *American Economic Review*, num 67, 899-910.
- Deaton, A. y J. Muellbauer, 1980. *Economics and Consumer Behavior*, Cambridge University Press, 450 págs.
- Engle, R. F. y C. W. J. Granger, 1987. Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing, *Econometrica*, vol. 55, no. 2, 251-276.
- Granger, C. W. y P. Newbold, 1974. Spurious Regressions in Econometrics, *Journal of Econometrics*, vol. 2, 11-120.
- Hendry, D. y T. Ungern-Sternberg, 1981. Liquidity and Inflation Effects on Consumers' Expenditure, en *Essays in the Theory and Measurement of Consumers' Expenditure*, Angus Deaton (ed.), cap 8.
- Johansen, S., 1988. Statistical Analysis of Cointegrating Vectors, *Journal of Economic Dynamics and Control*, num. 12, 231-254.
- Romero, J., 1993. Energía, emisiones y precios relativos, en *Medio Ambiente: problemas y soluciones*, Antonio Yunez-Naude, COLMEX, 111-122.
- Spanos, A., 1986. *Statistical Foundations of Econometric Modelling*, Cambridge University Press, 695 págs.

- Varian, H. R., 1984. Microeconomic Analysis, Norton International Student Edition, 348 págs.
- Wickens, M. R., 1993. Interpreting Cointegrating Vectors and Common Stochastic Trends, discussion paper, no. 14, marzo, London Bussiness School, 21 págs.

Escenarios Físicos de Cambio Climático

VICTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México

RESUMEN

Los campos de precipitación y temperatura en superficie generados por modelos de circulación general (GCM) no deben ser simplemente interpolados a puntos locales de interés para construir escenarios físicos de cambio climático a nivel regional. Para construir tales escenarios se pueden utilizar las relaciones entre variables locales y patrones de circulación de gran escala, los cuales son simulados adecuadamente por los GCMs.

En ese trabajo, se muestra como se pueden construir estas relaciones a partir de datos históricos de altura geopotencial en 700 y 500 mb, temperaturas en 700 mb y en la superficie del océano, presión a nivel del mar (variables de gran escala) y precipitación (variable local) en cuatro regiones de México. Tales relaciones pueden ser evaluadas con los resultados de GCMs para experimentos de doblamiento de CO₂ para así desarrollar escenarios de cambio climático regional.

ABSTRACT

Fields of surface temperature and precipitation, generated by general circulation models (GCM) should not be simply interpolated to points of interest to construct physical scenarios of regional climate change. In order to construct such scenarios one should make use of relationships between local variables and large scale circulation patterns which are adequately simulated by GCMs.

In this work, it is shown how such relationships can be established from historical records of 700 and 500 mb geopotential height, 700 mb and sea surface temperatures, sea level pressure (large scale variables) and precipitation (local variable) in four regions of Mexico. Such relationships can then be evaluated with GCM output from doubling CO₂ experiments in order to develop regional climate change scenarios.

Introducción

Los potenciales cambios en el clima del planeta que podrían ocurrir de seguir aumentando de manera desmedida las emisiones gases de invernadero han sido simulados por modelos de circulación general de la atmósfera (GCMs). Los pronósticos que tales modelos hacen, corresponden a un aumento global de la temperatura del planeta, siendo éste mayor en latitudes altas y menor en latitudes bajas. Existe, no obstante, gran incertidumbre en el tipo de cambio que ocurriría en otros parámetros climáticos de darse un calentamiento global. Por ejemplo para el caso de México, ¿cómo cambiará la cantidad de precipitación?, ¿cómo impactará tal cambio en las características del terreno?, ¿aumentarían los desiertos?, ¿se tendrá más o menos agua disponible?, etc. Tales interrogantes sólo pueden ser contestadas utilizando adecuadamente la información de las predicciones de los GCMs.

Es necesario sin embargo, que cuando se utilice la información generada por estos modelos se tomen en cuenta las limitaciones que tienen. Por ejemplo, su baja resolución espacial no permite simular adecuadamente los efectos locales asociados con orografía, contrastes océano continente, etc. En pocas palabras, los GCMs simulan circulaciones de gran escala observadas en la atmósfera pero no son capaces de simular circulaciones de mesoescala. Por esta razón, no es conveniente sacar conclusiones sobre cambios locales con tan sólo una interpolación del campo gran escala al punto de interés.

Por otro lado, es sabido que los GCMs no son muy precisos en simular los patrones observados de precipitación y su variabilidad a nivel regional, por estar ésta asociada a complejos procesos físicos que involucran la interacción entre distintas escalas espaciales. Por esta razón, los GCMs hacen uso de parametrizaciones que pueden variar grandemente entre modelos. En consecuencia, los pronóstico de cambio climático, en lo que se refiere a precipitación, varían dependiendo del modelo analizado. Decidir que modelo realiza el mejor trabajo en pronósticos de lluvia o

temperatura superficial no es siempre fácil y por tanto se requiere un análisis cuidadoso de los resultados arrojados, para que sobre bases físicas, se juzgue que resultados se pueden utilizar para elaborar escenarios climáticos a nivel regional.

Los métodos para obtener estimaciones locales de precipitación o temperatura en superficie a partir de variables de gran escala son varios. Uno de los métodos empleados con mayor regularidad hace uso de relaciones establecidas a partir de datos históricos de circulaciones de gran escala observadas y variables locales. En la literatura meteorológica se conoce generalmente como Pronóstico Perfecto o *Perfect Prog*. Este análisis hace uso de relaciones físicas y empíricas para obtener mejores pronósticos del tiempo a corto plazo.

En el siguiente trabajo, estableceremos tales relaciones para obtener diagnósticos de anomalías de precipitación en algunas regiones de México. Nuestro objetivo final será utilizar tales relaciones para establecer cambios en precipitación a partir de las circulaciones en gran escala simuladas por los GCMs en experimentos de doblamiento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Tal procedimiento involucra dos hipótesis fundamentales:

- i) Los GCMs simulan las circulaciones de gran escala adecuadamente.
- ii) Las relaciones entre patrones de circulación de gran escala y variables locales no cambian aún bajo los efectos de un calentamiento global.

La primera hipótesis parece ser cierta en la mayoría de los modelos. La segunda no puede ser probada por el momento.

Datos

Los datos que se utilizarán para establecer las relaciones entre circulaciones de gran escala y variables locales provienen de diversas fuentes. Para los datos de gran escala se utilizan los campos medios mensuales de altura geopotencial y temperatura en 700 y 500 mb, así como los campos de presión a nivel del mar generados por el National Meteorological Center (NMC) desde 1948 a 1988. El dominio espacial de los campos de altura geopotencial, Z500 y Z700 respectivamente, y temperatura en 700 mb, T700, va de -180E a 180W y de 20N a 90N, mientras que los de presión a nivel del mar (SLP) se extienden hasta el ecuador. La resolución espacial de estos campos es de 5° × 5°. Por otro lado, datos medios mensuales de temperatura de la superficie del océano (SST), con resolución de 2° × 2°, para el mismo período, fueron generados en el United Kingdom Meteorological Office y son utilizados para complementar los campos de variables meteorológicas de gran escala.

Para las variables locales o regionales en México, se utiliza la base de datos de temperatura en superficie, precipitación e índice de aridez de Palmer elaborada por el Dr. Arthur Douglas de la Universidad de Creighton, Nebraska. En particular, se hace uso de los datos de precipitación en dieciocho regiones en que se subdivide a México, las cuales dependen de las características geográficas y climáticas de las estaciones.

Finalmente, los datos de los experimentos numéricos con GCMs para doblamiento en la concentración de CO₂ corresponden a los experimentos realizados con los modelos acoplados del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), del European Centre for Medium Range Forecast (ECMWF), del National Center for Atmospheric Research (NCAR) y del Hadley Center del UK Met Office. Los resultados de cada uno de estos modelos se encuentra en forma de medias estacionales y corresponden a variables de superficie y altura.

Todas las bases de datos antes mencionadas se encuentran disponibles en diferentes nodos de Internet.

Relaciones entre circulaciones de gran escala y precipitación

A partir de los datos de precipitación y las medias climatológicas correspondientes calculadas por

A. Douglas se determinaron sus anomalías mensuales para cada una de las dieciocho regiones antes mencionadas. Las anomalías se correlacionaron con cada uno de los campos de gran escala. La figura 1 muestra los campos de correlación de invierno (diciembre-enero-febrero) entre precipitación en el altiplano mexicano y los campos de altura geopotencial (o vorticidad) en 500 y 700 mb, así como con la temperatura a 700 mb, la presión a nivel del mar y con la temperatura de la superficie del océano. El patrón de la correlación muestra claramente la estructura de una onda estacionaria de gran escala conocida como el patrón del Pacífico y Norteamérica. Tal estructura puede ser mantenida dinámicamente por un proceso de calentamiento anómalo en el Pacífico del Este, o sea durante un periodo de El Niño. La estructura del campo de correlación con SST confirma que se tiene mayor precipitación de invierno durante eventos de El Niño.

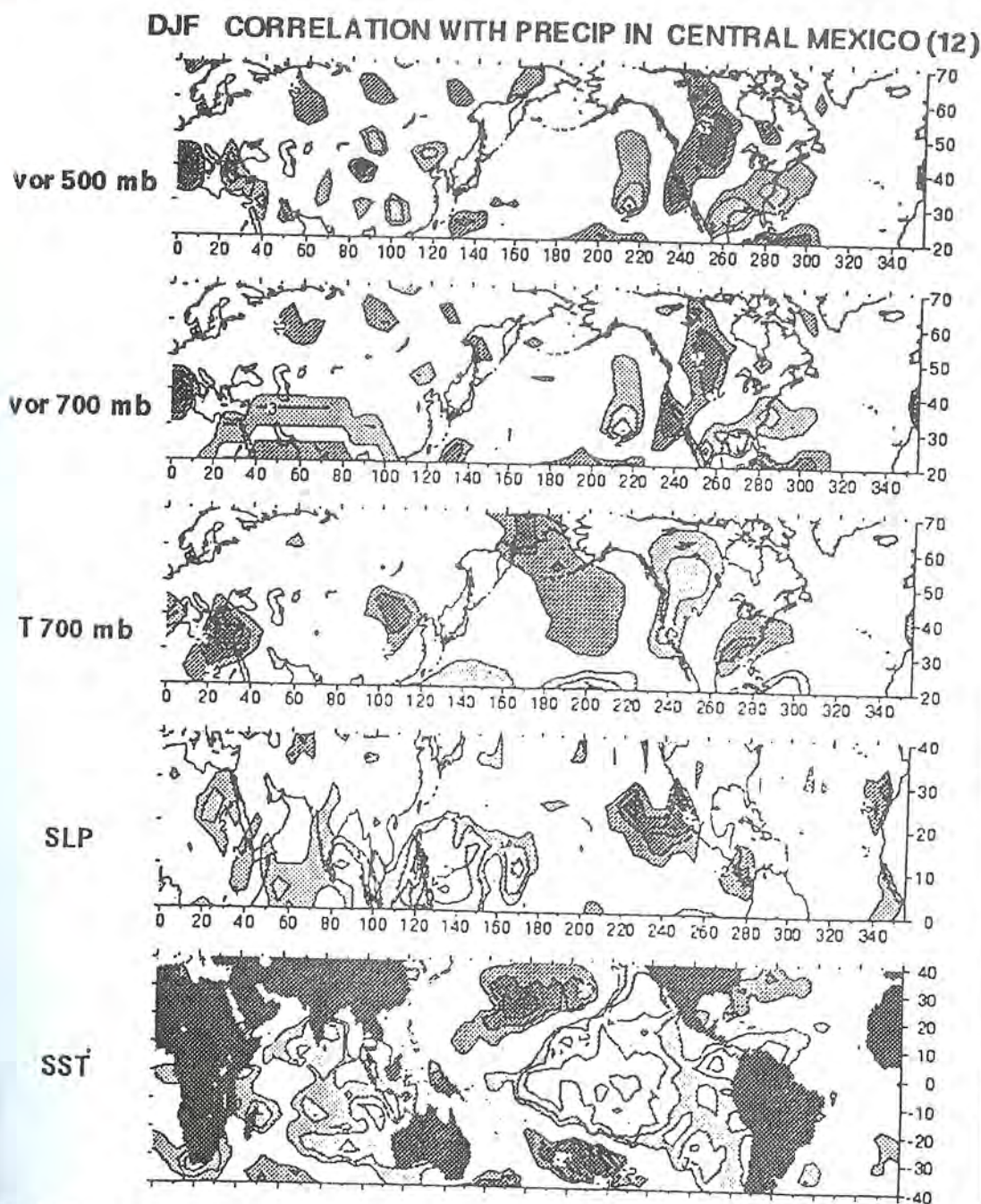


Fig. 1 Correlación de la precipitación invernal (D E F) en el Altiplano mexicano y campos de vorticidad en 500mb, vorticidad en 700, temperatura en 700 mb, presión a nivel del mar y temperatura de la superficie del océano.

Mediante un proceso de regresión múltiple por pasos se obtienen ecuaciones de regresión para diagnósticos de anomalías de precipitación a partir de campos de altura geopotencial, temperatura de la superficie del mar o algún otro campo meteorológico de gran escala. Este procedimiento de regresión se siguió para todas las regiones climáticas en la que se dividió al país y en casi cada caso se encontró una fuerte dependencia entre eventos de El Niño y mayor precipitación de invierno. La excepción fue la región de Tabasco donde la estructura espacial de la correlación entre anomalías de precipitación y altura geopotencial a 700 mb indica que la precipitación de invierno depende fuertemente de los eventos conocidos como "Nortes", caracterizados por una circulación anticiclónica sobre el Golfo de México.

De los análisis anteriores se concluye de inmediato que la precipitación de invierno en México depende en gran medida de la temperatura de la superficie del océano. Por esta razón, las simulaciones del clima para esta región del planeta deben incluir la interacción océano-atmósfera en los trópicos. Aún más, el GCM utilizado debiera, idealmente, ser capaz de reproducir eventos de El Niño para que las simulaciones fueran lo más realista posible. Tal conclusión lleva a descartar experimentos realizados con modelos que incluyen únicamente la componente atmosférica del sistema, como son aquellos utilizados en la primera parte del Estudio de País: México. Los resultados permiten concluir que en la mayoría de los casos es posible diagnosticar anomalías de precipitación a partir de patrones de circulación de gran escala por lo que los escenarios de cambio climático regional en invierno pueden ser construidos a partir de la salida de los GCMs.

El procedimiento de correlacionar anomalías de precipitación con campos de circulación de gran escala se utilizó también para determinar relaciones estadísticas de diagnóstico para los meses de verano (junio-julio-agosto). Los resultados en este caso no fueron tan alentadores como los del invierno. Durante estos meses, las correlaciones fueron más débiles por lo que la dependencia de anomalías de precipitación con fenómenos de mesoescala debe ser mayor. Sin embargo, algunos patrones de gran escala fueron utilizados para construir relaciones de diagnóstico como las determinadas en invierno. Un ejemplo de los resultados obtenidos se puede ver en la figura 2, donde se muestra el patrón de correlaciones entre anomalías de temperatura de la superficie del océano y las anomalías de precipitación en Sonora. Aquí, la precipitación parece depender de la temperatura de la superficie del océano en zonas aledañas de la costa del Pacífico mexicano.

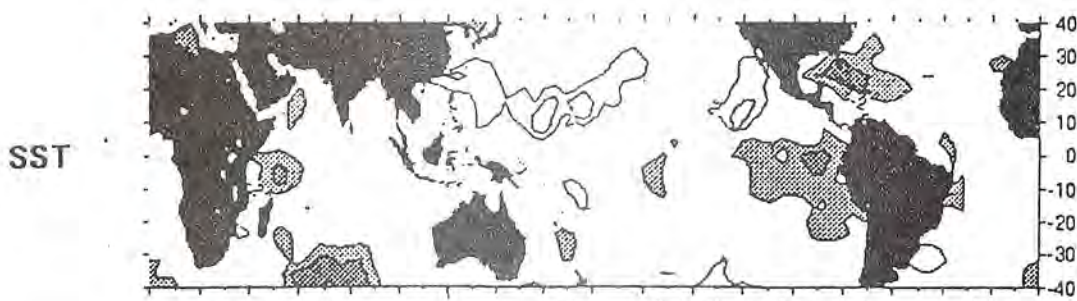


Fig. 2 Correlación entre las anomalías de temperatura de la superficie del océano y las anomalías de precipitación en Sonora para los meses de verano.

Los valores correspondientes a las anomalías diagnosticadas y las anomalías observadas pueden ser comparados en un diagrama de dispersión como se muestra en la figura 3 para el caso de anomalías de precipitación en Sonora durante el verano. La calidad de los diagnósticos es evaluada mediante el coeficiente de correlación entre el valor diagnosticado y el observado. Si los diagnósticos de precipitación fueran perfectos los puntos estarían a lo largo de la línea con pendiente uno.

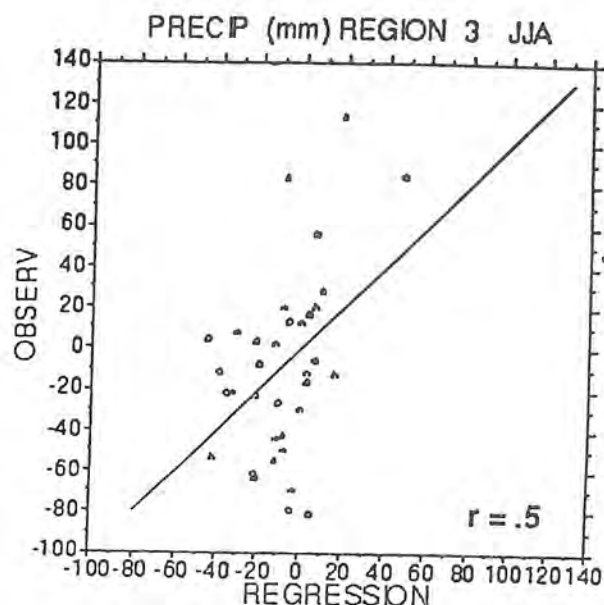


Fig. 3 Diagrama de dispersión entre anomalías de precipitación observadas y diagnosticadas a partir de una ecuación de regresión.

Los resultados de análisis para el verano muestran que aún durante esta temporada las anomalías de precipitación dependen en gran medida de las anomalías de la temperatura de la superficie del océano. Así, anomalías negativas en la temperatura de la superficie del océano en el Pacífico Este parece favorecer las lluvias de verano en el norte de México.

En general, se observó, a partir de los resultados de las correlaciones para el verano, que entre más tropicales se vuelvan los sistemas que determinan la precipitación en una región, más dependen de circulaciones de mesoescala y mas difíciles son de pronosticar o diagnosticar con GCMs.

Escenarios de cambio climático a partir de GCMs

Utilizando los resultados de diversos experimentos con modelos acoplados de circulación general de la atmósfera y el océano se analizaron las predicciones estacionales de cambios en precipitación en la República Mexicana. En promedio, los pronósticos indican un aumento en la cantidad de lluvia que se recibirá de darse un calentamiento global. Sin embargo, las discrepancias entre modelos deben ser analizadas en un marco de referencia de la Dinámica de la Atmósfera de la región. Para ello se hará uso de las relaciones diagnósticas determinadas a partir de observaciones y de los pronósticos que los GCM entregan.

La primera etapa del análisis consiste en examinar la consistencia entre circulación atmosférica y precipitación durante los experimentos de control. Los resultados muestran que modelos como el GFDL y los del ECMWF son consistentes en sus simulaciones de precipitación para México. No obstante, los valores de precipitación acumulada no siempre concuerdan con los valores climatológicos observados.

El siguiente paso consistió en calcular las anomalías de la circulación a partir de la diferencia entre el experimento de control y el de doblamiento de CO_2 . En muchos casos de invierno, el patrón anómalo de circulación a 500 mb muestra características de la onda estacionaria del Pacífico y Norteamérica asociada a eventos de El Niño (Fig. 4). A partir de tal patrón se puede concluir que la precipitación invernal aumentará en la mayor parte de México, y bajo lo pronosticado por el modelo de NCAR, la precipitación en Sonora aumentará substancialmente.

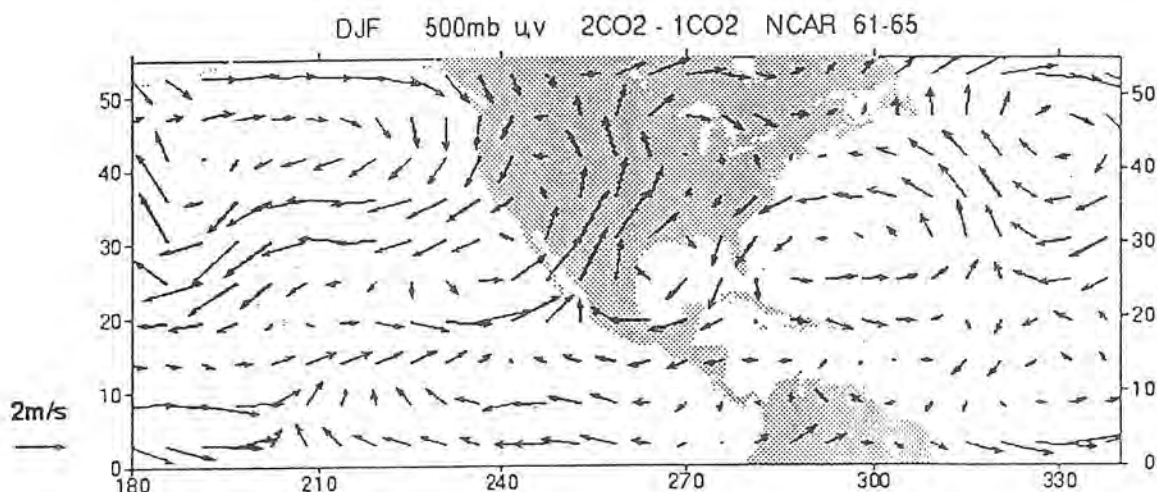


Fig. 4 Patrón de anomalías en la circulación a 500mb pronosticado por el modelo de NCAR para el invierno bajo un doblamiento de CO_2 .

Durante el verano, los modelos mostraron que las circulaciones sobre Norteamérica corresponden a escenarios de mayor precipitación sobre la República Mexicana. Tal es el caso del anticiclón sobre la parte central de los Estados Unidos asociado a mayor convección en la zona intertropical de convergencia asociada a gran parte de la precipitación en México. Sin embargo, dado que la precipitación depende de circulaciones de mesoescala, los cambios potenciales en la precipitación del verano son difíciles de diagnosticar usando resultados de GCM. Aún más, se puede pensar que cambios en las condiciones locales, como aquellos en el uso del suelo, pueden tener un mayor impacto en el clima de la región que los probables cambios en la circulación de gran escala del verano.

En las siguientes etapas de este trabajo, se procederá a evaluar las ecuaciones de diagnóstico de valores observados, pero con los valores pronosticados por los modelos. Estos resultados se reportarán en trabajos posteriores.

Conclusiones

A partir de datos históricos de variables de gran escala (altura geopotencial, temperatura, presión a nivel del mar y temperatura a nivel del mar) y variables a nivel regional (precipitación y temperatura) se analiza como construir escenarios de cambio climático a partir de información generada por GCMs.

Se encuentra que no es conveniente utilizar a escala regional los pronósticos de precipitación que entregan los GCMs, debido a las limitaciones de resolución espacial de los modelos. Por otro lado, las simulaciones climáticas de precipitación para México deben realizarse con modelos acoplados de océano y atmósfera, pues las lluvias de invierno en esta parte del planeta dependen grandemente de eventos como El Niño. Aún las lluvias de verano están fuertemente determinadas por las condiciones de temperatura del mar en el Pacífico del Este.

La relación existente entre las anomalías de precipitación en México y patrones de circulación de gran escala durante el invierno permite tener cierto grado de confiabilidad en los diagnósticos de precipitación obtenidos a partir de las circulaciones de gran escala de los GCMs. Durante el verano sin embargo, la dependencia entre estas variables disminuye por lo que se concluye que las lluvias están más asociadas a circulaciones de mesoescala, no siempre bien simuladas por los GCMs. Aún bajo esta condición, se analizaron posibles escenarios de cambio climático y se concluyó que bajo condiciones de calentamiento global, las lluvias sobre México pueden aumentar.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al Pas. de Físico José Luis Pérez y al Dr. Carlos Gay su colaboración en las etapas preliminares de este trabajo. También se agradece el apoyo técnico recibido por el Sr. Luis Rodolfo Meza. El trabajo ha sido financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México mediante el Programa de Apoyos a Proyectos de Investigación y de Innovación Tecnológica (PAPIIT) y parcialmente por el Programa de Estudios de País de los Estados Unidos.

Escenarios climáticos básicos y regionales

CONDE, C., SANCHEZ, O., MAGAÑA, V. y GAY, C.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM., Ciudad Universitaria, Circuito Exterior 04510 México, D.F. México

RESUMEN

Se presentan los avances en el estudio de los escenarios climáticos regionalizados para México. Inicialmente, se discuten dos escenarios básicos propuestos para los estudios de vulnerabilidad en el "Estudio de País: México". El primero se basa en los datos de temperatura y precipitación promedios de 1940 a 1970 y corresponden a puntos sobre México distribuidos en una malla de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. El segundo se fundamenta en la base de datos de Arthur Douglas, ésta tiene los promedios de temperatura (92 puntos) y precipitación (279 puntos) de más de 30 años, incluyendo el período de 1950 a 1980.

Por otra parte, se presentan dos posibles regionalizaciones de los datos base; la primera utiliza los datos del MTC (Modelo Termodinámico del Clima) distribuidos en tres regiones (Norte, Centro y Sur). Para este caso se obtuvieron también los cambios en temperatura, precipitación y radiación solar, utilizando las simulaciones de dos modelos de circulación general (CCCM y GFDL-R30). Con ello es posible construir los escenarios de cambio climático para las tres regiones propuestas. Asimismo, se comparan los datos del MTC con las simulaciones para condiciones de $1 \times \text{CO}_2$ de los modelos de circulación general mencionados. La segunda regionalización corresponde a la base de Douglas, en la que el país es dividido en 18 regiones, considerando la densidad, altura y precipitación análoga de las estaciones de donde se obtuvieron los datos.

ABSTRACT

Two proposals of Basic Scenarios that can be used in vulnerability studies in the "Country Study: Mexico" are discussed. The first one constructed in terms of temperature and precipitation data. These data are monthly averages from 1940 to 1970 for $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ grid points over Mexico. The second scenario is based on Arthur Douglas' data base of temperature (92 points) and precipitation (279 points) of monthly averaged data for more than 30 years, including 1950 - 1980 period.

In addition, two possible methods of developing regional scenarios are presented. The first one consist of dividing the MTC domain in three regions (North, Center and South). In this case, changes in temperature, precipitation and solar radiation were obtained, using simulations of two General Circulation Models (CCCM and GFDL-R30). The MTC data are compared with CCCM and GFDL - R30 outputs for $1 \times \text{CO}_2$ conditions. The second case is proposed in the same Douglas' data base and has 18 divisions considering station density, altitude and similar amount of precipitation.

1. Introducción

Inicialmente, el grupo de "Escenarios Físicos" del "Estudio de País: México" propuso para la construcción de escenarios básicos los datos correspondientes a 23 puntos de malla del MTC (Conde, *et al.*, 1994a). Para estos puntos se tienen promedios mensuales de temperatura y precipitación de 1940 a 1970. La ventaja de emplear estos puntos reside en que se encuentran distribuidos homogéneamente en una malla $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ sobre el país. Paralelamente, se elaboraron tablas y mapas con los cambios en temperatura, precipitación y radiación solar para México a partir de las simulaciones de los modelos CCCM y GFDL - R30 para condiciones de una duplicación de bióxido de carbono (Conde, *et al.*, 1994b). Los valores que los modelos mencionados arrojaron para los 23 puntos del escenario base se obtuvieron por interpolación o utilizando el punto más cercano.

2. Escenarios básicos y de cambio climático regionales

A continuación presentamos una posible regionalización de los datos empleados por el MTC, divididos en bandas latitudinales que corresponden a tres regiones: Norte, Centro y Sur, (Tabla 1):

Tabla 1. Distribución de 15 de los 23 puntos por región.

	puntos	longitud (°)	latitud (°)
Zona Norte	1	-115.5	32.5
	2	-110.8	31.6
	3	-106.4	30.5
	4	-109.3	29.3
	5	-102.3	29.2
	6	-105.2	28.2
	7	-107.8	26.9
Zona Centro	15	-101.7	20.8
	16	-104.1	19.9
	17	-98.4	19.4
	18	-100.7	18.6
Zona Sur	20	-92.7	18.3
	21	-95.2	17.7
	22	-97.5	17.2
	23	-92.1	16.0

Para las mismas regiones, se obtuvieron los cambios de temperatura, precipitación y radiación solar (anomalías) a partir de los modelos CCCM y GFDL - R30, como se muestra en la siguientes tablas:

Tabla 2a.

ZONA NORTE CCCM				GFDL -R30			
MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)	MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)
1	3.10	0.53	1.03	1	4.10	0.84	1.08
2	4.14	1.01	0.99	2	4.24	0.86	1.07
3	4.38	0.96	0.99	3	5.40	0.95	1.08
4	4.12	0.99	0.99	4	4.63	0.87	1.07
5	4.54	1.40	0.97	5	4.20	1.20	1.01
6	3.38	1.18	0.95	6	3.46	1.13	1.00
7	4.25	0.76	1.01	7	3.33	1.55	0.98
8	3.60	0.81	1.04	8	2.40	1.74	0.95
9	3.21	1.09	0.99	9	3.01	0.91	1.01
10	4.22	1.11	0.96	10	3.78	1.20	1.01
11	3.71	0.96	0.98	11	3.54	0.89	1.04
12	3.19	0.60	1.01	12	3.50	1.19	1.01

Tabla 2b

ZONA CENTRO CCCM				GFDL -R30			
MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)	MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)
1	1.62	0.74	1.03	1	3.33	1.37	0.99
2	1.85	0.95	0.99	2	3.25	0.88	1.08
3	1.90	0.76	1.03	3	3.51	1.27	0.97
4	2.29	1.14	0.96	4	3.05	1.08	1.00
5	2.17	1.26	0.94	5	2.38	1.23	0.99
6	1.85	0.88	0.96	6	2.61	1.34	0.95
7	2.04	0.67	1.06	7	2.27	1.26	0.95
8	2.30	1.01	0.97	8	2.42	1.31	0.95
9	2.30	0.78	0.98	9	2.61	1.30	0.96
10	2.51	1.25	0.92	10	2.67	1.03	1.01
11	2.21	0.84	0.96	11	2.72	1.22	1.02
12	1.80	0.95	1.01	12	3.61	1.00	1.03

Tabla 2c

ZONA SUR CCCM				GFDL -R30			
MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)	MES	T(Diff)	Pcp(%)	S(%)
1	1.76	0.96	0.99	1	2.22	1.52	0.95
2	1.92	1.03	0.97	2	2.93	0.87	1.07
3	1.77	1.00	1.00	3	2.70	1.21	1.02
4	2.14	1.31	0.94	4	1.92	1.09	0.96
5	2.09	0.89	0.97	5	2.27	0.91	1.00
6	1.89	0.69	1.01	6	2.45	1.38	0.94
7	1.95	0.70	1.00	7	2.75	0.90	1.12
8	2.16	0.95	0.96	8	2.46	1.21	1.05
9	2.18	0.75	0.99	9	2.64	1.57	0.99
10	2.45	1.36	0.92	10	2.66	1.39	0.99
11	2.33	1.23	0.93	11	2.63	1.24	1.01
12	2.02	1.17	0.98	12	2.76	1.24	0.92

En las tablas 2a - 2c, T(Diff) representa el cambio en la temperatura según los modelos señalados. A la Temperatura Normal de la región correspondiente, se le sumaría el valor mensual mostrado en las tablas. Las columnas Pcp(%) y S(%) representan los cambios en la precipitación y la radiación solar, respectivamente, para cada región propuesta. Así, el valor normal se multiplica por el porcentaje mostrado en las tablas, según el mes y el modelo que se desea emplear.

En general, los cambios en la temperatura, según el CCCM, corresponden a un incremento entre 1 y 2 °C, mientras que para el GFDL-R30 los cambios oscilan entre 2 y 3°C. Para la precipitación, el CCCM muestra básicamente una leve disminución, mientras que el GFDL -R30 muestra incrementos hasta de un 52%.

Con los resultados de la Tabla II, se elaboraron los mapas correspondientes para las tres regiones citadas, de los cuales mostramos un ejemplo en la Figura 1.

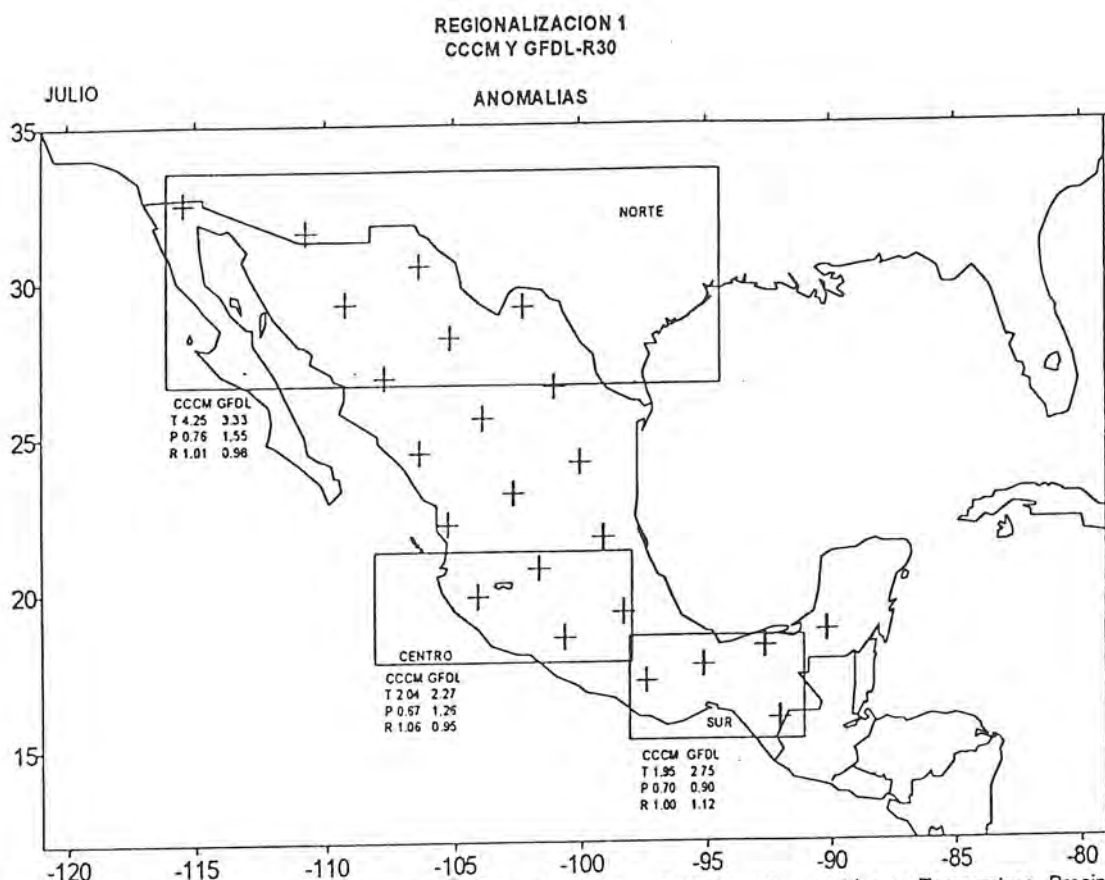


Figura 1. Mapa que muestra los 23 puntos del MTC regionalizados. Se incluyen los cambios en Temperatura, Precipitación y Radiación Solar por región y por Modelo para el mes de julio.

Para concluir el empleo de los datos del MTC; se realizaron estudios de validación al compararlos con las simulaciones de los dos modelos de circulación general bajo condiciones de $1\times CO_2$. Los datos Normales de Temperatura y los correspondientes a los modelos en condiciones de $1\times CO_2$ se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3.
Valores para la Temperatura Mensual (°C) para las tres regiones propuestas según los datos del MTC (Normales) y los modelos CCCM y GFDL-R30 en condiciones de 1xCO₂.

	NORTE			CENTRO			SUR		
mes	normal	cccm 1xCO ₂	gfdl 1xCO ₂	normal	cccm 1xCO ₂	gfdl 1xCO ₂	normal	cccm 1xCO ₂	gfdl 1xCO ₂
1	10.4	4.0	4.8	21.5	19.7	15.1	21.5	22.3	19.5
2	12.6	5.7	5.9	22.5	19.8	15.7	22.5	22.5	20.1
3	15.3	9.5	7.9	24.3	20.4	16.5	24.3	23.2	21.3
4	19.6	14.4	13.0	26.1	21.5	19.0	26.1	24.1	23.5
5	23.3	19.4	19.0	27.0	22.8	20.3	27.0	25.1	23.3
6	27.0	23.0	23.6	26.6	23.2	19.0	26.6	25.5	22.4
7	28.3	23.8	24.0	26.1	23.3	18.2	26.1	25.5	22.2
8	27.6	23.7	23.5	26.3	23.5	18.2	26.3	25.7	22.6
9	25.7	20.9	21.5	25.8	23.4	18.7	25.8	25.6	22.3
10	21.2	14.2	16.5	24.9	22.4	18.1	24.9	24.8	20.8
11	14.7	8.3	10.1	23.0	21.2	16.4	23.0	23.5	19.5
12	11.1	4.9	6.1	21.9	20.2	15.2	21.9	22.7	19.1

Los valores para los modelos pueden ser obtenidos por interpolación o escogiendo el punto más cercano. La Tabla 3 muestra los valores que se obtienen de interpolar. Como se observa en esta tabla, las diferencias con la Normal más pronunciadas se dan para el GFDL - R30. Sin embargo, las simulaciones de este modelo siguen las variaciones anuales (o estacionales) de mejor manera que el CCCM, particularmente para las regiones Centro y Sur, como se muestra en las siguientes figuras.

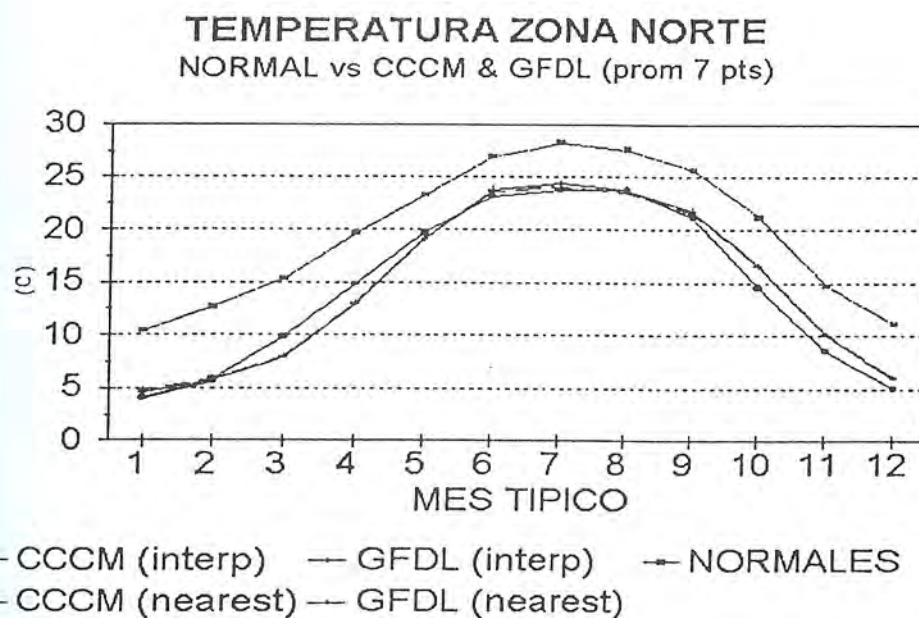
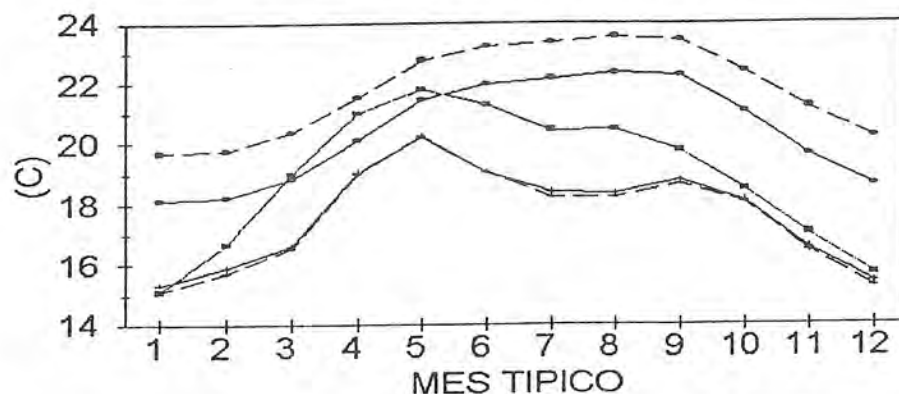


Figura 2. Comparación para la Zona Norte entre la Temperatura Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de 1xCO₂, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

TEMPERATURA ZONA CENTRO

NORMAL vs CCCM & GFDL (prom 4 pts)

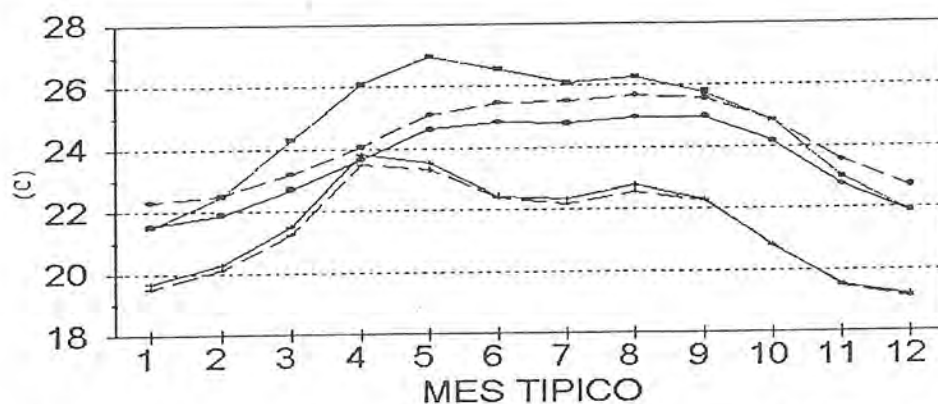


— CCCM (nearest) — GFDL (nearest) — CCCM (interp)
— GFDL (interp) — NORMALES

Figura 3. Comparación para la Zona Centro entre la Temperatura Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de $1xCO_2$, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

TEMPERATURA ZONA SUR

NORMAL vs CCM & GFDL (prom 4 pts)



— CCCM (nearest) — GFDL (nearest) — CCCM (interp)
— GFDL (interp) — NORMALES

Figura 4. Comparación para la Zona Sur entre la Temperatura Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de $1xCO_2$, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

De manera análoga, los datos Normales de Precipitación y los correspondientes a los modelos en condiciones de $1\times CO_2$ se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4
Valores para la Precipitación Mensual (mm/día) para las tres regiones propuestas según los datos del MTC (Normales) y los modelos CCCM y GFDL-R30 en condiciones de $1\times CO_2$.

mes	NORTE			CENTRO			SUR		
	normal	cccm $1\times CO_2$	gfdl $1\times CO_2$	normal	cccm $1\times CO_2$	gfdl $1\times CO_2$	normal	cccm $1\times CO_2$	gfdl $1\times CO_2$
1	0.7	1.1	1.9	2.3	7.7	2.8	2.3	4.4	1.5
2	0.4	1.0	2.0	1.4	5.6	2.8	1.4	3.9	1.8
3	0.3	1.0	1.3	1.1	5.6	2.4	1.1	4.2	1.8
4	0.3	0.9	1.1	1.3	5.5	2.9	1.3	5.8	2.6
5	0.4	1.1	0.8	3.0	10.1	6.1	3.0	10.9	6.3
6	0.9	2.1	0.8	7.5	16.5	12.2	7.5	12.8	11.5
7	2.6	3.0	1.6	6.3	16.4	16.9	6.3	8.8	12.3
8	2.4	4.1	1.6	6.9	14.7	18.0	6.9	9.3	11.6
9	1.7	5.3	1.6	10.8	17.7	11.7	10.8	11.8	8.2
10	0.7	1.6	0.5	0.8	11.3	6.6	0.8	9.0	4.7
11	0.4	0.7	1.5	4.3	9.3	3.0	4.3	7.0	2.1
12	0.8	1.0	1.4	3.1	6.4	3.6	3.1	3.9	1.8

De manera similar a lo que ocurre con la Temperatura, el modelo CCCM se aproxima más a los datos empleados por el MTC y, sin embargo, es el modelo GFDL-R30 quien sigue mejor las variaciones anuales, (Figuras 5, 6 y 7).

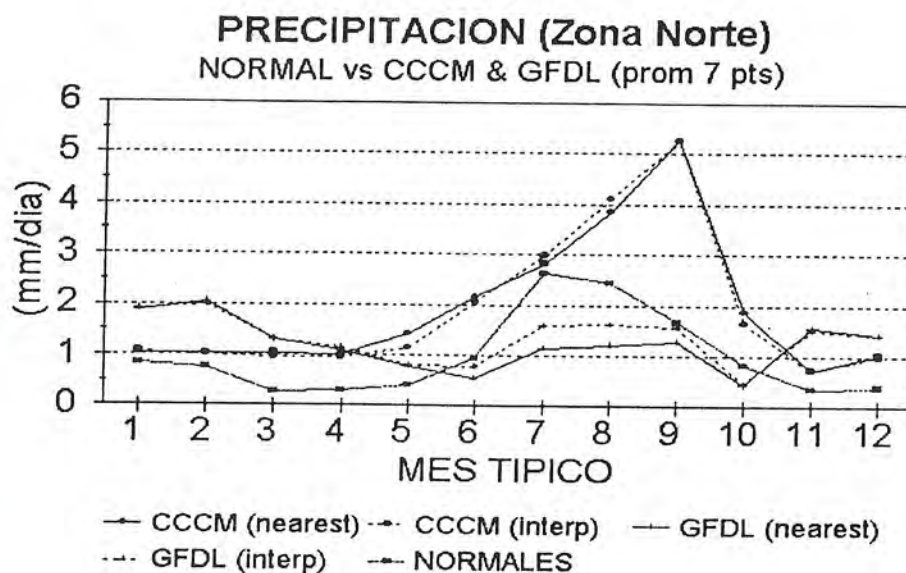


Figura 5. Comparación para la Zona Norte entre la Precipitación Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de $1\times CO_2$, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

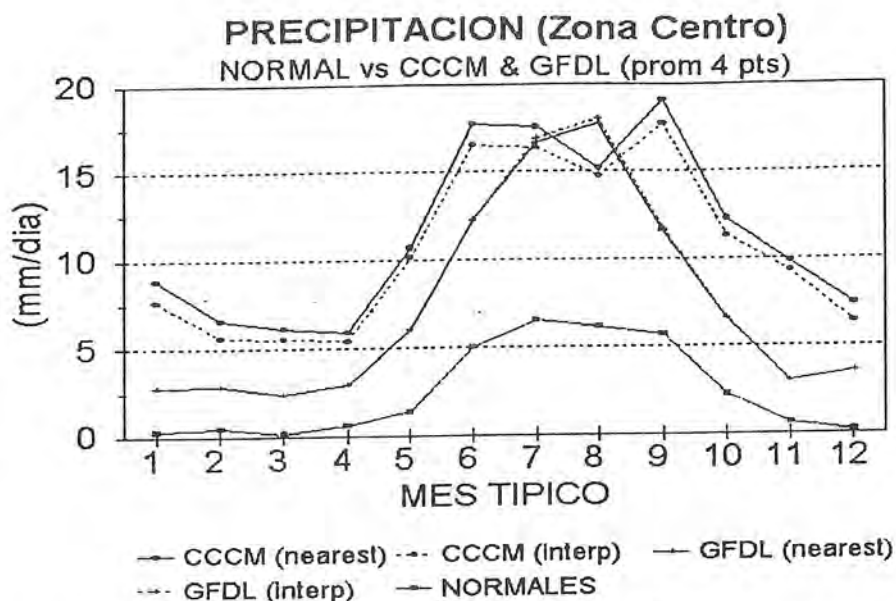


Figura 6. Comparación para la Zona Centro entre la Precipitación Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de $1xCO_2$, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

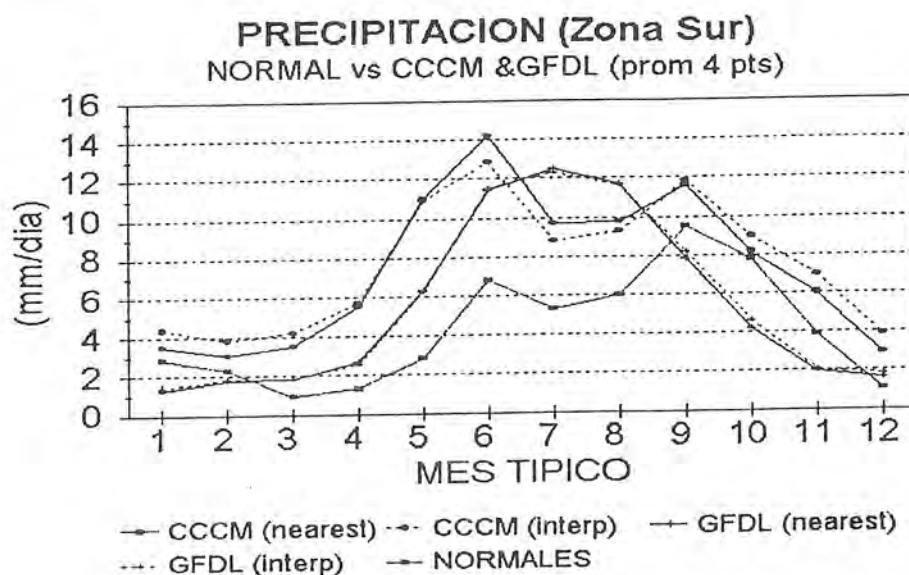


Figura 7. Comparación para la Zona Sur entre la Precipitación Normal mensual y las simulaciones de los modelos para condiciones de $1xCO_2$, ya sea interpolando o utilizando el punto más cercano.

Por último, presentamos un mapa con las regiones propuestas en la base de datos recopilados por el Dr. Arthur Douglas en el Meteorológico Nacional y que se obtuvieron de INTERNET¹

¹ ftp hurricane, ncdc.noaa.gov

(figura 8).

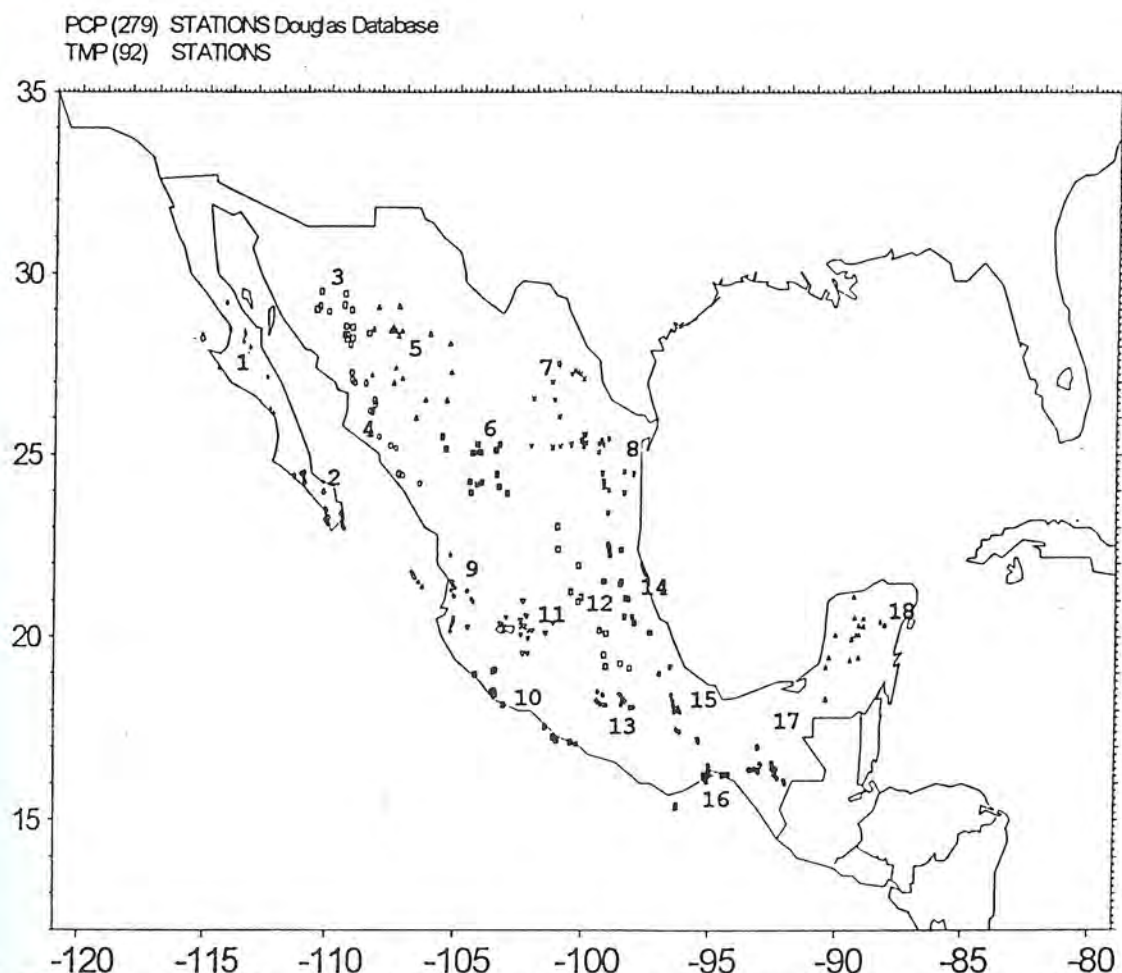


Figura 8. El mapa muestra las 18 regiones (o divisiones) propuestas por A. Douglas. Corresponden a 279 estaciones para la precipitación y a 92 estaciones para Temperatura.

Con estos datos el grupo de "Escenarios Físicos" está construyendo nuevos escenarios base, con un mayor número de puntos sobre el país y con un periodo mayor de años tratados. Los criterios empleados por Arthur Douglas se refieren al mayor número de estaciones con datos de largo periodo recuperables en un 95%. También se buscó que la altitud y la precipitación en ellas fuera semejante. Para ilustrar estas divisiones, mostramos como ejemplo 3 gráficas de los datos de promedios mensuales de largo periodo de Temperatura y Precipitación. La aplicación de estos datos para generar escenarios base se discute con más profundidad en el trabajo de Magaña V, en este mismo volumen.

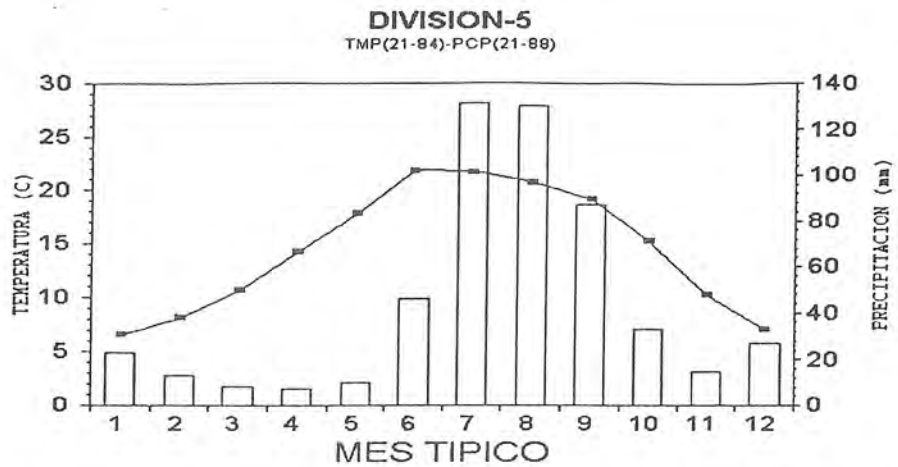


Figura 9. Promedios mensuales para todas las estaciones comprendidas en la división 5, según la fig. 8. El promedio para la temperatura (línea) se obtuvo para los años de 1921 a 1984. El correspondiente para precipitación (barra) se obtuvo para los años de 1921 a 1988.

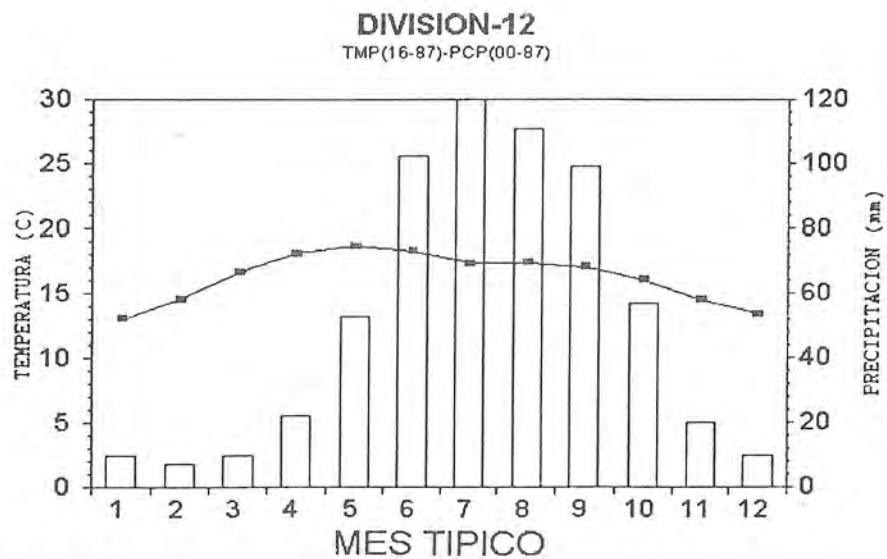


Figura 10. Semejante a la figura 9, pero para la división 12 y para los años que se indican.

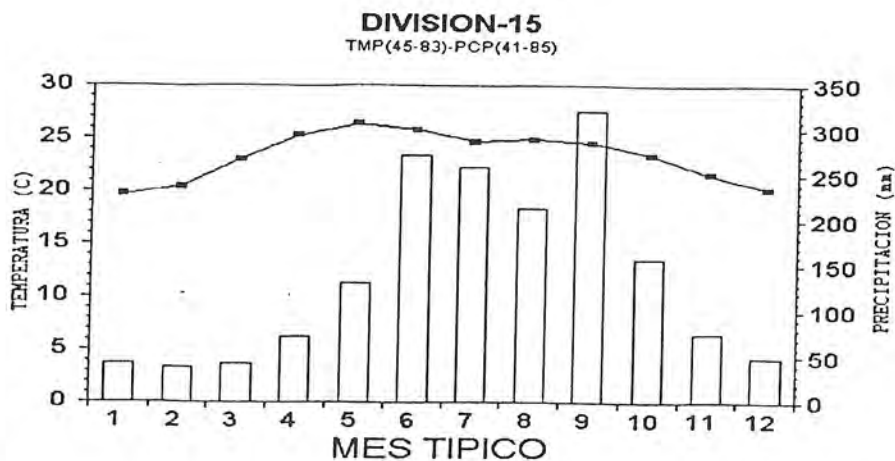


Figura 11. Semejante a la figura 9, pero para la división 15 y para los años que se indican

REFERENCIAS

- Conde, C., Sánchez, O., Gay, C., 1994a. Escenarios Básicos Y Regionales. Estudio de País: México. México ante el Cambio Climático. Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. Cuernavaca, Mor. pp 39-44.
- Conde, C., Sánchez, O., Gay, C., 1994b. Reporte Técnico #1. Estudio de País: México. Escenarios Físicos Básicos y Regionales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México.
- Magaña, V., 1995. Escenarios Físicos de Cambio Climático. Estudio de País: México. México ante el Cambio Climático. Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. Cuernavaca, Mor. (este volumen).

Climate change impacts and vulnerability in Mexico

DIANA LIVERMAN

Pennsylvania State University

In May 1995 northern Mexico was experiencing the worst drought in fifty years and temperatures significantly above normal. Many reservoirs were at less than 20% of their capacity, hundreds of cattle died, and thousands of hectares of land were not been planted. Unfortunately, this drought coincided with a serious economic crisis in Mexico. In January, the value of the peso fell precipitously and interest rates soared. Farmers could not afford to buy seeds and fertiliser and the poor found it difficult to buy adequate food. The withdrawal of subsidies associated with market liberalization and economic integration also contributed to the 1995 crisis in the Mexican countryside. Some suggested that food production might drop by 30%.

Although rains began in June, 1995 provided a distressing illustration of vulnerability to climatic change in Mexico and, in particular, of the way in which economic and political transformations can alter the experience of drought in agriculture. In this paper I will review the results of several research projects which analyse vulnerability to climate change and variability in Mexican agriculture. These projects include regional case studies of historical interactions between climate variability and agriculture, analyses of current economic trends and their impact on water availability, and work on the possible effects of global warming in Mexico.

Puebla

The regional case studies illustrate relationships between technology, land tenure, economic conditions, population growth and drought in rural Mexico. Several years ago I published a paper which showed that drought losses on cooperative ejido land in the state of Puebla, east of Mexico City, were significantly higher than those in private landownership during the 1970s (Liverman, 1990).

Drought loss is correlated not only with cooperative land tenure, but also with lack of irrigation, low input use, and low yields. Land reform, in the aftermath of the Mexican Revolution, has tended to give poorer quality, hazard prone, land to the cooperative ejidos. The 1990 agricultural census confirmed that agricultural losses on the ejidos tend to be higher than on private land.

However, fieldwork in the Puebla valley suggests that farmers who use modern agricultural technologies such as improved seeds and chemical fertilisers increase their yields but may also increase their drought vulnerability. Data from the Plan Puebla project shows that farmers who have begun to use purchased inputs of fertilizer and improved seeds did increase their yields but suffered greater relative losses in drought years such as 1982-83 and 1988.

The prices of inputs have increased with economic crises and the withdrawal of agricultural subsidies. Farmers go in to debt to purchase them, and a drought related harvest failure means that the farmer cannot repay credit and begins to accumulate long term debt. There is some evidence that farmers using traditional, non-purchased, inputs cope more easily with drought by using traditional moisture conserving technologies or by migrating temporarily to the city. They are not burdened with debt in the following year (Walsh, 1993).

Oaxaca

The valley of Oaxaca provides a second regional example of how relationship between climate

1995 DROUGHT LOSSES IN MEXICO

Nuevo Leon - 50% livestock loss

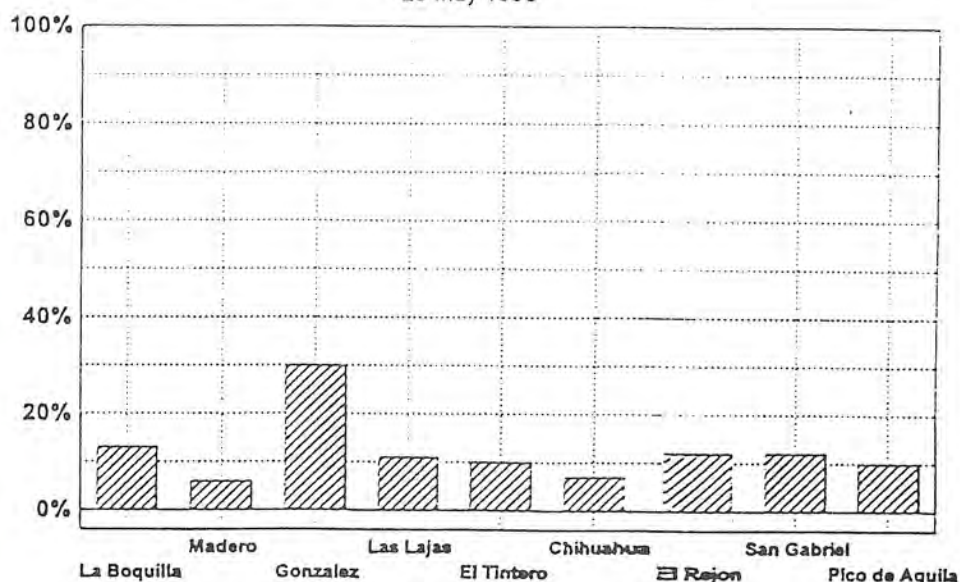
Coahuila - 80,000 hectares not planted

Campeche - 18 ejidos without drinking water

Chihuahua - 100,000 hectares not planted in Delicias irrigation district

Reservoir levels in Northern Mexico

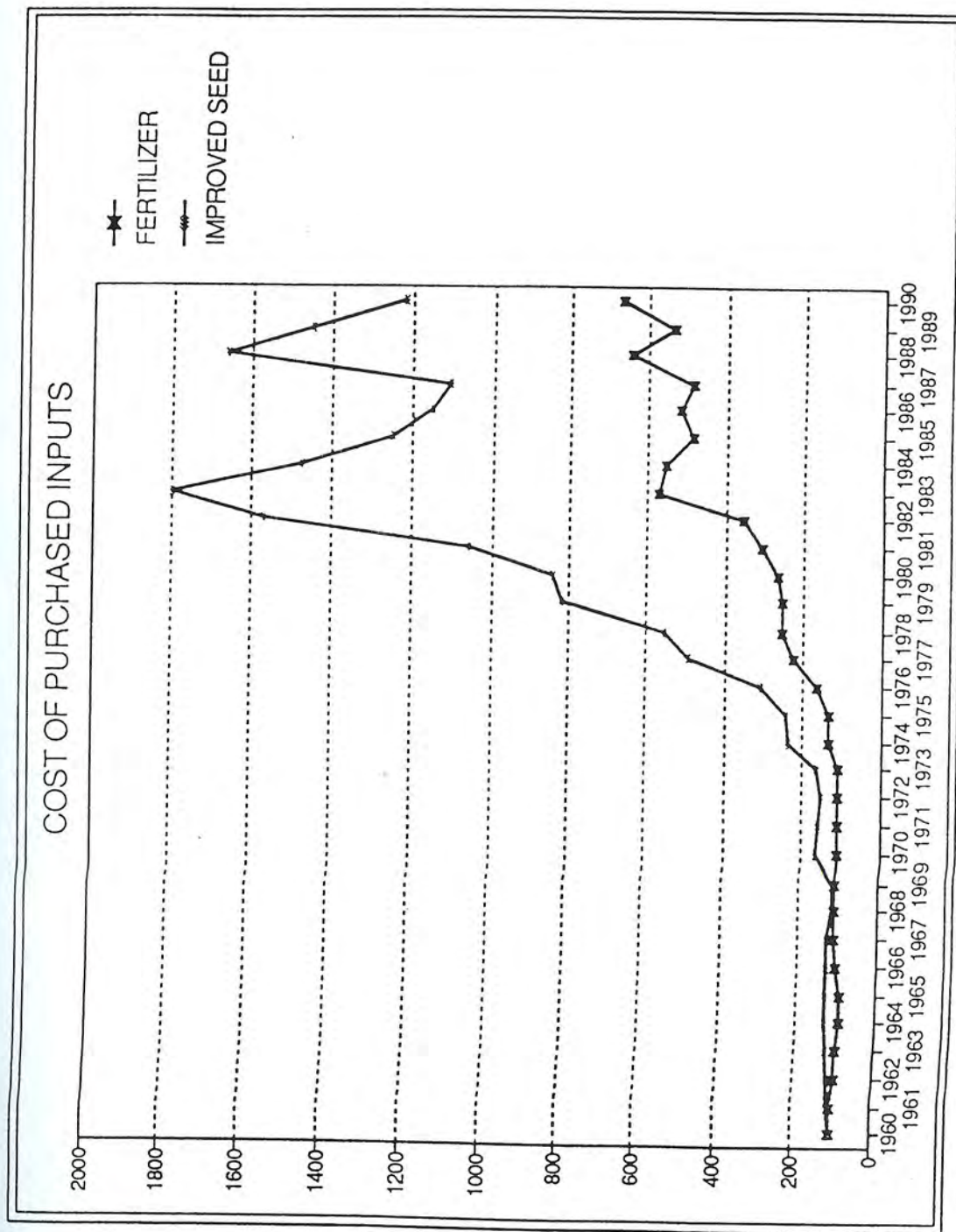
29 May 1995



HAZARD LOSSES AND LAND TENURE IN MEXICO

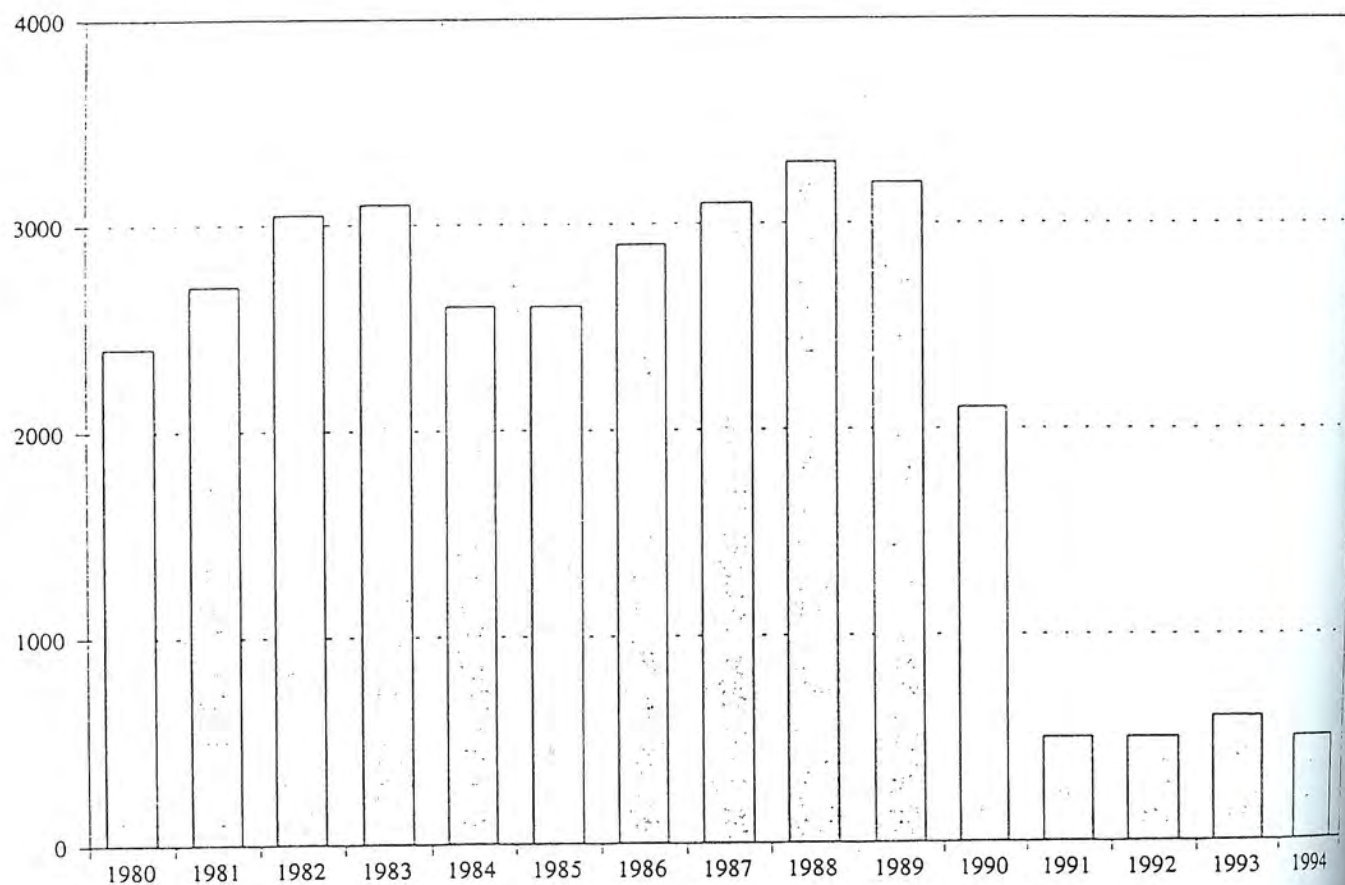
YEAR	PRIVATE	EJIDO
1930	15%	23%
1940	12%	17%
1950	10%	20%
1960	12%	18%
1970	27%	28%
1980	12%	15%

Percent of area sown but not harvested

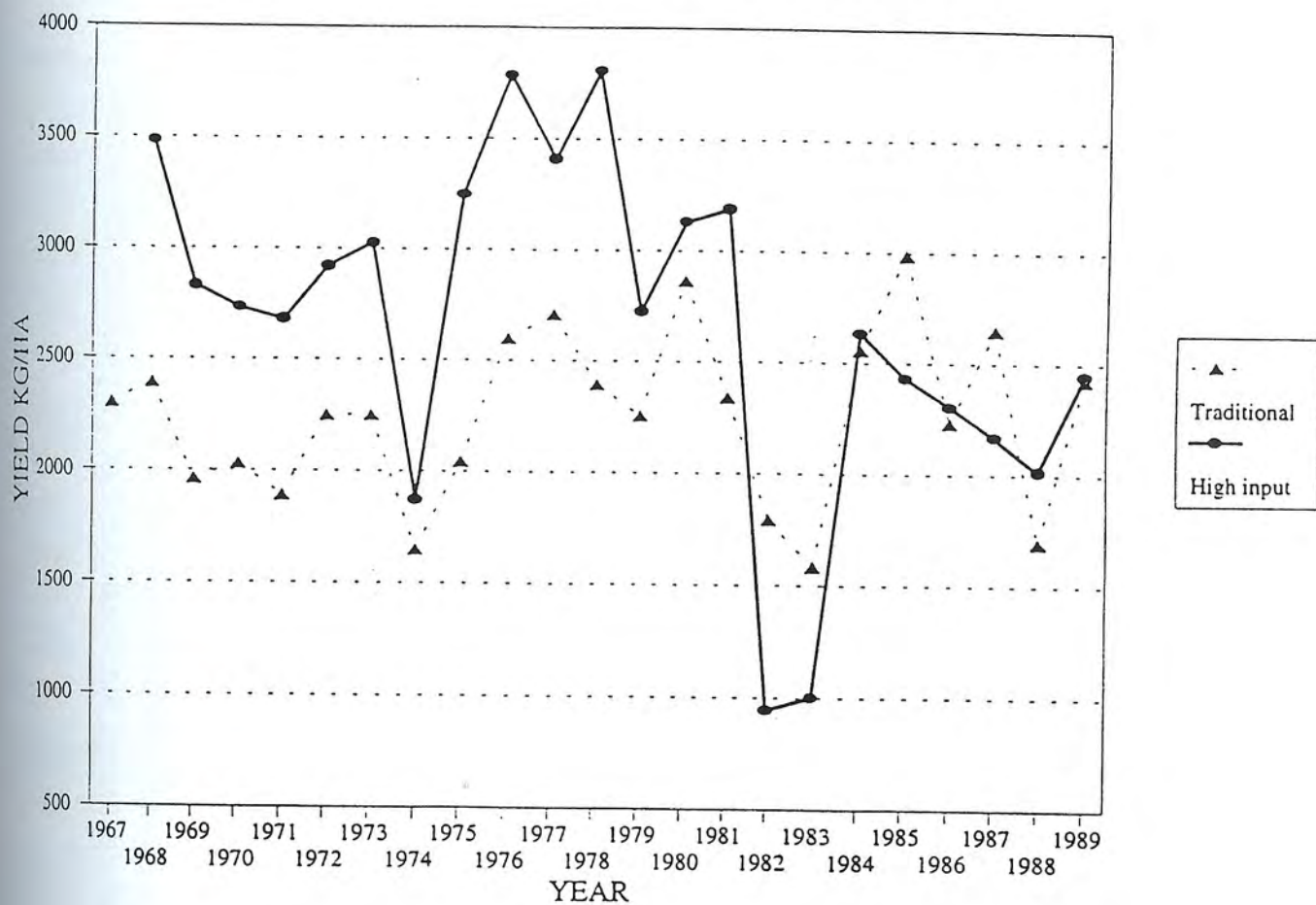


BANRURAL CREDIT (1000 HECTARES)

(Appendini and Liverman 1994)



PLAN PUEBLA MAIZE YIELDS



Los Promotores del TLC Manejaron mucho la idea de que las Agriculturas de los 3 países eran Complementarias. EU Tiene un Granero Natural en el Medio Oeste. Pero México Podría Exportar Hortalizas...

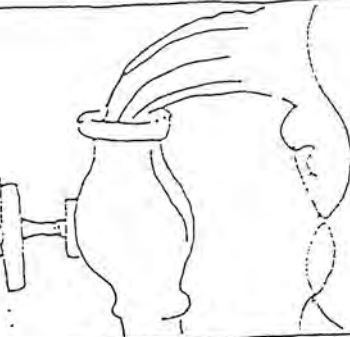
Pues Resulta Que:

1- Las Hortalizas Requieren de Mucha Agua...

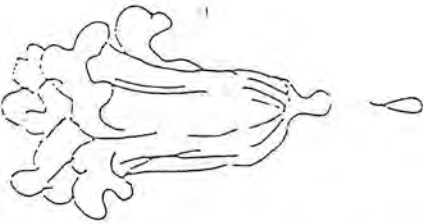


Mucha más Que lo Que Requieren Los Granos.

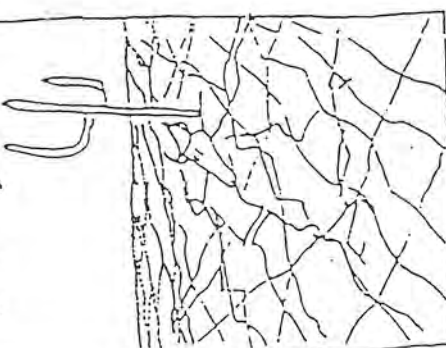
2- Para Producir las Industrialmente Se Requiere de Muchísima Agua.



3- Al Exportar Hortalizas México Exporta Su Agua.



4- Es To No Sería. Grave si México no Fuera un País con Tan Poca Agua.



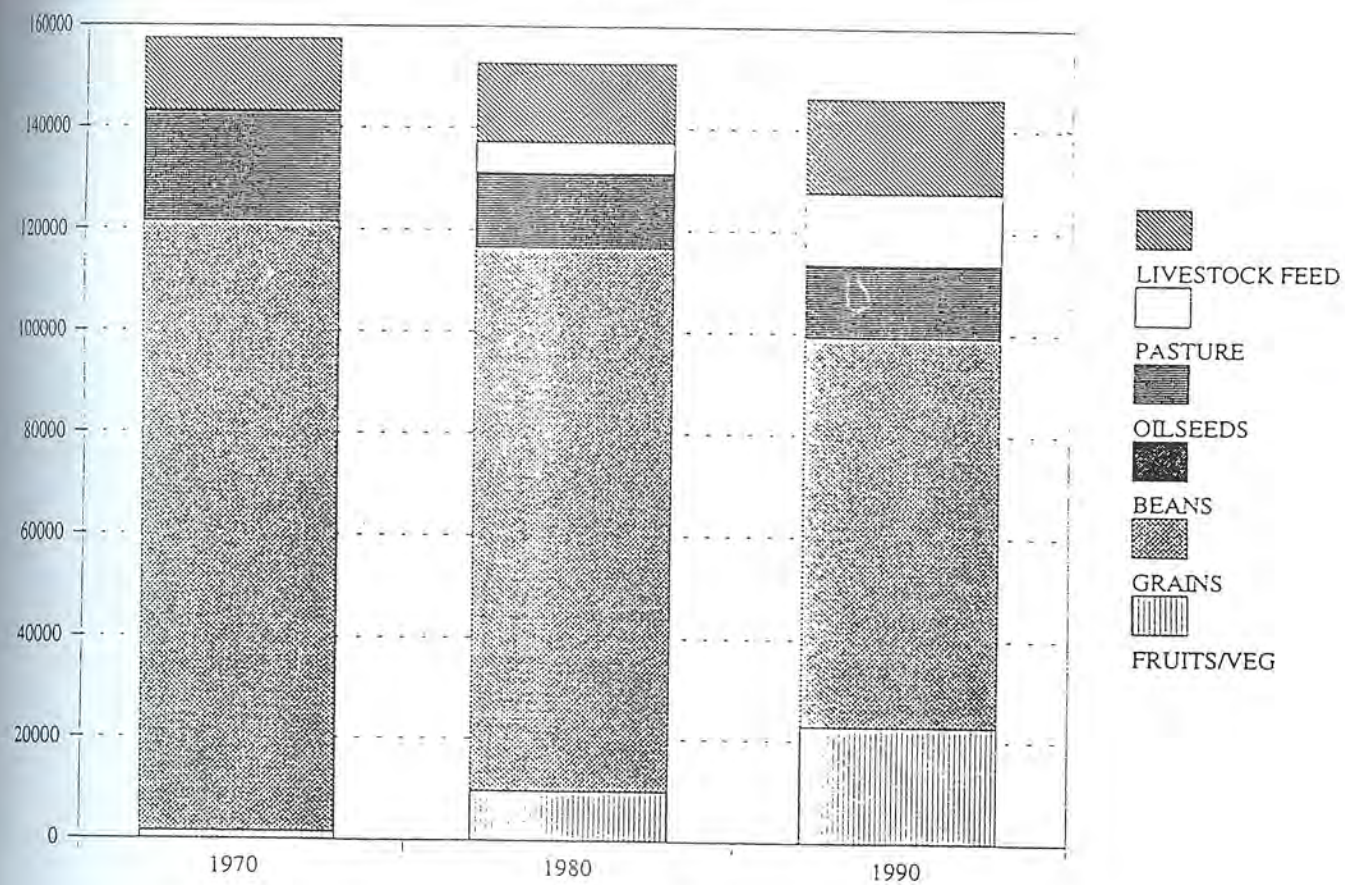
The promoters of NAFTA suggest that the agriculture of the 3 countries are complementary.

The US has a natural granary in the Midwest. But Mexico can export vegetables..... But

- (1) Vegetables need a lot of water...more than that required by cereals
- (2) To produce them commercially one requires a great amount of water
- (3) In exporting vegetables Mexico exports its water
- (4) This wouldn't be so serious except that Mexico is a country with so little water

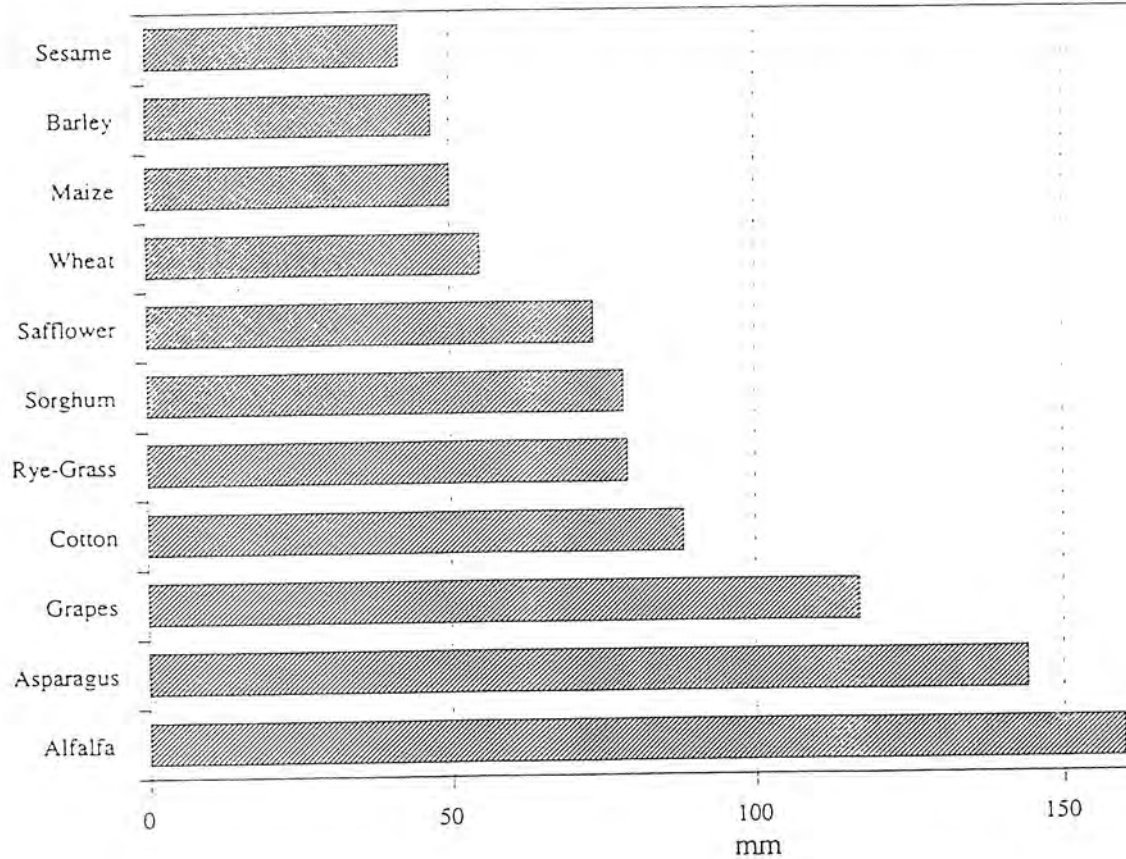
SAN LUIS RIO COLORADO

CROP MIX



RIO COLORADO IRRIGATION DISTRICT

CONSUMPTIVE USE OF CROPS



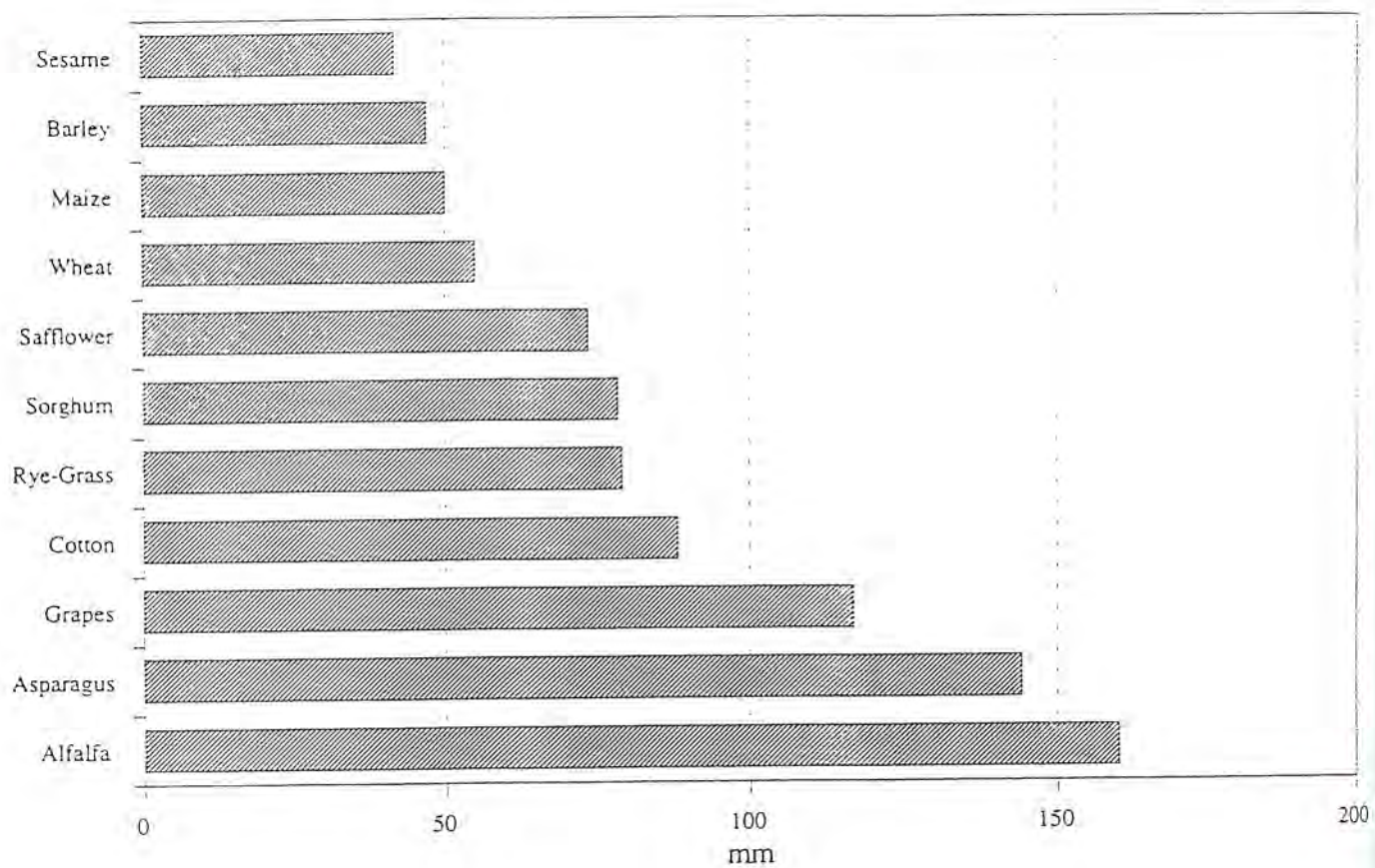
CLIMATE CHANGES IN CENTRAL MEXICO

	GISS	GFDL	UKMO
Temperature Deg C	+4.2	+2.7	+4.2
Precipitation %	-5	-11	-5
Potential Evaporation %	+10	+7	+10
Moisture Deficit %	-23	-23	-15

Source : Liverman and O'Brien (1991)

RIO COLORADO IRRIGATION DISTRICT

CONSUMPTIVE USE OF CROPS



CLIMATE CHANGES IN CENTRAL MEXICO

	GISS	GFDL	UKMO
Temperature Deg C	+4.2	+2.7	+4.2
Precipitation %	-5	-11	-5
Potential Evaporation %	+10	+7	+10
Moisture Deficit %	-23	-23	-15

Source : Liverman and O'Brien (1991)

CERES MODEL

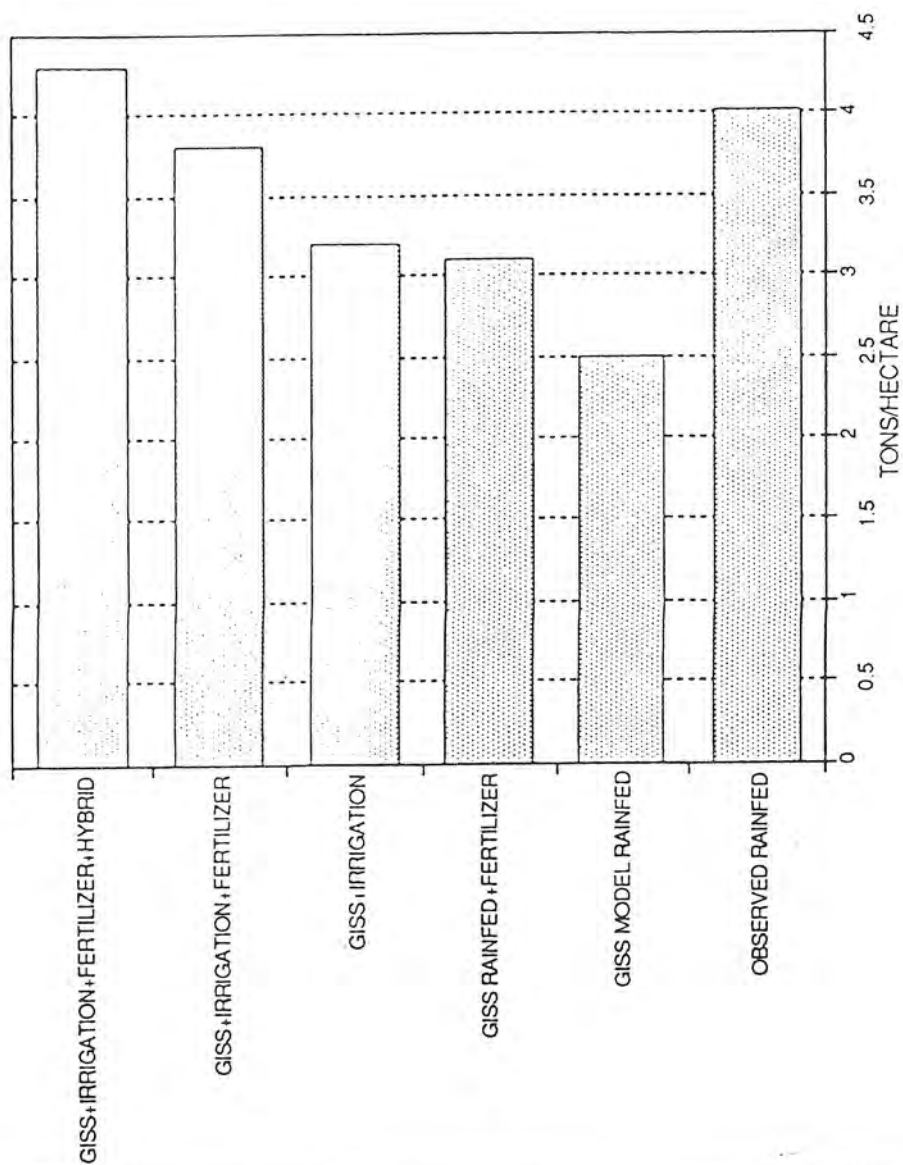
Inputs:

- Climate (daily temperature, solar radiation, precipitation),
- Soil (10 layer)
- Farm practices (irrigation, fertilizer, crop variety, planting density etc.)

EPA Project

- Validate model for selected sites and years
- Simulate yields with 30 years of observed climate data
- Sensitivity analysis (temperature+2, precipitation +/- 20%)
- Create global warming scenarios from GCM output (GISS, UKMO)
- Examine adaptation options (irrigation, fertilizer, planting date, crop variety)

CLIMATE IMPACT AND ADAPTATION TLALTIZAPAN, MEXICO



usual caveats about the uncertainty of using GCMs, we suggested that, at a site south of Mexico City, global warming could bring declines in rainfed maize yields of up to 40%, depending on the model (Figure 11).

We then examined whether farmers could adapt to these changes by switching varieties, irrigating or using more fertilizer. Simulating a fully irrigated, chemically fertilized, high yielding variety of maize produced higher yields under even the most stressful climate scenario (Figure 12).

However, given current economic conditions and the evidence of our historical case studies, most Mexican farmers would find it difficult to make such changes. They cannot afford to use very much fertilizer, purchase seeds every year, or irrigate their maize unless there are significant input subsidies and insurance to reduce risks.

Such issues have been underemphasized in the forthcoming Panel 3 report of the IPCC which uses aggregate economic models to argue that agricultural adaptation to climate will occur relatively easily and at low cost. Our Mexico research shows that farmers in some countries will have a very tough time adapting to climate change.

Conclusion

I would like to conclude in noting some ways in which vulnerability to climate variation and change might be reduced in Mexico and similar regions. Improved monitoring, modeling and forecasts of seasonal conditions - such as those related to El Niño - could help in water and agricultural planning. The use of seasonal forecasts is already showing benefit in North East Brazil and Southern Africa. There are moves to improve the efficiency of water use in Mexican cities and irrigation districts through infrastructural improvements, price adjustments, new institutions, information dissemination, and wastewater treatment. Plant breeders are developing improved varieties that are less dependent on expensive inputs and more drought resistant. There is some acknowledgement that the recent changes in economic and political structure in Mexico - for example in land tenure and agricultural subsidies - may have been too sudden and need to be more carefully adjusted to regional economic, social and environmental conditions.

REFERENCES

- Appendini K. and D. M. Liverman, Agricultural policy and climate change in Mexico. *Food Policy*. 19(2)
- Dilley, F. Brian, 1993. Climate change and agricultural transformation in the Oaxaca Valley, Mexico. Thesis (Ph.D Geography.)-Pennsylvania State University.
- Liverman, D.M. and K. O'Brien, 1991. Global Warming and Climate Change in Mexico, *Global Environmental Change*, 1(4):351-364, December 1991.
- Liverman, D.M., F.B. Dilley, K. O'Brien and L. Menchaca. 1992. The impact of global warming on Mexican Maize Yields. The Impacts of Climate Change on International Agriculture. EPA, Washington DC.
- Liverman D.M., 1992. The regional impacts of global warming in Mexico : Uncertainty, Vulnerability and Response. pp. 44-68 in J. Schmandt and J. Clarkson eds. The Regions and Global Warming. Oxford University Press.
- Liverman D.M., 1994. Vulnerability to global environmental change. Chapter 26. pp. 326-342 in S. Cutter ed. Environmental Risks and Hazards. Prentice Hall, Old Tappan, New Jersey.
- Lougy, Robert T., 1994. Agriculture and irrigation in Mexico's border states, historical changes and future challenges. Thesis (B.S. Geography)-Pennsylvania State University.
- Walsh Joan L., 1993. Climate, culture, and plan Puebla, Natural and social influences on subsistence farmers in Mexico. Thesis (B.A. Political Science)-Pennsylvania State University.

Lineamientos estratégicos y políticas de manejo del recurso suelo para el desarrollo sustentable

MANUEL ANAYA GARDUÑO

*Director de Investigación. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados.
Montecillo, México 56230. México*

RESUMEN

La degradación del recurso suelo representa varios procesos acumulativos y crecientes que repercuten negativamente en los aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales, y su gravedad se acentúa debido a que México cuenta con una de las mayores reservas mundiales de diversidad biológica. Desde el punto de vista social, se generan procesos de empobrecimiento, migración, desplazamientos internos y externos y deterioro de la calidad de vida de la población. Los usos del suelo que presentan diferentes grados de deterioro son los siguientes: forestal, pecuario, agrícola de temporal, agrícola de riego, vías de comunicación, explotaciones mineras, parques nacionales, reservas ecológicas y asentamientos humanos. Por lo tanto, México deberá enfrentar de manera integral los problemas de degradación de la tierra, promoviendo modelos de desarrollo sustentable, acordes con la realidad social, cultural, económica y ambiental.

A continuación se describen algunos lineamientos estratégicos para el manejo sostenible del recurso suelo:

1. Evaluación continua de los procesos de degradación del recurso suelo y de la pérdida de la productividad de los ecosistemas, así como de los programas de prevención, corrección y rehabilitación, dando especial atención a los de carácter preventivo.
2. Implementar planes rectores integrales y de desarrollo sostenible del recurso suelo a nivel de región, estado, municipio, comunidad y cuenca hidrográfica con la participación de los sectores sociales involucrados.
3. Generar y/o actualizar las leyes sobre el manejo integral y sostenible del recurso suelo, en sus diferentes usos (agrícola, pecuario, forestal, urbano, para infraestructura, parques nacionales y reservas, explotaciones mineras y petrolíferas y cuerpos de agua, tierras ociosas y otros), sobre criterios ecológicos basados en el conocimiento científico y en el tradicional.
4. Establecer una responsabilidad compartida entre todos los actores, Gobierno, Productores y Consumidores.
5. Establecer campañas masivas sobre sensibilización y concientización sobre el uso racional del recurso suelo a través de programas de educación productiva-ambiental a diferentes niveles: educación básica, media, profesional y de posgrado, así como la capacitación de productores, consumidores y tomadores de decisiones.
6. Iniciar y reforzar investigaciones socio-políticas sobre los mecanismos para tomar decisiones oportunas y eficientes para la planeación y ejecución de programas y proyectos que tiendan hacia el Desarrollo Sostenible a todos los niveles.
7. El uso sostenible del recurso suelo deberá estar apoyado con recursos financieros crediticios, puesto que los subsidios generalmente no son sostenibles para viabilizar la transferencia de tecnología apropiada.
8. Establecer la ordenación y la planificación integral a mediano y largo plazo del destino productivo de las tierras, en función de su aptitud, considerando a los actores: gobierno, productores y consumidores.

ABSTRACT

Degradation of the soil resource is related with several accumulative processes which influence negatively in the social, cultural, economic and environmental aspects, and the damage increases because Mexico has a huge reserve of biodiversity. Since the social point of view, processes of poverty, migration, and degradation of quality of life are taken place. Land use systems with different degradation levels are the following: forestry land, rangeland, rainfed agriculture, irrigated agriculture, roads, mining exploitation, national parks, ecological reserves, and human settlements. Mexico, should attack in an integral way land degradation problems, establishing models of sustainable development, related with social, cultural, economic and environmental realities.

Some guidelines and strategies for the sustainable management of the soil resource, are the following:

1. Continuous assessment of land degradation and loss of ecosystem productivity. Evaluation of preventive, corrective and rehabilitation measures.
2. Establishing master plans for sustainable development at national, state and municipal levels with social

participation.

3. Legislation on integral and sustainable management of the soil resource in all the different land use systems, as mentioned above, based on modern and traditional technologies.
4. Establishing a common responsibility between government, producers and consumers.
5. To launch massive campaigns to promote rational use of soils through education programs at different levels, and training programs for decision makers, consumers and producers.
6. Reinforce social and political research programs to take decisions on planning and development of programs and projects which promote sustainable development.
7. Sustainable use of the soil resource should be based on enough funds, reducing subsidies.
8. To establish integral planning considering short and long periods of time.

1. Introducción

México cuenta con extensas áreas vulnerables, severamente afectadas por la degradación de la tierra y/o la sequía, en las que se observan características heterogéneas dependiendo de la localidad en que se produzcan. La degradación de la tierra representa varios procesos acumulativos y crecientes que repercuten negativamente en los aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales, y su gravedad se acentúa debido a que el país cuenta con una de las mayores reservas mundiales de diversidad biológica (CONAZA, 1994).

La aplicación frecuente de modelos de desarrollo no congruentes con las condiciones ecológicas específicas de las zonas afectadas, además de la compleja interacción de factores físicos, biológicos, sociales, culturales, económicos y políticos, incluidos algunos factores económicos internacionales como el endeudamiento externo, el deterioro de la relación de intercambio y las prácticas comerciales que distorsionan los mercados internacionales de productos agrícolas, forestales y pesqueros, inducen a un creciente deterioro ambiental Anaya, 1994 (a).

Otra consecuencia se refiere a la severa reducción de la productividad de los ecosistemas, que es el principal resultado de la degradación de la tierra y la sequía, expresándose lo anterior en la disminución de los rendimientos agrícolas, forestales y pecuarios, así como en la pérdida de la diversidad biológica. Desde el punto de vista social, se generan procesos de empobrecimiento, migración, desplazamientos internos y externos y deterioro de la calidad de vida de la población. Los usos del suelo que presentan diferentes grados de deterioro son los siguientes: forestal, pecuario, agrícola de temporal, agrícola de riego, vías de comunicación, explotaciones mineras, parques nacionales, reservas ecológicas y asentamientos humanos. Por lo tanto, México deberá enfrentar de manera integral los problemas de la degradación de la tierra promoviendo modelos de desarrollo sustentable, acordes con la realidad social, cultural, económica y ambiental.

Los nuevos retos de la apertura comercial de productos agrícolas, forestales y pecuarios y la creación de nuevos modelos de desarrollo, aunados a las severas restricciones financieras pueden inducir a romper el equilibrio ecológico; por lo tanto es urgente establecer programas de acción a corto, mediano y largo plazo que conlleven al desarrollo sustentable.

1.1 Potencial y limitantes

Los problemas relativos a la degradación de la tierra y el fracaso para llegar a la solución integral, se ha debido a errores sobre las decisiones relacionadas con el uso y manejo del recurso suelo. Además, ha habido falta de políticas, directrices, lineamientos y programas de acción en forma continua. Han sido varias secretarías de estado las responsables de la planeación y manejo del recurso suelo. En la mayoría de los casos no se ha contado con la participación social para la solución al creciente problema de la degradación de la tierra Anaya, 1994 (b).

México cuenta con tecnología tradicional y autóctona, la cual combinada con el conocimiento moderno da las bases tecnológicas para resolver los problemas actuales en los diversos sistemas de uso de la tierra; existen numerosos proyectos exitosos en relación al uso, conservación y

aprovechamiento del suelo para el desarrollo sustentable Anaya, 1994 (c). El reto actual se refiere a como multiplicar las experiencias positivas con la idea de su aplicación masiva en los diversos ecosistemas; además, es urgente que exista una institución rectora sobre el aprovechamiento racional e integral del recurso suelo. Es necesario enfatizar que si no se cuenta con la entusiasta participación de las comunidades y de los usuarios de la tierra, será muy difícil disminuir la velocidad de degradación de la tierra que se tiene actualmente en el país.

1.2 Aspectos relevantes sobre el uso actual de la tierra

Existe una acelerada expansión del monocultivo en gran escala en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas, generando una masiva destrucción de habitat naturales, amenazando la biodiversidad de los mismos, sin que se realice evaluación de ese impacto.

Es común la extracción abusiva y sin control de ejemplares de especies nativas, de alto valor farmacológico, industrial o de otro carácter, sin pago de derechos y sin aportar el conocimiento científico, por el uso comercial de esos recursos genéticos estratégicos.

Existen a veces conflictos jurídicos entre la propiedad y el uso de un recurso natural.

Pueden detectarse indefiniciones y/o abusos en el uso ilegal en propiedades cuyo dominio no esta definido o mal vigilado.

Se dan casos de la propiedad y el monopolio de los recursos hídricos compartidos.

Es común la destrucción de los refugios de animales y vegetales en peligro de extinción.

Es demasiado frecuente el caso de jurisdicciones territoriales que disponen de leyes, normas y reglamentos ambientales adecuados para la conservación de sus recursos naturales, en las cuales sin embargo, fallan o son ineficaces los mecanismos de su aplicación y control.

1.3 Aspectos de gestión de gobierno

Es frecuente la insensibilidad y falta de voluntad política de las autoridades a todos los niveles frente a acuciantes problemas ambientales, sin tener presente el impacto catastrófico a que conduce esa desatención.

Las instancias decisorias de gobierno se manejan en general con una falta de información técnica y científica sobre los recursos naturales y el ambiente y la realidad socioeconómica de la población.

Faltan incentivos y estímulos a productores y pobladores rurales, como son programas de financiamiento crediticio, que viabilicen la transferencia de tecnología apropiada.

Es frecuente encontrar una carencia de planes rectores integrales y de desarrollo, que coordinen y organicen la investigación, extensión, financiamiento, infraestructura y evaluación de conjunto. Algunos han surgido sin la consulta ni participación de los sectores sociales que involucran.

Es común la carencia de programas de educación ambiental y de capacitación en manejo de recursos naturales a todos los niveles, particularmente de productor, coordinados con planes de desarrollo.

Desde el punto de vista social, se generan procesos de empobrecimiento, migración, desplazamientos internos y deterioro de la calidad de vida de la población.

IMPACTO SOCIAL Y ECONOMICO DE LA DEGRADACION DE LA TIERRA

La Figura 1 muestra la desertificación global en México, es decir la causada por procesos físicos, químicos y biológicos; es preocupante analizar que más del 90% del territorio nacional se encuentra afectado, en diferentes niveles, y que la velocidad de degradación es cientos de veces mayor que la de recuperación.

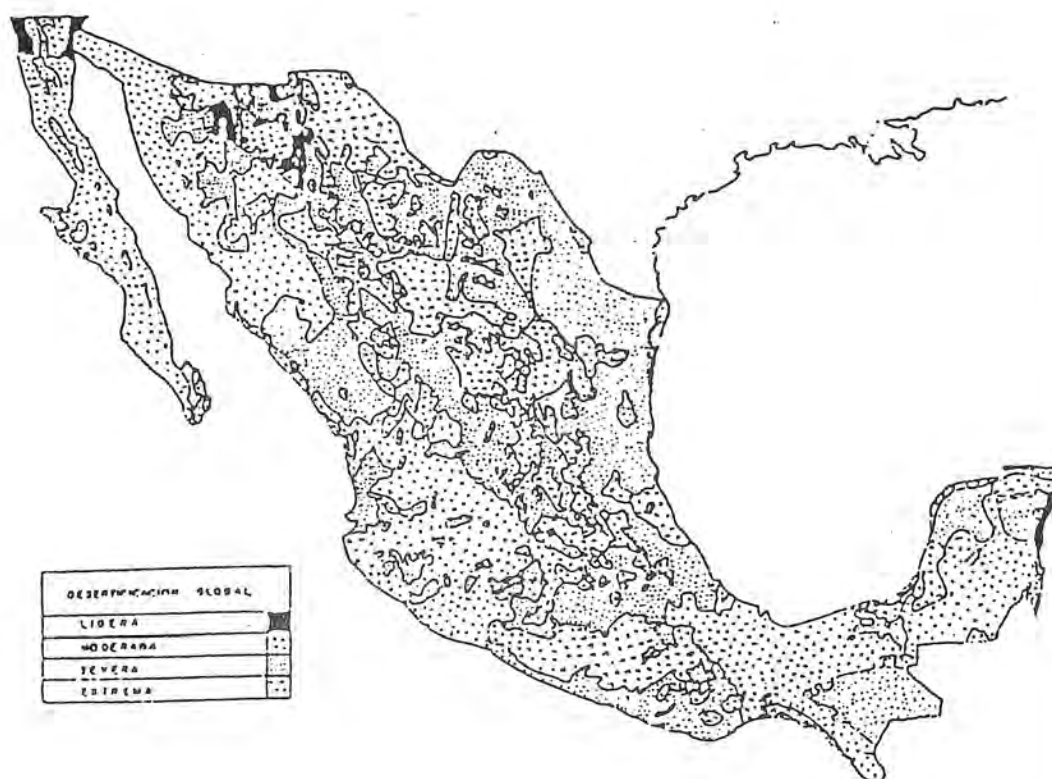


Figura 1. Desertificación global de la República Mexicana. (CONAZA, 1994)

La figura 2 muestra las zonas con mayores problemas nutricionales en México. Es conveniente señalar que los problemas más grandes se presentan donde los procesos de degradación de la tierra son más agudos. Lo anterior indica la necesidad de sobreponer mapas de indicadores sociales y económicos sobre los de degradación de la tierra. Los indicadores más importantes son los siguientes: niveles de nutrición, consumo de proteínas, consumo de carbohidratos, nivel infantil.

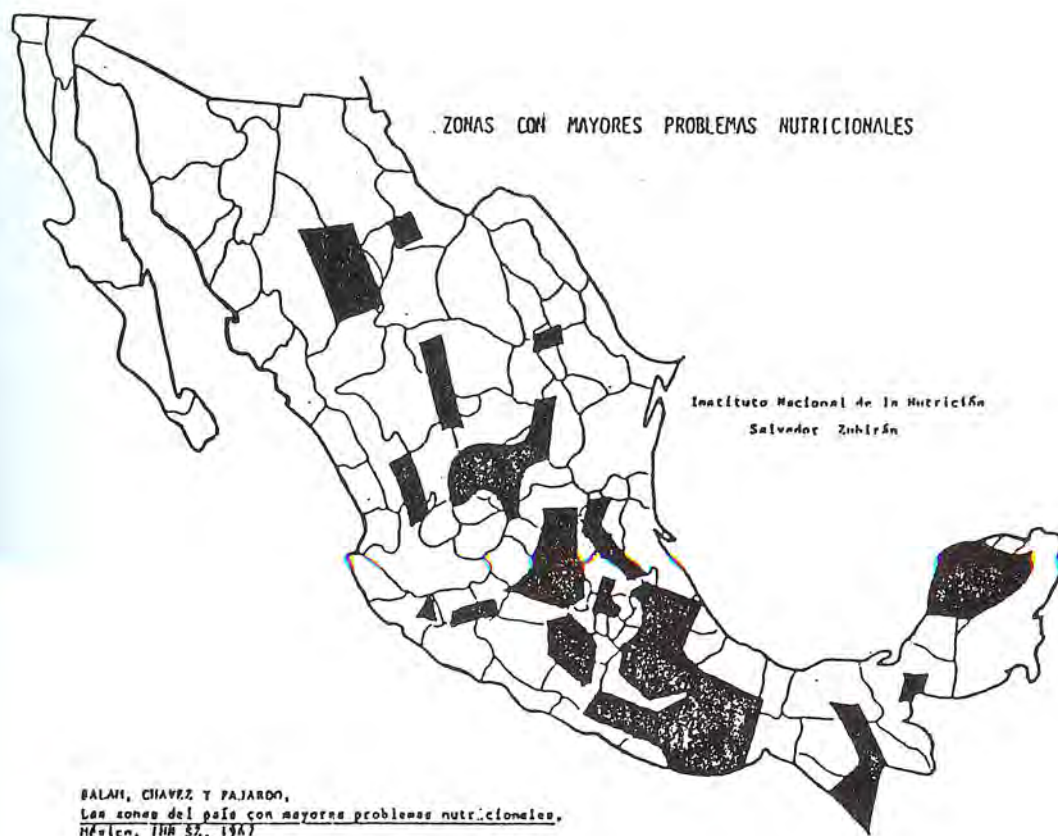


Figura 2. Zonas con Mayores Problemas Nutricionales. (Roldan *et al.*, 1988)

II. Lineamientos estratégicos para establecer medidas preventivas, correctivas y de rehabilitación

2.1 Manejo Integral del Recurso Suelo

2.1.1 Combate a la Degradación de la Tierra

Evaluar el impacto de los Procesos de la Degradación de la Tierra y de la pérdida de la productividad de los ecosistemas, así como de los programas de prevención, corrección y rehabilitación, dando especial atención a los de carácter preventivo.

Llevar a cabo talleres de intercambio de experiencia y con métodos de transferencia de tecnología acorde a las condiciones sociales, culturales, económicas y ambientales.

Impulsar un desarrollo tecnológico y científico apropiado para inducir la transición hacia el desarrollo sostenible. La participación de la comunidad y de los usuarios de la tierra será indispensable.

2.1.2 Legislación y normatividad

Planificar, legislar, normar y reglamentar el manejo integral del recurso suelo, estableciendo

acciones específicas para cada región.

Implementar planes rectores integrales y de desarrollo sostenible del recurso suelo a nivel de región, estado, municipio, comunidad y cuenca hidrográfica con la participación de los sectores sociales involucrados.

Generar y/o actualizar las leyes sobre el manejo integral y sostenible del recurso suelo, en sus diferentes usos (agrícola, pecuario, forestal, urbano, para infraestructura, parques nacionales y reservas, explotaciones mineras y petrolíferas y cuerpos de agua, tierras ociosas y otros), sobre criterios ecológicos basados en el conocimiento científico y en el tradicional.

2.1.3 Sensibilización y concientización

Promover la participación y corresponsabilidad de los sectores público, privado y social en las tareas del manejo integral del recurso suelo (establecimiento del Consejo Técnico Consultivo para el Manejo Integral del Recurso Suelo).

Elaboración de acuerdos de coordinación y concertación con autoridades y particulares.

Establecer una responsabilidad compartida entre todos los sectores, gobierno, productores y consumidores.

Establecer campañas masivas sobre sensibilización y concientización sobre el uso racional del recurso suelo a través de programas de educación productiva-ambiental a diferentes niveles: educación básica, media, profesional y de posgrado, así como la capacitación de productores, consumidores y tomadores de decisiones.

Celebración de convenios a nivel local, nacional e internacional.

2.1.4 Ordenamiento y planificación integral

Iniciar y reforzar investigaciones socio-políticas sobre los mecanismos para tomar decisiones oportunas y eficientes para la planeación y ejecución de programas y proyectos que tiendan hacia el desarrollo sostenible a todos los niveles.

El uso sostenible del recurso suelo deberá estar apoyado con recursos financieros crediticios, puesto que los subsidios generalmente no son sostenibles para viabilizar la transferencia de tecnología apropiada.

Establecimiento de infraestructura y recursos humanos, para poder aplicar la tecnología, educación y financiamiento en programas y proyectos.

Lograr que los mercados externos no desquicien la productividad de los ecosistemas y las políticas establecidas.

Diseño y operación de incentivos fiscales o sanciones indistintamente para fomentar el manejo racional del recurso suelo.

Establecer la ordenación y la planificación integral a mediano y largo plazo del destino productivo de las tierras, en función de su aptitud, considerando a los actores: gobierno, productores y consumidores.

De lo anterior se concluye que los programas de acción en relación al uso y aprovechamiento integral del recurso suelo en México han sido deficientes, en relación a los aspectos siguientes:

- Voluntad y decisión política.
- Legislación.
- Normatividad.
- Regulación del mercado interno y externo.
- Educación y sensibilización a todos los niveles.

- Descentralización del sistema federal.
- Participación de los usuarios de la tierra y de las comunidades.
- Utilización de la tecnología tradicional y autóctona.
- Planes rectores a nivel estatal y nacional y
- Financiamiento

2.2 Lineamientos estratégicos: prioridades, objetivos y propósitos

Es necesario definir las áreas temáticas para la aplicación de estrategias para prevenir y combatir la degradación de la tierra y la mitigación de los efectos de la sequía. A continuación se mencionan las áreas prioritarias.

- Erradicación de la pobreza y mejoramiento de la calidad de vida humana.
- Aumento de las capacidades, la educación y la concientización pública y la cooperación técnica.
- Logro de la seguridad alimentaria y desarrollo sostenible de actividades agrícolas, forestales y pesqueras.
- Gestión sostenible del recurso suelo y de los diversos ecosistemas relacionados.
- Manejo racional y conservación del recurso suelo en concordancia con el uso de los recursos agua y planta.
- Establecimiento y/o fortalecimiento de sistemas de información, evaluación y seguimiento considerando los aspectos climatológicos, meteorológicos, hidrológicos, biológicos, edafológicos, económicos, sociales y culturales.
- Aspectos demográficos interrelacionados con los procesos de degradación de la tierra y
- Establecimiento y/o fortalecimiento de marcos institucionales y jurídicos que permitan la aplicación de estrategias y de programas. Entre otros, la descentralización de las estructuras y funciones administrativas que guarden relación con la degradación de la tierra, asegurando la participación de las comunidades afectadas y de la sociedad en general con el objeto de que se considere al suelo como un patrimonio de las generaciones futuras.

2.3 Políticas de acción para lograr la transición hacia el manejo sustentable del recurso suelo

2.3.1 Fomento de capacidades, educación y sensibilización del público

Es necesario establecer el fomento de capacidades, esto es, del desarrollo institucional, la formación y la ampliación de las capacidades a nivel nacional, estatal, municipal y local, para los esfuerzos sobre la prevención y control de la degradación de la tierra. Esto se puede lograr a través de:

- a. La plena participación de la población a todos los niveles, especialmente a nivel local, en particular de las mujeres y los jóvenes, con la cooperación de las organizaciones no gubernamentales y locales
- b. El establecimiento de los servicios de apoyo y extensión con el fin de difundir más efectivamente las correspondientes estrategias tecnológicas, mediante la capacitación de extensionistas y/o miembros de organizaciones rurales para que puedan aplicar enfoques de participación a la conservación y el uso sustentable del recurso suelo.
- c. El fomento del uso y la difusión de los conocimientos, la experiencia y las prácticas tradicionales de la población local en los programas de cooperación técnica donde sea posible.

- d. El funcionamiento más eficaz de las instituciones y estructuras jurídicas, así como el fortalecimiento de la planificación y la gestión estratégicas.
- e. Un examen interdisciplinario de la capacidad y los servicios disponibles a nivel local, estatal y nacional, así como de las posibilidades de reforzarlos.
- f. Establecimiento de continuas campañas de sensibilización dirigidas al público en general.
- g. Estímulo de las asociaciones que contribuye a sensibilizar al público.
- h. Ampliación de los programas de educación y de instrucción elemental, en la conservación, el uso y la gestión sostenible de los recursos naturales de las zonas afectadas.
- i. Reforzamiento de las redes de educación, capacitación e investigación para combatir la degradación de la tierra a través de programas interdisciplinarios.

2.3.2 Propuestas de políticas de acción

La política a varios niveles debe estar dirigida a garantizar el balance permanente entre los componentes ambientales, sociales, culturales y económicos. Para que ésta sea funcional, se deberá establecer una responsabilidad compartida entre todos los actores, gobierno, productores y consumidores (Anaya, 1995).

Una herramienta básica del desarrollo sostenible es el planeamiento a mediano y largo plazo del destino productivo de las tierras, en función de su aptitud. Este deberá ser definido a partir de un inventario de los recursos naturales de cada región, tales como los bióticos, los hidráulicos, los edáficos y humanos, enmarcados en su contexto geográfico. Este planeamiento deberá incluir el establecimiento de distintas categorías de ocupación y uso de las tierras, como zonas silvestres protegidas, zonas de ocupación extensiva y uso controlado del recurso natural, zonas agrícolas y urbanas.

Las políticas deberán tener gran cuidado de los efectos negativos derivados de las prácticas en países desarrollados u organismos internacionales, por lo cual la política de desarrollo a nivel nacional deberá estar coordinada con el mercado interno y a la vez apoyada por tratados internacionales para lograr que los mercados externos no desquicien los lineamientos establecidos.

Debe impulsarse un desarrollo tecnológico y científico apropiado a las condiciones ambientales, sociales y económicas de las diversas regiones, para asegurar el uso sostenible. Aunado a esto, se debe apoyar la educación productiva-ambiental a diferentes niveles: educación básica, media, profesional y de posgrado, así como la capacitación de productores, consumidores y tomadores de decisiones. Esto permitirá el establecimiento de infraestructura y recursos humanos, para poder aplicar la tecnología, educación y financiamiento en programas concretos.

Se requiere iniciar y reforzar investigaciones socio-políticas sobre los mecanismos más apropiados para tomar decisiones oportunas y eficientes, para la planeación y ejecución de programas de desarrollo sostenible a todos los niveles, desde el productor y la comunidad, hasta aquellas decisiones cuyos efectos sean nacionales e internacionales. La producción sostenible deberá estar apoyada con recursos financieros crediticios, puesto que los subsidios generalmente no son sostenibles. Las fuentes de esos recursos ya sean de origen nacional e internacional, deberán en todos los casos ser apropiados y oportunos para los sistemas de producción comerciales y tradicionales.

En casos en que la presión de la población rural sea causa de creciente empobrecimiento y degradación de los recursos naturales, deberán adoptarse medidas que conduzcan a resolver la situación, dando especial atención a las de carácter preventivo.

2.4 Programas de acción a nivel nacional

El objetivo de los programas de acción a nivel nacional consiste en determinar cuáles son los factores que contribuyen a la desertificación y las medidas prácticas necesarias para luchar

contra ella y mitigar los efectos de la sequía.

Los programas de acción a nivel nacional deben especificar las respectivas funciones del gobierno, las comunidades locales y los usuarios de la tierra, así como determinar los recursos disponibles y necesarios. Entre otras cosas, los programas de acción nacionales:

- a. Incluirán estrategias a largo plazo para luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía, destacarán el aspecto de la ejecución y estarán integrados con las políticas nacionales de desarrollo sostenible.
- b. Tendrán en cuenta la posibilidad de introducir modificaciones en respuesta a los cambios de las circunstancias y serán lo suficientemente flexibles a nivel local para adaptarse a las diferentes condiciones socioeconómicas, biológicas y geofísicas.
- c. Prestarán atención especial a la aplicación de medidas preventivas para las tierras aún no degradadas o sólo levemente degradadas.
- d. Reforzarán la capacidad nacional en materia de climatología, meteorología e hidrología y los medios de establecer un sistema de alerta temprana de la sequía.
- e. Promoverán políticas y reforzarán marcos institucionales para fomentar la cooperación y la coordinación, en un espíritu de asociación, entre la comunidad de donantes, los gobiernos a todos los niveles, las poblaciones locales y los grupos comunitarios, y facilitarán el acceso de las poblaciones locales a la información y tecnología adecuadas.
- f. Asegurarán la participación efectiva a nivel local, nacional y regional de las organizaciones no gubernamentales y las poblaciones locales, tanto de mujeres como de hombres, especialmente de los usuarios de los recursos, incluidos los agricultores y pastores y sus organizaciones representativas, en la planificación de políticas, la adopción de decisiones, la ejecución y la revisión de los programas de acción nacionales.

Conclusiones

Debido a que la degradación de la tierra es cientos de veces mayor que la recuperación, deberá buscarse la participación entusiasta y coordinada de la población, de los técnicos e investigadores y de los tomadores de decisiones. Le llevará a México, al menos cinco décadas, igualar la velocidad de degradación con la velocidad de recuperación.

BIBLIOGRAFIA

- Anaya, G. M., 1994a. La Relación desertificación-migración en México: problemática y soluciones. Simposio Internacional Sobre Desertificación y Migraciones. Almería, España.
- Anaya, G. M., 1994b. Principles and Strategies to Prevent, Combat and Control Desertification. X Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Vol 3 Pags. 361-366, Acapulco, Guerrero, México.
- Anaya, G. M. 1994c. Policies for Prevention and Fight Against Desertification in Mexico. Energy, Environment, and Resources Center. The University of Tennessee, Stadium Hall, Knoxville, USA. Rev. FORUM.
- Anaya, G. M., 1995. International food Policy Research Institute. (1995) Workshop on "Land Degradation in the Developing world: Implications for food, Agriculture, and Environment to the year 2020". Abril 4-6, 1995. Annapolis, Maryland, E.U.A.
- Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA), 1994. Plan de Acción para Combatir la Desertificación en México, (SEDESOL), México, D. F., 160 págs. al
- Roldán A., 1988. Geografía del hambre en México, Instituto Nacional de Nutrición, Tlalpan, D. F., México, 47 págs.
- Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), 1995. Taller Sobre el Manejo Sustentable del Suelo en Regiones Subhúmedas y Semiáridas de América Latina y

el Manejo Sustentable del Suelo en Regiones Subhúmedas y Semiáridas de América Latina y el Caribe. Cocoyoc, Morelos. Febrero 13-17.

Vulnerabilidad a la desertificación por erosión eólica

Vulnerability to desertification by wind erosion

RAFAEL ZARATE ZARATE

*Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario de Occidente
Manuel M. Diéguez 119, S.H. C.P. 44680. Guadalajara, Jalisco. Tel/Fax: (+3) 615-17-29*

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el objeto de evaluar la vulnerabilidad a la desertificación por erosión eólica en el Estado de México. El procedimiento de evaluación se basó en el uso de la cartografía generada por el INEGI a escala 1:250,000, referente a: fisiografía, topografía, suelo y vegetación; además de información climática a nivel mensual, mediante la elaboración de una base de datos conforme al esquema SOTER. Posteriormente se aplicó la Ecuación de Pérdida de Suelo por Erosión Eólica (EPSEE) a pequeña escala. Los resultados obtenidos indican que la erosividad eólica constituye un factor importante de riesgo de desertificación durante la época seca del año, debido a que se presentan valores con intensidad de 620. El riesgo potencial se manifestó sólo en tres clases: severo (76%), moderado (20%), extremo (4%). En tanto que del riesgo actual se apreciaron cinco clases: nulo (35%), severo (32%), moderado (27%), extremo (5%), bajo (1%).

Palabras clave: Vulnerabilidad, Desertificación, Erosión Eólica, Estado de México.

ABSTRACT

This research was carried out for the purpose of evaluate the vulnerability at desertification due to wind erosion in the State of Mexico. The evaluation procedure was based on the use of cartography generated by the INEGI at 1:250,000 scale, with respect to: physiography, topography, soil and vegetation; besides of climatic information at monthly level, through the elaboration of a database according to the SOTER scheme. Subsequently the Equation of Loss Soil by Wind was applied at small scale. The obtained results indicates eolic erosivity constitutes an important factor of desertification risk during the dry period of the year, due to is introduced value with an intensity of 620. The potential risk was only manifested in three classes: severe (76%), moderate (20%), extreme (4%). On the other hand, the present risk shows five classes: null (35%), severe (32%), moderate (27%), extreme (5%), low (1%).

Key words: Vulnerability, Desertification, Wind Erosion, State of Mexico.

1. Introducción

Los objetivos planteados en este trabajo fueron: a) evaluar y cartografiar el riesgo actual y potencial de erosión eólica y b) seleccionar áreas con características ecológicas similares para su utilización como criterio discriminatorio en la dirección de planes de acción para la prevención de la desertificación por erosión eólica en el Estado de México.

Esta investigación se realizó considerando los supuestos siguientes:

- a. Los procedimientos empleados para la elaboración de la cartografía y cuantificación de este tipo de proceso de degradación de la tierra, proporcionan resultados preliminares, cuya veracidad necesita ser validada en campo, con el auxilio de herramientas empíricas y estadísticas detalladas.
- b. La información climatológica proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, es confiable para la obtención del factor climático necesario para evaluar este tipo de proceso de degradación.
- c. La cartografía elaborada por el INEGI y los Institutos de Geología y Geografía de la UNAM, es confiable para la generación de los factores necesarios para la utilización del modelo paramétrico usado en la evaluación del riesgo actual y potencial de erosión eólica.

2. Revisión de literatura

En ausencia de un conocimiento científico adecuado y con la persistencia de tradiciones antiecológicas en una comunidad, la población tiende a sobre-explotar los recursos naturales, lo cual genera desbalances ecológicos (FDMA, 1982).

La presión ambiental puede ser considerada en tres procesos: sequía, desecación y degradación de la tierra (desertificación), cuyos efectos son la reducción de la sostenibilidad del ecosistema y la capacidad del ambiente para soportar las actividades humanas (Wangati, 1992).

Como procesos de degradación de la tierra, se pueden entender a los fenómenos que causan la disminución o pérdida de la calidad de la tierra para sostener vida animal y/o vegetal. Estos reaccionan de acuerdo a una variación en el uso, calidad y productividad de la tierra (FAO, 1980).

El fenómeno de degradación de la tierra, se constituye de tres grandes grupos de tipos de procesos (Dregne, 1985; Oldeman, 1988), que son los siguientes:

- a. Degradación de la cubierta vegetal. Definido como la eliminación o la destrucción de las plantas por diversos agentes, siendo en la mayoría de los casos iniciados y acelerados por el hombre, al provocar desequilibrios en un ecosistema natural estable (FAO, 1984).
- b. Degradación por desplazamiento de material del suelo. Es la degradación del suelo por movimiento o desprendimiento del material del suelo cuyos efectos son *in situ* y a distancia del lugar donde se originan, y considera la erosión hídrica y la erosión eólica.
- c. Degradación por deterioro interno del suelo. En esta categoría se agrupan los tipos de procesos de degradación del suelo, que dañan a este recurso sin manifestarse de forma impactante, ya que es el resultado de su deterioro interno, es decir, en el perfil del suelo, en ésta se consideran: salinización y la alcalinización, deterioro químico, deterioro físico y deterioro biológico.

Causas de la erosión eólica

Algunos de los factores que pueden inducir y/o acelerar la manifestación de la erosión eólica son los siguientes:

- a. Sequía prolongada.
- b. Incremento en la velocidad del viento.
- c. Degradación de la vegetación.
- d. Superficies planas y sin impedimentos orográficos para el viento.

Estos cuatro factores son influenciados por los tres agentes, siguientes:

- a. Variación interanual en la intensidad de elementos climáticos y/o cambio climático.
- b. Cambios en la densidad y/o tasa de crecimiento de la población.
- c. Cambios en las condiciones sociales y económicas.

Consecuencias de la erosión eólica

La incidencia de la erosión eólica en la tierra, puede conducir a los siguientes factores adversos para la producción de satisfactores para el hombre:

- a. Disminución de la profundidad y de la fertilidad del suelo.
- b. Encostramiento de la superficie del suelo.
- c. Al aumento de las tolvaneras y de la contaminación de la atmósfera y agua por polvo.
- d. Pérdida de la calidad y del valor de la tierra.

- e. Daño a edificios y caminos.
- f. Daño a la vegetación.

Técnicas para el estudio de la erosión eólica

En México, la apreciación y evaluación de los efectos de la desertificación, datan de épocas prehispánicas. Sin embargo, la introducción de criterios cualitativos y cuantitativos sistematizados se iniciaron a principios del siglo XX. Entre las técnicas que se pueden utilizar actualmente para la investigación en erosión eólica, se tienen:

Estudios de campo.
Modelos paramétricos.
Modelos de simulación.
Sistemas de Información Geográfica.
Sistemas expertos.

En México se han aplicado las metodologías indicadas anteriormente, de las cuales se han obtenido resultados satisfactorios al realizar ciertas modificaciones y adaptaciones de los procedimientos originales, para las condiciones locales de los ecosistemas de México (Zárate, 1991).

Estudios realizados sobre erosión eólica en el Estado de México

En el estudio realizado por Ortiz y Estrada (1991) a nivel nacional, se analizó la erosión provocada por el viento con base en la metodologma FAO (1980), utilizando una escala de 1:2,000,000. Del conocimiento obtenido por estos autores se extractaron los resultados para el Estado de México (Cuadro 1), donde se apreció la dominancia de la clase de riesgo y velocidad severa en el 60.1% y 51.1%, respectivamente; de una área total de 21,461 km².

Como se ha apreciado en esta revisión, es notable que se requiere del análisis detallado de todos o la mayoría de los factores que influyen en el incremento de la intensidad de la erosión eólica, debido a que el conocimiento de ellos es valioso para la planeación de estrategias para el desarrollo sustentable de una región. Por otra parte, la continuidad en la investigación sobre este tipo de desertificación, es necesaria debido a que permitirá el establecimiento de bases sólidas para la implementación de estrategias de desarrollo enfocadas integralmente.

Cuadro 1. Riesgo y velocidad de erosión por viento en el Estado de México

Clase de erosión	Superficie (km ²)		Porcentaje	
	Riesgo	Velocidad	Riesgo	Velocidad
Moderada	5 107.7	8 627.3	23.8	40.2
Severa	12 898.0	10 966.5	60.1	51.1
Muy severa	3 455.2	1 867.1	16.1	8.7

3. Materiales y método

El área bajo estudio

El Estado de México está localizado entre las coordenadas extremas de 18°21' y 20°17' de latitud norte y entre 98°35' y 100°36' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 23,244.22 km², dividida en 121 municipios, agrupados en ocho regiones. El clima predominante es el templado. Las temperaturas medias anuales en el sureste son mayores a 20°C, en tanto que en el centro y norte están por abajo de 13°C. La precipitación media anual oscila entre 600 y 800 mm (INEGI, 1987; INEGI, 1989).

Existe la dominancia de suelos con fase lítica en el 60.62% del Estado de México (SPP, 1981), lo cual indica que en la mayor proporción de los suelos de la entidad se encuentra el lecho rocoso entre 10 y 50 cm de profundidad, por lo que es de esperarse que su límite permisible a la erosión sea muy bajo.

El comportamiento demográfico en esta entidad ha originado una disminución en la superficie terrestre disponible por habitante (INEGI, 1987), ya que de existir 2.48 ha disponibles por habitante en 1900, para 1990 sólo existían 0.23 ha/habitante (a nivel global), lo que es un indicador del descenso en la capacidad de los recursos para abastecer de bienes y servicios a los habitantes de esta entidad.

Metodología

La presente investigación se realizó a nivel estatal utilizando la información existente en el Estado de México; para lo cual se empleó una escala de trabajo de 1:250,000; con base en las etapas, que se presentan a continuación:

Elaboración del banco de datos climatológicos

La información necesaria para la elaboración de este tipo de banco de datos se obtuvo de los registros históricos del Servicio Meteorológico Nacional, en la Ciudad de México. En esta actividad se seleccionaron todas las estaciones meteorológicas con un registro mayor a 10 años, para obtener la información con mayor detalle temporal y representatividad espacial. Los datos digitalizados fueron: temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales, precipitación total mensual y la velocidad media mensual del viento.

Elaboración del mapa base

El mapa base fue obtenido a través de la delimitación de unidades SOTER sobre una imagen de satélite ERTS/LANDSAT en "falso color", a escala 1:250,000, cuya cartografía se realizó considerando el enfoque paisajista, con base en procedimientos para el estudio de sistemas terrestres (levantamiento fisiográfico) (Vink, 1975), dichas unidades se agruparon a nivel sistema terrestre de acuerdo a las características referentes al relieve, al drenaje y al color, considerando un área mínima cartografiable igual a 1 cm², lo cual representó una superficie de 625 ha.

Así, se delimitaron 748 unidades SOTER, cubriendo una superficie de 22,630.9 km², que representa el 97.36% del total estatal. La superficie restante corresponde a áreas urbanas y cuerpos de agua, en las cuales no se evaluó el proceso de erosión eólica.

Evaluación de la erosión eólica

Para la evaluación de este tipo de proceso de degradación a pequeña escala (1:250,000) fue necesario ajustar los componentes del modelo paramétrico original denominado Ecuación para

Erosión Eólica (EEE). Para esto se partió de la metodología generada por la FAO (1980) y la compilada por Coote (1988) y Shields y Coote (1989).

El modelo paramétrico empleado en este trabajo tiene las características siguientes:

- a. Riesgo potencial de erosión eólica: $E = Ce I_s U$.
- b. Riesgo actual de erosión eólica: $E = Ce I_s U V_r$.

donde:

E es la erosión eólica anual ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$).

Ce es la erosividad del viento.

I_s es la erosionabilidad del suelo.

U es la rugosidad superficial del suelo.

V_r es la resistencia a la fuerza erosiva del viento por la vegetación.

Este tipo de modelo presenta una limitante al considerar la interdependencia entre factores como una sola función matemática, siendo que en realidad pueden existir funciones más complejas, las cuales pueden ser de tipo senoidal, exponencial o de mayor complejidad. Sin embargo es mejor esta generalización a usar un modelo aditivo (Westman, 1984).

Erosividad eólica (Ce)

Para el cálculo de este factor, se dividió el año con base en la acumulación de la precipitación, de tal forma que se obtuvieron dos períodos, uno en el que se presentó el 80% de la precipitación total anual y se denominó período húmedo (Ce_{m-o} , mayo a octubre) y otro caracterizado por la presencia del 20% de la lluvia total anual, llamado período seco (Ce_{n-a} , noviembre a abril), empleándose para esto la ecuación siguiente:

$$Ce = 386 \frac{V_z^3}{(\sum_{i=1}^{12} 10(P - E)_i)^2}$$

donde: V_z es la velocidad del viento promedio anual, en m/s a 10 m de altura, i es el i -ésimo mes del año,

$P-E$ es el índice de precipitación-evaporación de Thornthwaite, calculado así:

$$10(P - E)_i = 115[(Pi/25.4)/(1.18Ti + 22)]^{1.11}$$

donde:

P_i es la precipitación total mensual, que debe ser mayor a 12.7 mm, de lo contrario 12.7 deberá utilizarse,

T_i es la temperatura media mensual, y debe ser mayor que $-1.7^\circ C$, si -1.7 debe ser utilizado.

Cuando el cálculo de Ce se realiza en unidades métricas, el valor resultante es casi el 100%, respecto al de Garden City, Kansas, USA y los valores obtenidos para otros lugares son iguales como los calculados usando el método original de Chepil *et al.* (1962) (Lyles, 1980; citado por Shields y Coote, 1989).

Erosionabilidad del suelo (I_s)

Con el objeto de utilizar los datos existentes en las cartas de suelos, se empleó una clasificación (Cuadro 2) generada a través de la correlación entre la textura del suelo y los grupos de erosionabilidad eólica definidos por Lyles (1977) (FAO, 1980).

Cuadro 2. Factor erosionabilidad del suelo con base en su textura

Tipo de suelo	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Suelo no calcáreo	3.50	1.25	1.85
Suelo calcáreo	3.50	1.75	1.85
Suelos pedregosos o guijarrosos	1.75		0.92
no calcáreos		0.62	
calcáreos		0.87	

Rugosidad superficial del suelo (U)

Este factor se emplea para reflejar el efecto de la labranza y de la resistencia del suelo al colapso de la rugosidad formada por ésta. Este es más bien un calificativo subjetivo adicionado a la erosionabilidad para un tipo de suelo. Los valores del Cuadro 3, se pueden aplicar donde la labranza es normal para la producción de cultivos. En lugares donde la labranza no se practica normalmente, el factor U se puede considerar con valor igual a 1.

Cuadro 3. Valores para el factor rugosidad del suelo

Textura del suelo	Gruesa	Media	Fina
Valor del factor	1.0	0.75	0.5

Factor vegetación y residuos de cultivos (Vr)

Este factor se emplea como una constante de proporcionalidad para cuantificar el efecto de la vegetación y de los residuos de los cultivos sobre los suelos desprotegidos y limpios ante el riesgo de erosión eólica. Los valores del factor Vr basados en Shields y Coote (1989), se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Factor vegetación y residuos de cosecha (Vr)

Tipo de vegetación	Períodos de acumulación de la precipitación	
	mayo-octubre (80%)	noviembre-abril (20%)
Tierras misceláneas	1.00	1.00
Cultivo de temporal	0.22	0.58
Cultivo de riego	0.22	0.36
Pastos perennes	0.05	0.30
Pastos y arbustos	0.03	0.10
Bosque en producción	0.00	0.00

Clases de riesgo potencial y actual de erosión eólica

El valor de erosión anual (E , $t\ ha^{-1}\ aqo^{-1}$) se obtuvo sumando los valores de E calculados para las dos épocas del año y posteriormente éstos se compararon con las clases indicadas en el Cuadro 5, para obtener una clasificación de la intensidad del riesgo (actual y potencial) de erosión eólica.

Cuadro 5. Clases de riesgo potencial y actual de erosión eólica.

Clase de riesgo potencial	Pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)	Clase de riesgo actual	Pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)
Nulo (N)	< 2.0	Nulo (N)	< 1.0
Bajo (B)	2.0 - 9.9	Bajo (B)	1.0 - 4.9
Moderado (M)	10.0 - 49.9	Moderado (M)	5.0 - 24.9
Severo (S)	50.0 - 199.9	Severo (S)	25.0 - 99.9
Extremo (E)	> 200.0	Extremo (E)	> 100.0

4. Resultados y discusión

Base de datos climáticos

Con base en los registros climatológicos encontrados en el Servicio Meteorológico Nacional, ubicado en la Ciudad de México, se pudo establecer la existencia de 180 estaciones meteorológicas, cuyos datos son sobre parámetros referentes a los factores climáticos siguientes: temperatura, precipitación y viento.

El comportamiento temporal de este grupo de estaciones fue muy heterogéneo, ya que existían algunas cuyos registros eran menores a dos o cinco años, mientras que para otras fue mayor a 10 años. Por tal motivo se procedió a eliminar todas aquellas estaciones cuya serie histórica fuera menor que 10 años, con el propósito de asegurar una mayor homogeneidad en la variabilidad temporal de los datos utilizados para el cálculo del índice climático necesario para evaluar la erosión eólica, de tal forma que sólo se utilizaron 112 estaciones para el cálculo del factor de erosividad eólica.

Es notable que en la parte sur de la entidad existe un menor número de estaciones destinadas a la medición de parámetros climáticos, por lo que es de esperarse que la obtención de las isolíneas de erosividad eólica tengan una representación espacial menor, por lo que también se ve afectada su veracidad en esta zona. Como alternativa para disminuir este tipo de error, se sugiere la consideración de puntos ubicados en estados vecinos, aunque es recomendable el establecimiento de nuevas estaciones para aumentar la red de monitoreo climático en el Estado de México.

Mapa base

El mapa base constituye la herramienta primordial para la representación cartográfica de cada tipo de proceso de degradación de la tierra. Este se constituye de unidades fisiográficas, las cuales agrupan atributos del clima, terreno y suelo más o menos homogéneos en su variabilidad espacial, motivo que genera un pilar sólido para la medición de cada factor necesario para evaluar la degradación en forma integral.

Como resultado de haber dividido el mosaico de patrones de la imagen de satélite en falso color, se obtuvo un mapa base, constituido por 748 unidades fisiográficas (UF) cuya superficie

global es de 22,630.9 km², 13 áreas urbanas cubriendo una superficie de 427.27 km² y 13 cuerpos de agua abarcando un área de 186.02 km², conjuntando una superficie total de 23,244.22 km².

Erosividad eólica

El caso característico de este factor en particular es el considerar tres elementos climáticos que son: el viento, la precipitación y la temperatura, conjuntados para evaluar la acción del viento sobre la superficie de la tierra bajo condiciones de humedad variable, es decir la influencia del viento será mayor o menor de acuerdo a lo seca o húmeda que se encuentre la superficie de la tierra. Por lo que, la evaluación de la erosividad ocurrida en dos épocas del año, divididas con base en la acumulación de la precipitación, tiene especial relevancia para distinguir el efecto del viento en ambas condiciones de humedad.

De los resultados obtenidos en esta investigación se obtuvo que las isolíneas de erosividad eólica para el período de mayo a octubre, cuya variación fue entre 0 y 70.61, siendo mayor que 5 en la parte norte de la entidad donde se encuentra la mayor superficie plana.

A medida que la superficie de la tierra se va secando, aumenta la posibilidad de incidencia del viento, en este período, el valor de este factor osciló entre 1.88 y 620.72, mostrando una mayor intensidad hacia la parte centro del Estado, en los Valles de Toluca y Chalco y hacia el norte de Zumpango.

Riesgo potencial de erosión eólica

El viento al igual que el agua actúa sobre la superficie terrestre por medio de un mecanismo de desprendimiento y arrastre de las partículas de suelo. De tal manera que la evaluación del riesgo de la superficie de la tierra a la acción del viento, constituye un indicador del peligro en que se encuentra el suelo para ser movido por este elemento climático, en condiciones sin protección.

Los resultados de la investigación muestran que el Estado de México sólo está afectado por tres clases de riesgo: moderado, severo y extremo, aunque estas son las de mayor intensidad de acuerdo a la clasificación utilizada (Cuadro 5). La clase de riesgo moderado afectó 159 unidades fisiográficas, ocupando una superficie de 4,423 km² (20%). El riesgo severo afectó a 559 UF, abarcando una superficie de 17,233 km² (76%). La clase extremo afectó 30 UF, en una área de 975 km² (4%). El orden de dominancia de las clases de riesgo potencial es: severo > moderado > extremo.

Además de cuantificar el nivel de riesgo y medir la superficie que se encuentra bajo ese aspecto de la erosión eólica, es necesario realizar la cartografía con la finalidad de observar el comportamiento espacial y apreciar la presencia de las diferentes clases y su relación con el entorno geográfico de referencia. Tal representación se muestra en el Mapa 1, donde se visualiza la dominancia continua, a todo lo largo y ancho de la entidad, de la clase de riesgo severo, cuyo significado es que, en las tierras donde exista esta clase se espera que se pierdan entre 50 y 200 toneladas de suelo por cada hectárea anualmente, si prevalecen las condiciones favorables para que actúe el viento.

Riesgo actual de erosión eólica

Es conveniente notar los cambios que existen en las superficies ocupadas por riesgo potencial y las dominadas por riesgo actual, tan sólo por la consideración del factor cobertura vegetal; es decir, la introducción de nuevas alternativas de manejo de recursos naturales e inducidos, con fines conservacionistas puede modificar significativamente la superficie afectada por las clases perjudiciales de erosión.

Los resultados encontrados mostraron la presencia de cinco clases de riesgo actual de erosión

eólica en el Estado de México. La clase "nulo" se presenta en 262 unidades fisiográficas (UF), abarcando una superficie de 8,035 km² (35%), la clase "bajo" afectó a sólo tres UF, en una superficie de 81 km² (1%), la clase "moderado" se presentó en 212 UF, cubriendo un área de 6,091 km² (27%), el riesgo actual "severo" se mostró en 242 UF, en una superficie de 7,308 km² (32%), por último la clase de riesgo "extremo" se mostró en 29 UF, en un área de 1,116 km² (5%). El orden de dominancia de las clases de riesgo actual es: nulo > severo > moderado > extremo > bajo.

La distribución de cada una de estas clases se muestra en el Mapa 2, en el cual se puede distinguir la dominancia de la velocidad actual nula en la parte sur de la entidad y en algunas unidades fisiográficas dominadas por sierras, donde aún existe el bosque natural de pino y encino que sirve como protección para el suelo. Por otra parte, la clase extremadamente rápida se presenta al sur de la Ciudad de Toluca y en el Valle de Chalco. Esta clase proporciona un indicador de la necesidad que existe por implementar medidas conservacionistas de tipo vegetativo para que sirvan de barrera rompevientos y disminuyan la acción del viento.

5. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de la evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación por erosión eólica en el Estado de México, se pudo obtener las conclusiones siguientes:

La erosividad eólica constituye un factor de riesgo de desertificación importante durante la época seca del año, debido a que se presentan valores máximos de 620, resultando más afectada la parte norte y oriente de la entidad.

Es importante hacer notar la presencia de solo tres de las peores clases de riesgo potencial de erosión eólica, ya que todo el Estado de México es susceptible de perder más de 10 t ha⁻¹ año⁻¹, encontrándose la dominancia de la clase severo en el 76% de la entidad.

La clase de riesgo actual de erosión eólica dominante en el Estado de México fue la nulo en 35%, siguiendo en orden de importancia la clase severo en el 32%, en conjunto esta clase y la extremo cubren una superficie del 37%, lo cual significa que en esta área existe un riesgo actual de pérdida de suelo superior a 25 t ha⁻¹ año⁻¹, esto tiene gran importancia tanto para la disminución de la productividad de la tierra, como para la contaminación del aire y del agua.

BIBLIOGRAFIA

- Chepil, W. S., F. H. Siddoway and D. V. Armbrust, 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17 (4): 162-165.
- Coote, D. R. (ed.), 1988. SOTER procedures manual for small scale map and database compilation. Procedures for interpretation of soil degradation risk and rate assessment. GLASOD project, ISRIC, The Netherlands. 45 p.
- Dregne, H. E., 1985. Desertification of arid lands. 2nd. ed. Adv. in desert and arid land thech. and dev. Vol. 3. Harwood Academic Publishers. USA. New York 242 p.
- FAO, 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO/UNEP/UNESCO. Roma. 86 p.
- FAO, 1984. Metodología provisional para la evaluación y la representación cartográfica de la desertización. FAO/UNEP. Roma. 74 p.
- FDMA, 1982. A brief report on desertification process in Afghanistan. p. 1252-1260. In Alternatives strategies for desert development and management. Vol. 4. Desert management. Pergamon Press. USA. p. 947-1396.
- INEGI, 1987. Síntesis geográfica, nomenclator y anexo cartográfico del Estado de México.

- INEGI. México. 223 p.
- INEGI, 1989. Anuario estadístico del Estado de México. INEGI. México. 614 p.
- Oldeman, L. R. (ed.), 1988. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 15 p.
- Ortiz S., M. de la L. M. y J. W. Estrada B., 1991. Evaluación y cartografía de la erosión eólica en la República Mexicana. Serie Cuadernos de Edafología No. 18. CEDAF-CP. Montecillo, Edo. de México. 26 p.
- Shields, J. A. and D. R. Coote (ed.), 1989. SOTER: Procedures manual for small-scale map and database compilation and procedures for interpretation of soil degradation status and risk. ISRIC, The Netherlands. 180 p.
- SPP, 1981. Carta de suelos del Estado de México, escala 1:500,000. SPP. México.
- Vink, A. P. A., 1975. Land use in advancing agriculture. Springer-Verlag. Germany. 349 p.
- Wangati, F., 1992. Case study on the impacts of climate variations and sustainable development in the Sudano-Sahelian region. Contribution by UNSO to the ICID. 67 p.
- Westman, W. E., 1984. Ecology, impact assessment and environmental planning. Wiley-Interscience. New York, USA. 532 p.
- Zarate Z., R., 1991. Diagnóstico y control de la degradación de la tierra en el Estado de Tlaxcala, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 215 p.

Estudios de vulnerabilidad basados en escenarios de cambio climático en México, derivados de resultados de GCM's con un doblamiento del CO₂ atmosférico (El ciclo anual presente)

V. M. MENDOZA, E. E. VILLANUEVA y J. ADEM

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México, D.F., México

RESUMEN

Para llevar a cabo un análisis de la vulnerabilidad de la población y su medio ambiente en relación a los recursos hidrológicos del país, debido a un cambio climático global y dar una respuesta de mitigación, es necesario estimar en detalle el impacto regional del calentamiento global producido por el incremento en el CO₂ atmosférico sobre el sistema hidrológico del país.

En este proyecto se aplica un modelo térmico-hidrológico para cuantificar dicho impacto sobre las principales cuencas hidrológicas de México, usando datos climatológicos del país y los resultados de dos modelos de circulación general (GCM's), el GFDLR30 y el CCCM, así como los del modelo termodinámico del clima de Adem (MTC).

En esta presentación se da únicamente el escenario básico que constituye el ciclo anual térmico-hidrológico del clima actual y se determina la reserva y disponibilidad de agua de 12 zonas hidrológicas.

ABSTRACT

We carry out an analysis of vulnerability for the population and its environment in relation with the country's hydrological resources in the presence of a global climate changes. We are considering that it is necessary to make a detail estimation over the regional impact due to the global warming produced by an increasing in atmospheric CO₂ and give a mitigation response.

In this work we applied an hydrological model to evaluate quantitatively the impact over the main hydrological zones in Mexico, using climatological data and results from two major circulation models (GCM's), the GFDLR30 and the CCCM, as well as the results of Adem's thermodynamic climate model. In this work, we report only a basic scenario which consists in the thermal and hydrological annual cycle for the present climate, as well as the reserves and the water availability in 12 hydrological zones in Mexico.

1. Introducción

Dado que los GCM's generan variables hidrológicas tales como escurrimiento y humedad del suelo, pueden ser usados directamente para estimar cambios en la disponibilidad de agua y en consecuencia tomar medidas en su uso, principalmente en áreas más vulnerables. Como un ejemplo se puede citar a la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos (1984), en donde se han usado los resultados de GCM's para escurrimiento y humedad del suelo. Sin embargo, las variables hidrológicas generadas por los GCM's representan promedios areales de gran escala (redes de aproximadamente 400 km, en el mejor de los casos) con poca resolución para representar regiones y cuencas hidrológicas específicas.

Existe un método para acoplar los GCM's con los modelos hidrológicos más detallados, este consiste en usar los resultados de salida de los GCM's como datos de entrada al modelo hidrológico regional.

Hemos usado el método antes descrito para generar el ciclo anual hidrológico actual y sus cambios debidos al calentamiento global por el incremento en los gases de invernadero, específicamente el CO₂-atmosférico.

En este reporte presentamos los resultados del ciclo anual hidrológico, de la reserva y disponibilidad de agua, para el clima actual en 12 zonas hidrológicas en que ha sido dividido el país (figura 1) de acuerdo con el Atlas del Agua de la República Mexicana (1976).

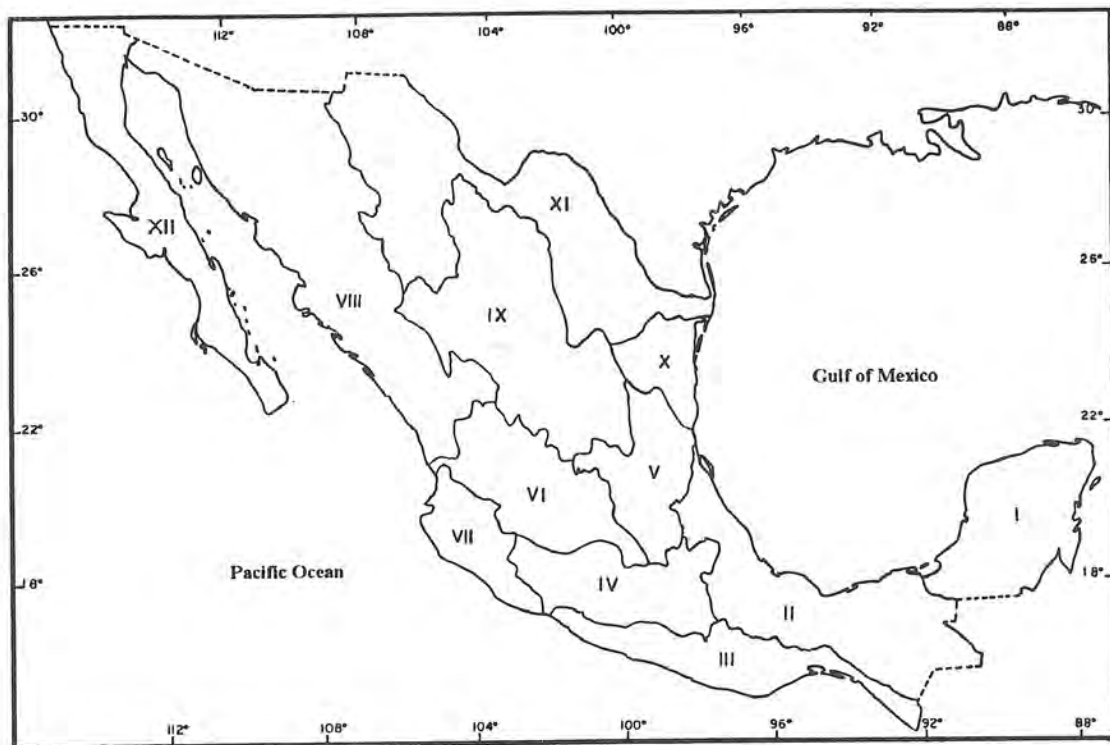


Figura 1. Zonas Hidrológicas en las que se ha dividido el país de acuerdo al Atlas del Agua de la República Mexicana (1976).

2. Método

El Método consiste en aplicar la ecuación de conservación de energía térmica a la capa superficial del continente de 60 cm de espesor (Mendoza *et al.*, 1994, Otha *et al.*, 1993) y la ecuación de balance de agua con 50 a 36 cm de déficit crítico de humedad del suelo para las zonas húmedas y de 16 a 8 cm para las secas (Waggoner, 1990), usando las siguientes variables climatológicas observadas: humedad relativa, nubosidad, temperatura del aire en superficie, rapidez del viento en superficie y precipitación, obtenidas del Atlas del Agua de la República Mexicana (1976); radiación de onda corta en superficie con cielo despejado de los archivos del MTC y valores de albedo para superficie húmeda y seca obtenidos por Barradas (1990) y que también se encuentran en los archivos del MTC.

Las anomalías de gran escala de temperatura del aire en superficie y precipitación debidas al incremento del CO₂-atmosférico son generadas por los modelos GFDLR30-GCM, CCCM-GCM y la versión del modelo termodinámico del clima (MTC- EBM) que contiene los 3 retroalimentadores (criosfera, nubes y vapor de agua) sin incluir vapor de agua en la banda espectral atmosférica del CO₂-(12 a 19 μ), el cual es el caso 8 del modelo ATM₂, reportado por Garduño y Adem (1992). Estas anomalías son superpuestas a las correspondientes variables climatológicas y se usan como forzamiento en las ecuaciones de conservación de energía térmica y de balance de agua para generar el calentamiento en superficie y la humedad del suelo anuales en 106 puntos distribuidos de manera más o menos uniforme sobre la República Mexicana.

Las ecuaciones de energía térmica y de balance de agua se integraron con un esquema semi-implícito usando un paso de tiempo de un mes. Las condiciones atmosféricas y la radiación de onda corta así como el albedo de superficie son prescritos mes con mes de tal manera que ellos cambian después de cada paso de tiempo. Se inician los cálculos con una temperatura del suelo uniforme de 24 °C y un déficit de humedad del suelo de 50 cm en toda el área de integración. Empezando en enero, la integración fue llevada a cabo para 5 años hasta que los valores promedio calculados de temperatura y humedad del suelo, para cada uno de los doce meses del año, alcanzan una diferencia de menos de 0.001°C y 0.001 cm con sus correspondientes valores del año previo. Los parámetros de este modelo de balance térmico-hidrológico se ajustaron con la corrida para el clima actual, comparando el escurrimiento anual calculado con el observado para cada una de las zonas.

En este trabajo presentamos los resultados del ciclo anual hidrológico, la reserva y disponibilidad de agua para el clima actual (cero anomalías).

3. Reserva y disponibilidad de agua

Para determinar la disponibilidad de agua en cada una de las zonas hidrológicas se ha usado el sistema de clasificación de Köppen para climas secos de estepa con vegetación xerófita (Maderey R., 1992). Este sistema establece lo siguiente:

$P \leq 2t$ Para lluvias con régimen de invierno (BSs)

$P \leq 2(t + 7)$ Para lluvias irregulares (BSx')

$P \leq 2(t + 14)$ Para lluvias con régimen de verano (BSw) (1)

donde P es la precipitación media anual en cm y t es la temperatura media anual en °C Las letras entre paréntesis corresponden a los códigos usados en la clasificación climatológica (Atlas del Agua, 1976).

Las relaciones anteriores establecen un límite superior de precipitación en función de la temperatura media anual para las zonas secas de estepa. Nosotros las usaremos también como un límite inferior para las zonas húmedas.

Aplicamos (1) usando los promedios de precipitación y temperatura anual en cada una de las zonas. De esta manera, las zonas VIII, IX, XI y XII resultan ser secas con una precipitación anual promedio de menos de 500 mm y las zonas I a VII y X resultan ser húmedas con una

precipitación anual promedio de más de 600 mm.

Definimos la precipitación límite r como sigue:

$r = P$ Para las zonas secas

$r = 2(t + 7)$ Para zonas húmedas con lluvias uniformes

$r = 2(t + 14)$ Para zonas húmedas con lluvias de verano (2)

La segunda y tercera relaciones en (2) se aplican a las zonas húmedas de acuerdo con su régimen de precipitación.

Definimos la precipitación mensual límite r_j para el j -ésimo mes como:

$$r_j = \left(\frac{r}{P}\right) P_j$$

tal que

$$r = \sum r_j = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{r}{P}\right) P_j$$

donde P_j es la precipitación mensual en el j -ésimo mes. De acuerdo con (2) $r_j = P_j$ para las zonas secas y $r_j < P_j$ en las zonas húmedas.

Con la precipitación mensual r_j en lugar de P_j podemos generar un ciclo anual de escurrimiento mínimo o límite, cuyo valor anual $Q_{reserva}$ representa la reserva de agua de la zona hidrológica húmeda y la diferencia del escurrimiento anual Q (obtenido con P_j) y $Q_{reserva}$; es decir, $V_D = Q - Q_{reserva}$ representa el volumen de agua disponible.

La cantidad $Q_{reserva}$, debe interpretarse como la cantidad de agua que requiere la zona húmeda para mantener su equilibrio ecológico, si se dispone de esta cantidad de agua, la zona o cuenca hidrológica entra en peligro de secarse poco a poco, producirse cambios importantes en su flora y fauna y afectarse la agricultura del lugar.

De acuerdo con las definiciones anteriores para las zonas secas, el escurrimiento Q (obtenido con P_j), representa toda la reserva de la zona; es decir, $Q = Q_{reserva}$ y por lo tanto $V_D = 0$. Lo anterior no implica que no se pueda disponer del agua de escurrimiento en las zonas secas, dado que el disponer de ella no modifica substancialmente su situación hidrológica.

4. Resultados

De acuerdo con el Atlas del Agua de la República Mexicana (1976), la tabla 1 muestra la descripción de cada una de las zonas hidrológicas (segunda columna), su área en km^2 (tercera columna), el escurrimiento virgen en millones de m^3 estimado de 515 estaciones hidrométricas existentes en la República Mexicana (cuarta columna) y finalmente el escurrimiento virgen en mm obtenido de dividir el escurrimiento en millones de m^3 por el área que abarca la correspondiente zona hidrológica en m^2 (quinta columna).

Para representar gráficamente el ciclo hidrológico, hemos seleccionado como ejemplo la zona II, que es una de las más caudalosas del país con una precipitación anual de 1709 mm.

La figura 2 muestra el ciclo anual del porcentaje de escurrimiento (escurrimiento mensual entre escurrimiento anual por 100) calculado en la zona II y el observado en la desembocadura de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos (Atlas del Agua de la República Mexicana, 1976). La figura 2 muestra que el porcentaje de escurrimiento observado en las desembocaduras de los ríos se correlaciona bien, en casi todo el año, con el porcentaje de escurrimiento calculado en la zona hidrológica.

PORCENTAJES DE ESCURRIMIENTO

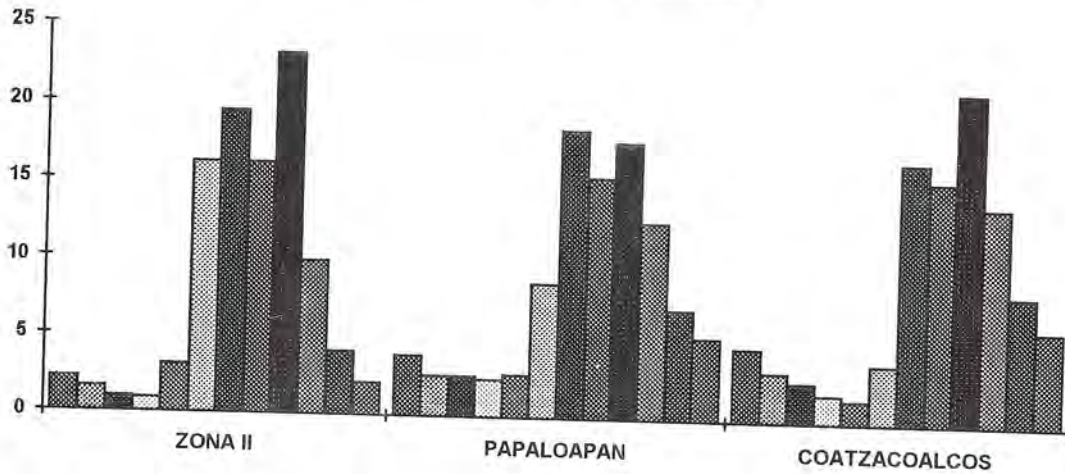


Figura 2. Ciclo anual del porcentaje de escurrimiento (escurrimiento mensual entre escurrimiento anual por 100) calculado en la zona II y el observado en la desembocadura de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos (Atlas del Agua de la República Mexicana, 1976).

PRECIPITACION (P), EVAPORACION (E) Y ESCURRIMIENTO (Q) EN MM

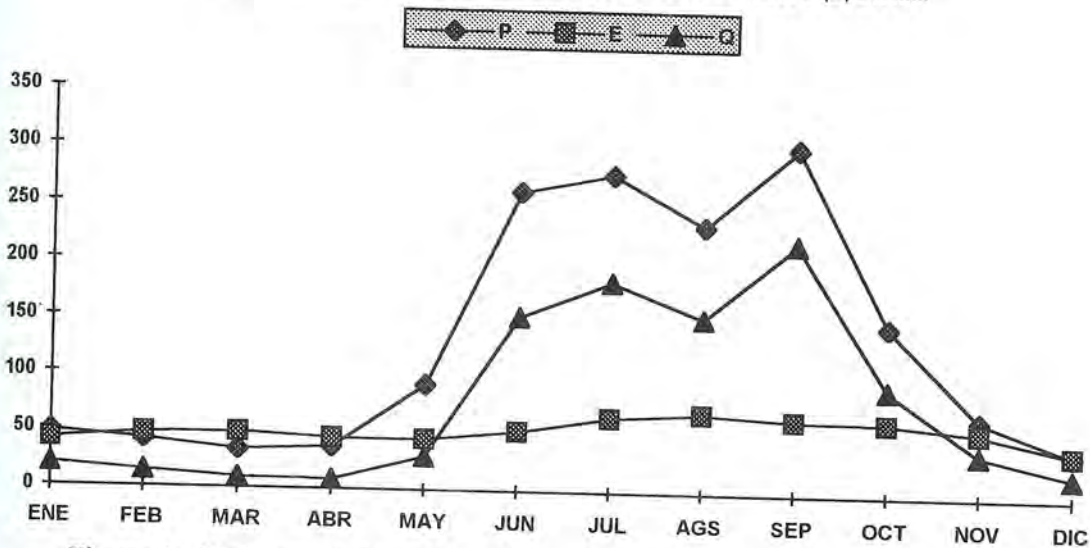


Figura 3. Ciclo anual de precipitación observada, evaporación y escurrimiento calculados en mm, para la región II (Vertiente al Golfo Sur).

Tabla 1. Descripción de las 12 zonas hidrológicas en las que se ha dividido al país de acuerdo con el Atlas del Agua de la República Mexicana (1976), su correspondiente área en km², así como el escurrimiento anual virgen en millones de m³ y en mm.

Zona Hidrológica	Descripción	Area en km ²	Escurrecimiento en millones de m ³	Escurrecimiento en mm
I	Planicie de Campeche-Yucatán-Quintana Roo	139,626	29,846.6	213.8
II	Vertiente al Golfo Sur	197,803	187,014.2	945.5
III	Vertiente al Pacífico Sur	90,774	65,723.2	724.0
IV	Cuenca del río Balsas	116,912	29,005.2	248.1
V	Cuenca del río Pánuco	95,682	21,067.7	220.2
VI	Cuenca del Lerma-Chapala-Santiago	130,428	10,389.2	79.6
VII	Vertiente al Pacífico Centro	57,263	20,991.1	366.6
VIII	Vertiente al Pacífico Norte	361,455	34,459.7	95.3
IX	Vertiente Interior del Mapimí-Aguanaval-El Salado	252,927	3,003.0	11.9
X	Vertiente al Golfo Norte	51,962	2,112.1	40.6
XI	Vertiente Interior del río Bravo y Cuencas Cerradas del Norte	329,927	6,121.7	18.6
XII	Península de Baja California	143,789	287.3	2.0
	País	1,967,948	410,021.0	208.3

La figura 3 muestra el ciclo anual de precipitación observada, evaporación y escurrimiento calculados en mm, para la región II. Esta figura muestra que la precipitación en la Vertiente al Golfo Sur, alcanza un máximo de 303 mm en septiembre y tiene un mínimo relativo de 235 mm en agosto, conocido como sequía interestival. El escurrimiento está en fase con la precipitación y también presenta el efecto de la sequía interestival (en la figura 1 se puede observar que el escurrimiento en la desembocadura de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos presenta también el efecto de la sequía interestival); sin embargo, la evaporación no presenta dicho efecto, debido a que el suelo permanece húmedo durante esta sequía relativa. La evaporación excede ligeramente a la precipitación únicamente en febrero, marzo y abril y de junio a septiembre la precipitación excede considerablemente a la evaporación, lo que permite el escurrimiento.

La tabla 2 muestra los porcentajes de la reserva (segunda columna) y del volumen disponible de agua (tercera columna) con respecto al escurrimiento anual calculado, para cada una de las 12 zonas hidrológicas (primera columna), así como los porcentajes de evaporación (cuarta columna) y escurrimiento (quinta columna) calculados con respecto a la precipitación anual observada en cada zona. La última columna muestra el índice de aridez, definido como la evaporación potencial de Penman entre la precipitación. En esta tabla, E es la evaporación anual y E_p es la evaporación potencial de Penman. Los valores con asterisco (*) han sido estimados por Maderey R. y Jiménez R. (comunicación personal) del Instituto de Geografía (UNAM) usando un método diferente al que aquí se presenta. Ellos usan una red de puntos para las cuencas del Balsas (IV), Pánuco (V) y Lerma-Chapala-Santiago (VI), de máas del doble que la que nosotros usamos. Su método es un balance anual de agua usando básicamente la fórmula de Turc para estimar la reserva y disponibilidad de agua en estas cuencas. En su caso el escurrimiento es el observado y la evaporación se calcula como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento. Nosotros hemos considerado sus resultados para tener un rango de valores y no un único valor en estas cuencas.

La tabla 2 muestra que las zonas que requieren de menos proporción de agua con respecto a su escurrimiento para mantener su condición de zonas húmedas, son la I y VI, estas son, por consiguiente, las que tienen mayor proporción con respecto a su escurrimiento en la disponibilidad de agua. Sin embrago, de acuerdo con Maderey y Jiménez a consecuencia de que se han retenido y extraído importantes volúmenes de agua de la cuenca del Lerma - Chapala - Santiago (zona VI) para abastecer a los centros de población asentados en ella y a la Ciudad de México, que no pertenece a esta zona sino a la del Pánuco (zona V), el porcentaje de escurrimiento real registrado resulta muy bajo (entre 11 y 12%) con respecto al de las otras dos cuencas (25% para la IV y 30% a 32% para la V) y por consiguiente el porcentaje de evaporación calculado resulta demasiado alto (88 a 89%), a consecuencia de este balance, al introducir la precipitación límite para esta zona, resulta que requiere un porcentaje de reserva de agua muy pequeño y puede dar un porcentaje grande de volumen disponible en relación a las otras dos cuencas (IV y V), a pesar de tener un índice de aridez de una zona seca (2.1). De esta manera, atendiendo al valor del índice de aridez, la zona VI debe considerarse como una zona altamente vulnerable a cambios climáticos desfavorables y al aumento de la población.

La vertiente al Golfo Norte (zona X) es de las zonas húmedas que requiere mayor proporción de reserva de agua con respecto a su escurrimiento para mantener su condición de zona húmeda, de la misma manera su porcentaje en el volumen disponible de agua es el más bajo al igual que su porcentaje de escurrimiento; su porcentaje de evaporación y su índice de aridez son los más altos entre las zonas húmedas, podemos decir, por lo tanto que esta zona está entre los límites de las zonas húmedas y secas y por lo tanto puede considerarse altamente vulnerable a cambios climáticos desfavorables.

Diferentes autores (Del Río F., 1960) han estimado para el país porcentajes de evaporación con respecto a precipitación de 70% y 30% para el escurrimiento. Considerando el valor de escurrimiento observado para todo el país mostrado en la tabla 1 (último renglón) se tiene que el porcentaje de escurrimiento con respecto a la precipitación es de 29% y por lo tanto de 71% para la evaporación, los correspondientes porcentajes estimados por el modelo (Tabla 2) coinciden numéricamente. De esta manera estamos dentro del rango estimado por otros autores.

Conclusiones

De acuerdo con la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM (1986), el escurrimiento medio anual da una apreciación general de la cantidad de agua total teóricamente disponible sin tomar en cuenta la reserva de agua de la zona, pero no indica las variaciones del caudal de un año a otro o a lo largo de un año. El método que aquí presentamos nos permite estimar en forma general las variaciones a lo largo del año del escurrimiento, evaporación, humedad y temperatura del suelo, radiación neta, calor sensible y calor latente (estas últimas cinco cantidades, que no se presentan en este trabajo, puede calcularlas el modelo) en las 12 zonas hidrológicas en que se ha sido dividido el país.

En este trabajo además de mostrar un ejemplo del ciclo anual hidrológico para una zona, hemos estimado la reserva y disponibilidad de agua para las 12 zonas hidrológicas y el país. Los valores obtenidos por Maderey y Jiménez han sido considerados como complemento del trabajo para tener un rango de valores del porcentaje de reserva, disponibilidad, evaporación y escurrimiento de agua en las más importantes cuencas del país.

Tabla 2. Porcentajes de la reserva (segunda columna) y del volumen disponible de agua (tercera columna) con respecto al escurrimiento anual calculado, para cada una de las 12 zonas hidrológicas (primera columna), así como los porcentajes de evaporación (cuarta columna) y escurrimiento calculados (quinta columna) con respecto a la precipitación. La última columna muestra el índice de aridez, definido como la evaporación potencial de Penman entre la precipitación. Los valores con asterisco (*) han sido estimados por Maderey R. y Jiménez R. usando un método diferente al que aquí se presenta, en su caso el escurrimiento es el observado y la evaporación se calcula como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento.

Zona Hidrológica	Reserva (Q_{reserva} / Q) $\times 100$	Volumen disponible (V_D / Q) $\times 100$	Porcentaje de evaporación (E / P) $\times 100$	Porcentaje de Escurrimiento (Q / P) $\times 100$	Índice de Aridez (E_p / P)
I	19	81	81	19	1.1
II	25	75	45	55	0.9
III	40	60	46	54	1.0
IV	33 a 36*	64* a 67	75 y 75*	25 y 25*	1.4
V	41* a 52	48 a 59*	68 y 70*	32 y 30*	1.5
VI	3* a 29	71 a 97*	88* a 89	11 a 12*	2.0
VII	50	50	64	36	1.3
VIII	100	0	80	20	4.5
IX	100	0	97	3	3.5
X	61	39	94	6	1.7
XI	100	0	95	5	3.5
XII	100	0	99	1	10.5
País	39	61	71	29	3.2

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a Alejandro Aguilar por su apoyo técnico computacional en el desarrollo del presente trabajo, a Berta Oda por sus comentarios valiosos sobre la modelación hidrológica y a Ma. Esther Grijalva por la revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

- Atlas del Agua de la República Mexicana, 1976. Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, 125 láminas.
- Barradas, V. L., 1990. El efecto de la vegetación en la predicción del clima, con especial énfasis en la República Mexicana. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, 78 pp.
- Del Río F. 1960. Panorama hidrológico de la República en general y del Valle de México en particular. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 16 (1), 41-60.
- Garduño, R. y J. Adem, 1992. Calentamiento global calculado con el modelo termodinámico. *Ciencias*, 43, núm. especial, 11-14.
- Maderey R., L. E., 1992. El clima como factor decisivo en la estimación del agua aprovechable en las cuencas hidrográficas húmedas. Memorias del Congreso Nacional de Geografía, "México ante el siglo XXI", Aguascalientes, 27 al 29 de mayo de 1992. Tomo I, 88-94.
- Mendoza, V. M., E. E. Villanueva y J. Adem, 1994. Escenario de cambio climático en México de resultados de modelos que suponen un doblamiento en el CO₂ atmosférico (Caso de estudio: Hidrología). Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático. Cuernavaca, Mor., 18 a 22 de abril de 1994, 55-59.
- Ohta, S., Z. Uchijima, H. Seino and Y. Oshima, 1993. Probable effect of CO₂ -induced climatic warming on the thermal environment of ponded shallow water. *Clim. Change*, 23, 69-90.
- Organización Meteorológica Mundial, 1986. Guía de Prácticas Hidrológicas, Volumen II, OMM - Núm. 168.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1984 Potential climatic impacts of increasing atmospheric CO₂ with emphasis on water availability and hydrology in the United States. Report prepared for EPA by GISS, New York, NY. Strategic Studies Staff, Office of Policy Analysis, Office of Policy, Planning and Evaluation, EPA, Washington, DC.
- Waggoner P.E., 1990. Climate change and U.S. water resources. Wiley Series in Climate and Biosphere. 496 pp.

suma del volumen de agua aprovechable V_p y el volumen de la reserva R forman el escurrimiento de la cuenca. V_p es la cantidad de agua que se puede aprovechar del escurrimiento sin dañar la ecología y, por lo tanto, el balance hidrológico de la cuenca, y la reserva (R) es el volumen mínimo de agua que la cuenca debe contener para no romper su equilibrio.

En los valores obtenidos, en las cuencas de los ríos Pánuco y Balsas, se observa una similitud en los porcentajes de los parámetros del balance hidrológico con respecto a la precipitación. En cambio, en la cuenca del sistema fluvial Lerma - Chapala - Santiago existe una desproporción muy marcada entre la evaporación y el escurrimiento, por las razones expuestas (Figura I).

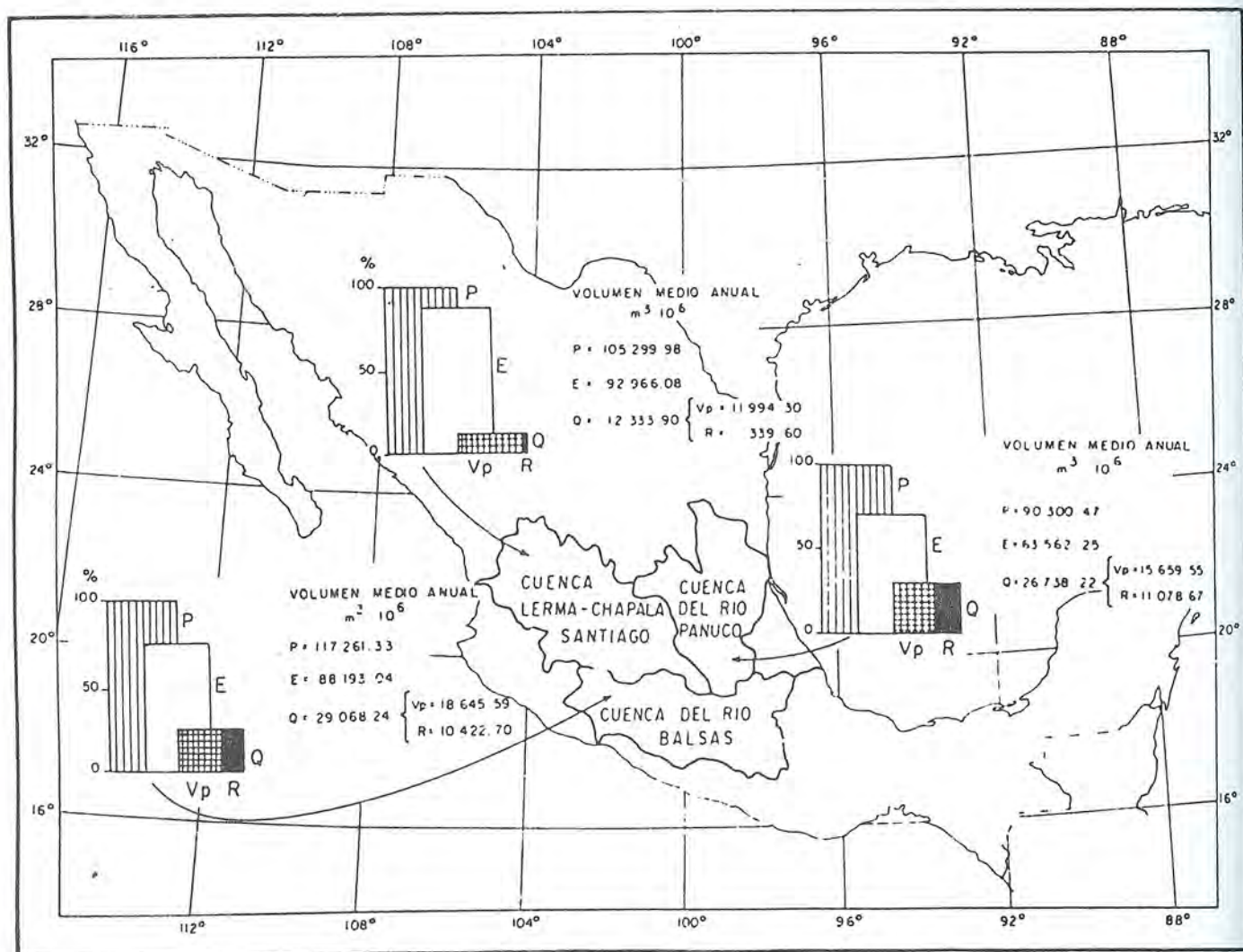


FIG. I. DISTRIBUCION DEL AGUA DE ACUERDO CON LAS FASES DEL CICLO HIDROLOGICO.

P = PRECIPITACION, E = EVAPORACION, Q = ESCURRIMIENTO, V_p = VOLUMENES DE AGUA APROVECHABLE, R = RESERVA

3. Aplicación y resultados

El método se emplea inicialmente en las tres regiones hidrológicas más importantes del país en cuanto a que son las de mayor población: cuenca del sistema fluvial Lerma - Chapala - Santiago, cuenca del río Balsas y cuenca del río Pánuco, con el propósito de obtener el estado actual de la disponibilidad de agua.

La información climatológica e hidrológica empleada para el presente estudio proviene de 223 estaciones meteorológicas y 172 hidrométricas localizadas en las cuencas objeto de estudio.

De los mapas de isolíneas medias anuales de temperatura, de precipitación, de evapotranspiración según Turc y de escurrimiento (Instituto de Geografía, 1990), se obtuvieron los valores de los elementos hidroclimáticos de las cuencas mencionadas (Tabla II).

Al observar las cifras de las distintas cuencas se aprecia que la variación de la evaporación va en orden creciente en función a la variación, también creciente de la temperatura y la precipitación; no así los valores del escurrimiento que en apariencia son independientes y sin embargo, en contra de lo esperado, resultan menores mientras mayor es el área de las cuencas.

TABLA II

ELEMENTOS HIDROCLIMATICOS

REGION HIDROLOGICA	AREA Km2	PRECIPITACION (P)		TEMPERATURA (T) °C	EVAPOTRANSPIRACION (ET)*		ESCURRIMIENTO (Q)	
		mm	m ³ 10 ⁴		mm	m ³ 10 ⁴	mm	m ³ 10 ⁴
CUENCA DEL SISTEMA FLUVIAL LERMA-CHAPALA-SANTIAGO	135,835.89	775.2	105,298.14	18.7	612.9	83,258.08	90.8	12,333.90
CUENCA DEL RIO BALSAS	117,637.78	996.8	117,261.55	21.5	79%		11.7%	
					787.3	92,613.40	247.1	29,053.89
CUENCA DEL RIO PANUCO	98,302.28	918.8	90,298.28	19.9	79%		24.8%	
					701.2	88,932.12	272.0	26,738.22
					76.3%		29.6%	

* ET Evapotranspiración real según Turc

A este respecto es importante recordar que las cantidades de agua de escurrimiento se obtienen de la medida directa del agua en las estaciones hidrométricas, por lo tanto, es en estos registros donde también se detecta el manejo que se hace del recurso agua en la cuenca de que se trate.

En general para la República Mexicana se estima que el agua de escurrimiento representa aproximadamente la cuarta parte de la precipitación (Del Río, F. 1962, p. 51). De las tres cuencas objeto de estudio, sólo en la del río Balsas se cumple este porcentaje (24.8%) debido a que el manejo del agua se hace en la propia cuenca, en cambio, en la cuenca del sistema Lerma - Chapala - Santiago es bajo (11.7%) y en la del Pánuco es superior (29.6%) (Figura 1).

Con respecto a los porcentajes de las dos últimas cuencas cabe destacar que del Río Lerma se extraen grandes volúmenes de agua para abastecer a la ciudad de México y a su vez el agua sobrante del Valle de México desagua artificialmente en el río Pánuco.

Para el presente estudio se calculó la evapotranspiración con la fórmula de Turc (Maderey, 1972), que se basa en la temperatura y la precipitación medias anuales, pero debido a que con el valor resultante no se cumplía el balance hidrológico ($P = Q + E$), se hizo indispensable aplicarle la relación $E_p = P - Q$, ya que, como se mencionó, el agua con que cuentan las cuencas es la que entra directamente por la precipitación.

De esta manera se obtuvo un coeficiente de la relación de la evaporación y la evaporación calculada con la fórmula de Turc (E_p/ET), mismo que se empleó para ajustar la evaporación según Turc del valor mínimo de precipitación (r) que debe retener la cuenca como reserva (R).

Por último se llegó a la obtención del volumen de agua aprovechable V_p (Tabla III), cantidad que va en función del escurrimiento Q , que depende de la precipitación y de la evaporación. La

secos y húmedos determina claramente la cantidad de agua en lámina de precipitación; esto indica si existe déficit o exceso de agua, situación que se manifiesta por el tipo de vegetación y en general por las características ecológicas existentes.

Cuando se habla de agua aprovechable, se trata de la cantidad de agua que se puede utilizar sin afectar la ecología de la cuenca, especialmente en lo referente al balance hidrológico.

En el sistema de clasificación climática de Köppen, el índice de aridez que establece el límite entre climas húmedos y secos está determinado por el régimen de lluvia, es decir, por la época del año en que se concentra la lluvia (tabla I).

TABLA I

LIMITES DE ALTURA DE LA LLUVIA
ENTRE CLIMAS SECOS Y HUMEDOS

s	f ó x'	w
$r = 2t$	$r = 2(t+7)$	$r = 2(t+14)$

- s lluvias de invierno
- w lluvias de verano
- f lluvias abundantes y uniformes todo el año
- x' lluvias escasas y uniformes todo el año
- t temperatura media anual en °C
- r valor límite de precipitación media anual en cm
- P precipitación media anual en mm
- Si $P < r$, el clima es seco
- Si $P > r$, el clima es húmedo

El valor de este índice, al determinar la cantidad de precipitación que debe ser superada para obtener un clima húmedo, a la vez que permite deducir el volumen de agua sobrante en la cuenca y disponible para su aprovechamiento, constituye la reserva (R) de la cuenca. El procedimiento para obtenerlo es el siguiente:

a) El volumen máximo de agua de que la cuenca dispone, es el que entra a través de la precipitación menos el volumen evaporado (P-Ep). Si se utiliza este volumen, no hay posibilidad de reponerlo.

b) Tomando en cuenta que del volumen máximo de agua que la cuenca recibe parte se evapora y parte define sus características ecológicas, satisfaciendo sus necesidades de humedad; una vez que éstas han sido satisfechas, la cantidad de agua que la cuenca naturalmente cede, constituye el volumen disponible para su aprovechamiento sin afectar su equilibrio original. Este volumen será equivalente a la diferencia entre el volumen máximo de agua en la cuenca y el volumen que generaría la precipitación definida por el valor límite r para que la cuenca sea húmeda, menos su correspondiente evaporación:

$$Vp = (P - Ep) - (r - Er)$$

En esta expresión se observa la intervención de dos términos, uno que es el balance hidrológico (P-Ep) y otro (r - Er) que, a la vez que limita el volumen de agua aprovechable, constituye la reserva de humedad que la cuenca necesita para mantener su paisaje original. La extracción de un volumen mayor requeriría de un estudio detallado del funcionamiento del agua en la cuenca para conocer hasta dónde podría explotarse dicha reserva sin afectar su equilibrio ecológico.

TABLA III

VOLUMEN DE AGUA APROVECHABLE: $Vp = (P - Ep) - (r - Er)$

REGION HIDROLOGICA	PRECIPITACION (P)		EVAPOTRANSPIRACION AJUSTADA $Ep = (P - Q)$		PRECIPITACION LIMITE (r)		EVAPOTRANSPIRACION DE r AJUSTADA*		AGUA APROVECHABLE (Vp)		RESERVA DE LA CUENCA $R = (r - Er)$ ó $R = (Q - Vp)$	
	mm	$m^3 \cdot 10^6$	mm	$m^3 \cdot 10^9$	mm	$m^3 \cdot 10^9$	mm	$m^3 \cdot 10^9$	mm	$m^3 \cdot 10^9$	mm	$m^3 \cdot 10^9$
CUENCA DEL SISTEMA FLUVIAL LERMA-CHAPALA-SANTIAGO	775.2	105,239.98	684.4	92,966.08	654	88,836.67	651.5	88,429.16	88.3	11,894.30	2.5	339.60
CUENCA DEL RIO BALSAS	996.8	117,261.33	- 749.7	88,193.04	710	83,522.82	59.6%		158.5	18,645.59	88.6	10,422.70
							621.4	73,100.12				
CUENCA DEL RIO PANUCO	918.6	90,300.47	75.2%		678	66,848.94	87.5%		159.3	15,659.55	112.7	11,078.67
			646.6	63,562.25			565.3	55,570.28				
			70.4%				83.4%					

* Er AJUSTADA = $ETr (Ep \text{ ajustada} / ET)$

4. Conclusiones

Los volúmenes de agua disponible y en general los valores de los distintos parámetros del balance hidrológico de las cuencas tratadas son válidos, ya que tres de ellos, la precipitación, el escurrimiento y la temperatura proceden de medidas directas. La evaporación, aunque se calculó, fue necesario ajustarla para no alterar las medidas reales; este ajuste permitió obtener los valores reales del volumen de agua aprovechable.

En la cuenca del sistema Lerma - Chapala - Santiago, como se han retenido y extraído importantes volúmenes de agua, el escurrimiento real es muy bajo, por lo cual la evaporación ajustada resulta demasiado alta. Considerando que, aproximadamente en la República Mexicana el escurrimiento representa el 30% de la precipitación y la evaporación el 70% de la misma (estimado con base en datos presentados por Del Río, F., op. cit. pp. 51 y 52) y aplicando la proporción para esta cuenca se calculó que:

$$P = 775.2mm$$

$$E = 542.6mm$$

$$Q = 232.6mm \begin{cases} Vp = 36.4mm \\ R = 196.2mm \end{cases}$$

Como resultado de esta estimación se concluye que la cuenca ha sufrido una disminución aproximada del 61% en su escurrimiento Q y del 99.7% en la reserva de agua R , en cambio, el volumen de agua aprovechable Vp se incrementó en 142.6%.

Estas variaciones muestran la gran explotación que se ha hecho de la reserva de agua de la cuenca del Lerma para abastecer a los centros de población asentados en ella, y a la Ciudad de México que pertenece a la cuenca del Pánuco.

Para el suministro de las poblaciones de la cuenca del Lerma durante los últimos 50 años se consume el agua de la reserva, y después de usarla, se vierte en los cauces del mismo sistema fluvial, es por eso que el porcentaje de agua aprovechable registra un elevado incremento. Cabe señalar que el agua de abastecimiento se toma de la reserva porque el agua de escurrimiento se encuentra contaminada como consecuencia de que se vierten en los cauces las aguas usadas o residuales de dichas poblaciones.

Los resultados obtenidos justifican la validez del método empleado para su aplicación en estudios relacionados con la evaluación del recurso agua.

BIBLIOGRAFIA

- Del Río, F., 1962. Panorama Hidrológico de la República Mexicana en General y del Valle de México en Particular. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 16 (1), pp. 41 - 60.
- Maderey R., L. E., 1992. El Clima como Factor Decisivo en la Estimación del Agua Aprovechable en las Cuencas Hidrográficas Húmedas. Memorias del Congreso Nacional de Geografía "México ante el Siglo XXI", celebrado en la ciudad de Aguascalientes del 27 al 29 de mayo de 1992. Tomo I, pp. 88 - 94.
- Maderey R., L. E., 1992 Balance hidrológico de la cuenca del Río Tizar durante el periodo 1967-1968. Instituto de Geografía, UNAM.
- Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, Volumen II Naturaleza, UNAM, 1990.

Vegetación actual de México y escenario aplicando un incremento de 2°C en temperatura y disminución del 10% en la precipitación

LOURDES VILLERS RUIZ e IRMA TREJO VAZQUEZ

Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México

RESUMEN

Se presentan los resultados de la aplicación de dos sistemas de clasificación clima-vegetación: Zonas de Vida de Holdridge y la creada a partir de clasificaciones específicas de clima y vegetación para México. Se creó un escenario climático aplicando +2°C de temperatura y -10% de precipitación. Se comparan los resultados de la relación clima-vegetación actuales, con los proyectados en el escenario planteado. Se presenta un mapa de cambio climático y una tabla que muestra la vegetación que podría ser afectada. En este escenario los bosques de coníferas y encinos se verían afectados negativamente y los bosques tropicales lluviosos se verían favorecidos. El área mínima de información espacial fue la que cubrió una retícula de 0.5° de latitud x 0.5° de longitud.

ABSTRACT

It presents the results to applicate two climate-v vegetation classification systems: Holdridge's Life Zone and the second one created from both climate and vegetation specific classifications for Mexico. A climate scenario with +2°C temperature and -10% precipitation was applied. The results of relation between current climate and vegetation conditions was compared to the forecasted conditions based on the mentioned scenario. It shows a map of climate change and a table of affected vegetation. With the scenario, oak woods and coniferus forests would have negative effects and, the tropical rain forests would have favourable conditions. The spatial resolution was a grid of 0.5°X 0.5° (Latitude, Longitude).

Introducción

Una creciente inquietud se ha manifestado sobre la representación espacial del impacto que tendrían los ecosistemas forestales ante un cambio climático. Esto implicaría que a partir de la vegetación potencial que existiría para México sin intervención del hombre y de su representación cartográfica, se intentara pronosticar con parámetros climáticos que tipo de vegetación resultaría afectada en el caso de existir un doblamiento de CO₂ en la atmósfera.

Estos mapas o expresiones cartográficas proponen representar de manera muy general las áreas forestales y de vegetación natural, y por consiguiente, la vida silvestre afectada por el cambio climático. Evidentemente este enfoque puede parecer "estático" dado que no se toman en cuenta los procesos dinámicos e históricos de la conformación de las diferentes asociaciones vegetales. Sin embargo ya muchos autores están de acuerdo en que la relación clima-vegetación es válida a nivel global y para escalas de representación pequeñas (Cramer y Leemans 1993).

Clasificación de clima-vegetación actual

La vegetación ha sido la fuente de información para la clasificación climática a nivel internacional, basta revisar los trabajos de Köppen (1936), Holdridge (1967) Thornthwaite (1948); así como a nivel nacional en los trabajos de García (1988). Estos criterios asumen que en lapsos de tiempo cortos, los patrones de distribución de vegetación y clima se encuentran en equilibrio, por ejemplo para el caso de México y relacionando la clasificación de Köppen para clima con la de Miranda y Hernández X (1963) para el de vegetación, se reporta que los climas cálido húmedos (Af, Aw) corresponden a selvas, palmares, manglares. Los BS corresponden a matorrales, nopaleras, cardonales, etc. (Rzedowski, 1978, p.153).

En el presente estudio se parte de estos modelos estáticos de equilibrio entre clima y vege-

tación, con el fin de obtener una relación entre estas dos variables tanto para las clasificaciones mexicanas, así como para la clasificación del modelo de zonas de vida de Holdridge y proponer un escenario en el cual existiría un aumento de 2°C de temperatura y un decremento de 10% de la precipitación, para la clasificación mexicana.

Clasificación de la Zonas de Vida de Holdridge

Holdridge publicó su obra en 1947 (revisada en 1967), asumiendo que los patrones de distribución de la vegetación y los climáticos se encontraban en equilibrio y que el clima determinaba en gran medida a los patrones de vegetación. De esta manera el concepto de "Zonas de Vida" para este autor suponía que los grandes tipos climáticos regionales podrían ser definidos y, de la misma manera, el tipo de ecosistema dominante (este concepto involucraba no sólo la vegetación natural potencial, sino la fauna y el posible uso del suelo).

Con el fin de relacionar los grandes tipos climáticos medidos con los ecosistemas dominantes, Holdridge basó su clasificación climática en las variables de temperatura y precipitación exclusivamente, proponiendo tres variables bioclimáticas: la primera variable biotemperatura, es definida como las horas de las temperaturas diarias registradas superiores a 0°C e inferiores a los 30°C dividido entre el número total de horas en un año, los valores de temperatura por debajo de los 0°C y por encima de los 30°C eran eliminados o se les daba el valor cero. La biotemperatura debería de expresar la cantidad de calor durante la estación de crecimiento de la planta, esta medida debe estar más relacionada con el crecimiento de la planta, que la simple medida de la temperatura media. La demanda de humedad por las plantas es expresada de dos maneras las cuales funcionalmente no se pueden separar claramente: la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial, el segundo es raro que se mida directamente en las estaciones meteorológicas. En el esquema de Holdridge evaporación y transpiración están directamente correlacionados con temperatura, el valor de evapotranspiración potencial se determina multiplicando la media anual de biotemperatura por 58.93. Esta constante fue obtenida de manera empírica y basada en un número limitado de observaciones, más que en principios físicos, científicamente comprobables.

Se ha reconocido que esta clasificación, basada en datos meteorológicos standard, como puede ser la media anual de temperatura y precipitación es información muy pobre para relacionarla con los tipos de ecosistemas. El enfoque de zonas de vida ignora otras determinantes ambientales para el funcionamiento de los ecosistemas como la estacionalidad, características del suelo, etc., por lo que específicamente para México, como señala García (1972), esta clasificación no coincide con la diversidad vegetal del país.

Los primeros trabajos para tener una versión computarizada de la clasificación de Holdridge, fueron llevados a cabo por Emanuel *et al.* en 1985, en este caso, al igual que en este trabajo, la variable biotemperatura se obtuvo a partir de la temperatura media anual, sin embargo para efectos de la aplicación al caso de México, esta modificación no tiene mayores implicaciones pues rara vez las temperaturas descienden al nivel de congelamiento o exceden los 30°C.

Implementación del Modelo Holdridge

Para la aplicación computarizada del modelo de zonas de vida de Holdridge se necesita crear una malla que cubra el territorio nacional con intersecciones cada 0.5° de latitud y longitud creando rectángulos de aproximadamente 55x55 km (estos rectángulos se angostan a medida que se acercan a los polos). Esta malla se creó y capturó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) resultando un total de 770 cuadros (ver Fig.1).

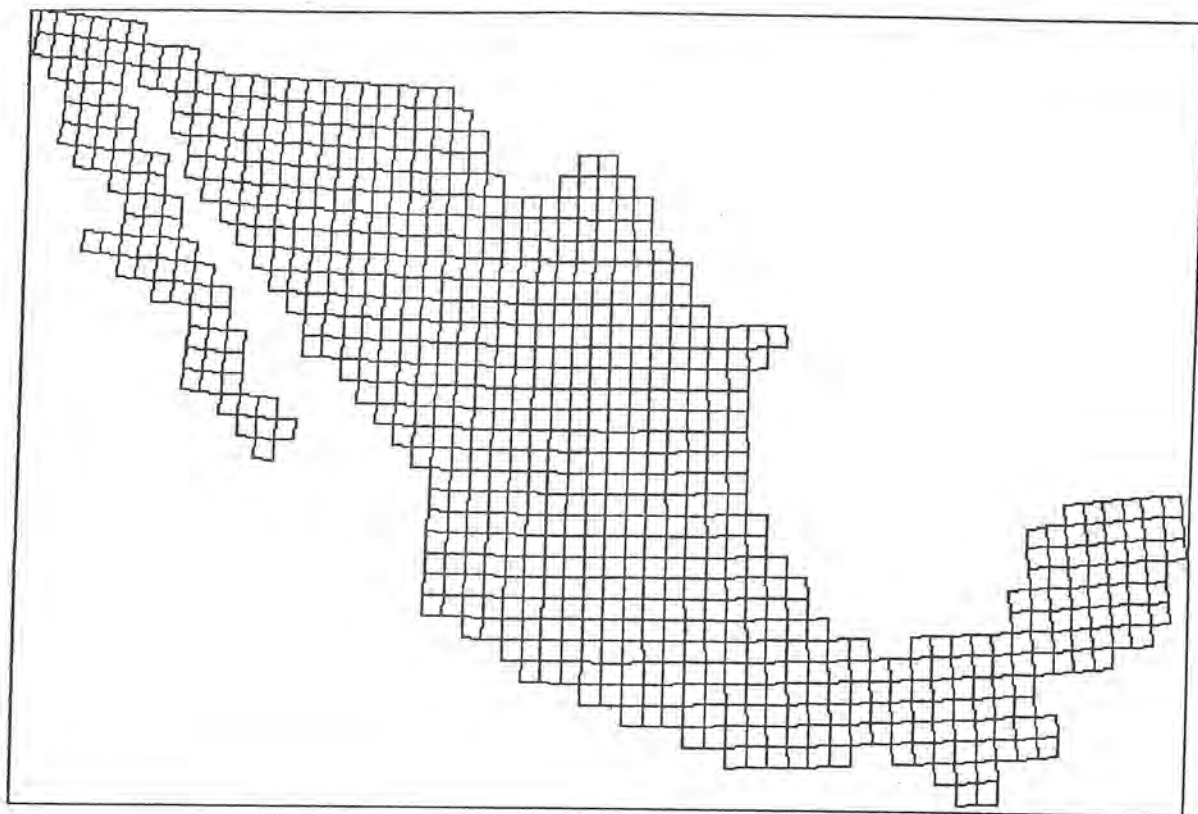


FIGURA 1. MALLA QUE CUBRE LA REPUBLICA MEXICANA CON INTERSECCIONES CADA 0.5° DE LATITUD Y LONGITUD.

Se propuso seleccionar un período de datos climáticos de cuando menos 30 años, para lo cual se seleccionaron las estaciones meteorológicas que cumplieran con este requisito y sin información faltante, además de que las estaciones estuvieran homogéneamente repartidas en la República y fueran representativas del área marcada por la malla. A partir del análisis de las estaciones meteorológicas disponibles y organizadas por entidad federativa, en la base de datos CLICOM y para los años de 1950 a 1990, se seleccionaron 365 estaciones para el período 1950-1980 puesto que este período ha sido el más estable y por consiguiente, el más representativo de las condiciones climatológicas de México. Este período es en el que faltan menos datos, además de que las estaciones seleccionadas fueron representativas de las condiciones climáticas del área considerada, esto es, de los polígonos de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$.

Cada una de las estaciones fue localizada utilizando cartas a escala 1:1,000,000 con el fin de elaborar un mapa final de 1:4,000,000. A cada estación se le asignó una clave y se capturó en un Sistema de Información Geográfica (ILWIS) (Fig.2 y Tabla 1 anexa).

Se creó una base de datos que contienen valores de precipitación y temperatura mensual de las estaciones climatológicas seleccionadas que presentan un período de 30 años de registros. La información de dichas estaciones proviene de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH y del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), cuyos datos se encuentran en una base de datos resguardada por el grupo de hidrología del Instituto de Geografía de la UNAM.

La información de cada estación se procesó y depuró con el fin de homogenizar los datos para el período seleccionado. Posteriormente se calcularon los promedios mensuales para obtener la información climática (temperatura y precipitación) del período 1950 a 1980.

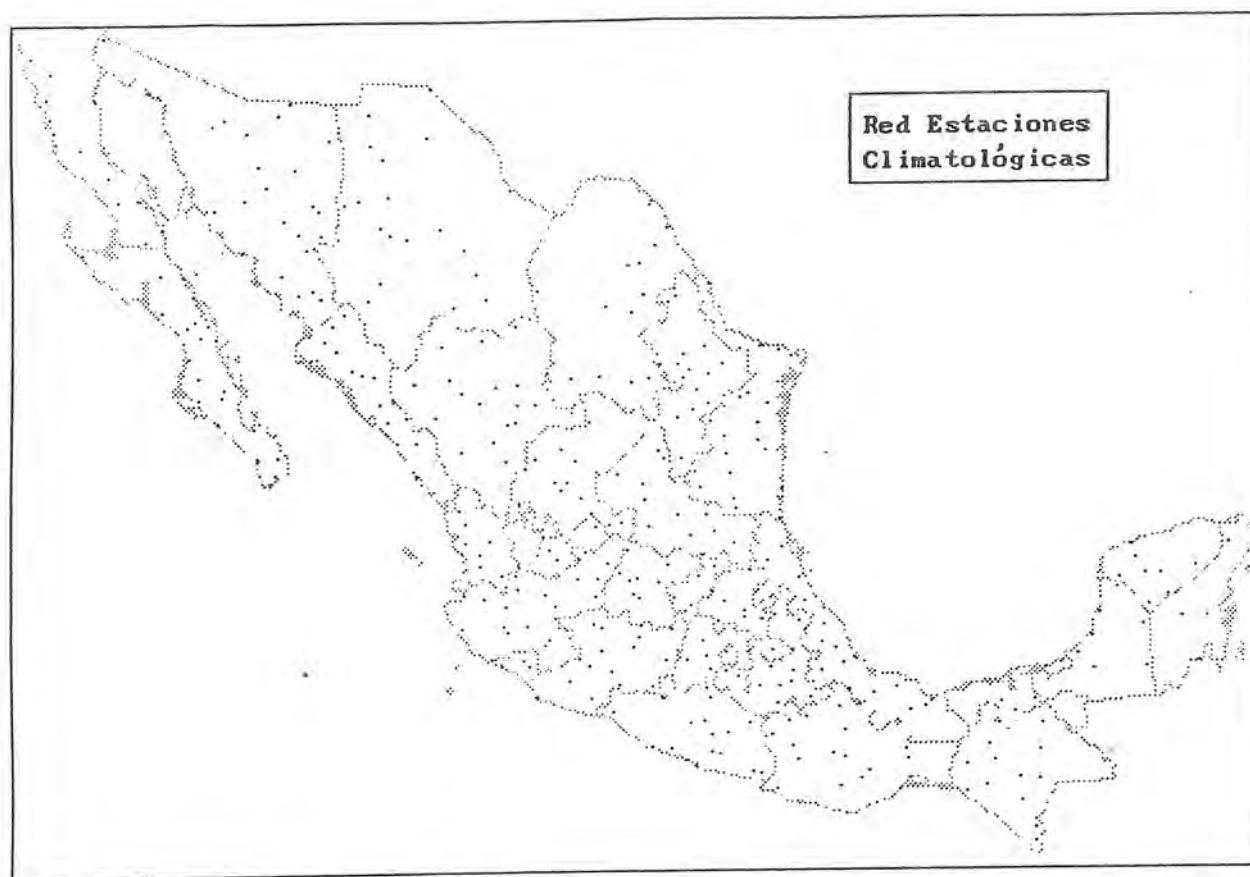


FIGURA 2. LOCALIZACION DE LAS 365 ESTACIONES METEOROLOGICAS EMPLEADAS PARA EL ESTUDIO

Clasificación Mexicana

Debido a que no existe un modelo específico de zonas de vida para México como es el de Holdridge a nivel mundial, se realizó una evaluación y selección de las de clasificaciones climáticas y de vegetación que se han hecho para México. El objetivo fue hacer un modelo de clasificación que permitiera reconocer las condiciones climáticas actuales y contar con las equivalencias necesarias entre este parámetro y el de vegetación. De esta manera, poder tener un modelo base de referencia del cual partir, para cuando se aplicaran los modelos prospectivos. La selección de las clasificaciones se basó en los siguientes puntos:

- 1) Que fuera aplicable para toda la República Mexicana.
- 2) Que fuera reconocida y utilizada a nivel técnico-científico en México.
- 3) Que fueran sistemas creados y validados con información generada en el país.
- 4) Que se pudiera hacer una relación entre la clasificación climática y la de vegetación.

Se seleccionó, para el caso de la aplicación del sistema de clasificación climática, la realizada por Köppen y modificada por García (1988) debido a que como señala la autora encontró una correlación entre los subtipos climáticos y la distribución de diversas asociaciones vegetales. Para el caso de la evaluación de vegetación y forestal de México se adoptó la realizada por Rzedowski (1978, 1992) referente a la distribución de la vegetación potencial de México.

Clasificación climática de E. García para la República Mexicana

Las modificaciones del sistema de clasificación de Köppen realizadas por García se basan en datos de 1900 estaciones meteorológicas en la República Mexicana, las modificaciones y adaptaciones realizadas por esta autora, se hicieron con el fin de definir las condiciones climáticas no solamente debidos a los cambios de latitud, sino también para definir las variaciones altitudinales e incluir regímenes pluviométricos que Köppen no toma en consideración. Köppen clasifica los climas en cinco grandes grupos y once tipos climáticos. García propone cuatro grupos climáticos, seis subgrupos, y 29 tipos (García 1988, p. 208). En cuanto a la variable temperatura introdujo a los semicálidos y en cuanto a grados de humedad separa los húmedos de los subhúmedos y dentro de éstos crea tres subgrupos cuyos límites se establecen por la relación precipitación-temperatura (P/T). En cuanto a régimen de lluvias disgregó tres grupos: de verano, intermedio y de invierno.

Clasificación de vegetación de J. Rzedowski

Rzedowski en 1978 publicó su obra la Vegetación de México, donde expone las bases fisiográficas, climáticas, morfológico-biológicas, de origen y distribución de la flora, que sirvieron de base para su clasificación de los tipos de vegetación de México. Como el mismo autor señala, su clasificación se basó no en un criterio único para distinguir las unidades, pues son tanto fisonómicos, como florísticos, y algunos ambientales. Son 10 los principales tipos de vegetación que reconoce: 1. Bosque tropical perennifolio, 2. Bosque tropical subcaducifolio, 3. Bosque tropical caducifolio, 4. Bosque espinoso, 5. Matorral xerófito, 6. Pastizal, 7. Bosque de Quercus, 8. Bosque de coníferas, 9. Bosque mesófilo de montaña, 10. Vegetación acuática y subacuática. El mismo autor señala en su obra dos aspectos importantes dentro de la realización de este estudio, uno es la lista de los tipos de vegetación de Miranda y Hernández X. (1963) con su correspondiente tipo climático y el otro es una tabla de equivalencias aproximadas de los diferentes autores con respecto a los tipos de vegetación existentes para México.

Implementación de los modelos mexicanos

Con estas dos clasificaciones claramente comprendidas, se propuso reconocer las condiciones climáticas que soporta cada tipo de vegetación y evaluar si un cambio climático modificaría de

manera sustancial las condiciones en las que se desarrolla la vegetación de un área determinada.

Por lo tanto se procedió a capturar en el SIG tanto la carta climática (García, E. 1989) en dos modalidades una de humedad y otra de temperaturas; se digitalizó igualmente la carta tipológica de vegetación de Rzedowski (1992). Posteriormente con auxilio del SIG se cruzó la información con el fin de tener una equivalencia entre los diferentes tipos climáticos reportados para México y los diferentes tipos de vegetación que se pueden presentar.

Resultados

Vegetación y clima actuales

1. Para el sistema Holdridge

Con los insumos mencionados anteriormente, para el modelo de zonas de vida de Holdridge se creó un escenario base, del cual ya se cuenta con los primeros resultados. Se compararon estos resultados con los ofrecidos a partir de un estudio hecho a nivel mundial por el CSMT (Country Studies Management Team). Sin embargo, ambos resultados no son muy satisfactorios ya que de las 39 zonas de vida que propone Holdridge a nivel mundial, en México únicamente se encuentran cinco de ellas que son: bosque tropical lluvioso (92.4% de la República), bosque tropical muy seco (2.2%) bosque tropical espinoso (0.7%), matorral tropical desértico (2.8%) y desierto tropical (1.9%). Estas clases no se apegan a la variabilidad climática y de vegetación de México, ya que comparando con los mapas de vegetación que existen para el país, un alto porcentaje es matorral xerófilo (37.7%), le siguen en importancia los bosques de coníferas y encinos (19.5%) y en tercer lugar el bosque tropical caducifolio que cubre el 14% de la superficie del país.

2. Para las clasificaciones mexicanas

Con el fin de tener una representación adecuada y comparable a la representación cartográfica del sistema de Holdridge se hizo una transformación gráfica de las clasificaciones de clima y vegetación mexicanas a la malla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Con el fin de tener una equivalencia aproximada entre los tipos de clima y de vegetación actuales se cruzó la información procedente de la tipología de climas con la clasificación de vegetación y se obtuvo una relación entre ellas. La tabla 2 muestra el tipo de vegetación según la clasificación de Rzedowski y su correspondiente para los parámetros de humedad y temperatura de la clasificación de García. Para cada uno de estos parámetros se indica el porcentaje de la superficie que cubre el tipo de vegetación con el que se relaciona.

En dicha tabla se muestran solamente los tipos de vegetación que presentan más del 11% de cobertura para la República Mexicana en cada uno de los parámetros, de esta manera, el Bosque Tropical Perennifolio se presenta en un clima cálido en un 91.9% y de acuerdo al parámetro humedad se encuentran en un 36.6% en clima subhúmedo 2 (Aw2, según la clasificación de García), en un clima húmedo (Am) en un 32.1%, etc. El matorral xerófilo se presenta en climas cuyas temperaturas varían en orden decreciente de los semicálidos (60.5% del territorio), a los cálidos (20.6%) y templados (18.7%) y en cuanto a humedad se presentan principalmente en los muy áridos (48.5% del país), en los áridos (26.3%) y semiáridos (21.5%).

TABLA 2. CORRESPONDENCIA DE LOS TIPOS DE VEGETACION SEGUN J. RZEDOWSKI CON LA CLASIFICACION CLIMATICA DE E. GARCIA PARA LA REPUBLICA MEXICANA

TIPO DE VEGETACION	TEMPERATURA		HUMEDAD	
	CUBRIMIENTO EN %	TIPO	CUBRIMIENTO EN %	TIPO
Bosque Tropical Perennifolio	91.9	Cálido	36.6	Subhúmedo2
			32.1	Húmedo
			15.7	Muy Húmedo
Bosque Tropical Subcaducifolio	98.9	Cálido	38.1	Subhúmedo1
			36.8	Subhúmedo0
			20.8	Subhúmedo2
Bosque Tropical Caducifolio	61.5 32.4	Cálido	44.3	Subhúmedo0
		Semicálido	22.1	Subhúmedo1
			11.8	Subhúmedo2
Bosque Espinoso	70.4 28.4	Cálido	32.2	Semiárido
		Semicálido	24.5	Aridos
			18.4	Muy áridos
			18.0	Subhúmedo1
Matorral Xerófilo	60.5 20.6 18.7	Semicálido	48.5	Muy árido
		Cálido	26.3	Aridos
		Templado	21.5	Semiárido
Pastizal	65.8 31.0	Templado	39.8	Semiárido
		Semicálido	27.1	Muy árido
			21.9	Arido
Bosque Templado (Coníferas y Quercus)	49.3 34.3 11.5	Templado	24.4	Subhúmedo2
		Semicálido	22.9	Subhúmedo1
		Cálido	18.8	Semiárido
			18.7	Subhúmedo0
Bosque Mesófilo	55.6 32.9	Semicálido	44.7	Muy húmedo
		Cálido	33.0	Húmedo
			17.1	Subhúmedo2
Vegetación Acuática	86.4	Cálido	56.2	Húmedo
			18.2	Subhúmedo0

NOTA: La equivalencia entre los tipos climáticos aquí señalados con la clasificación de E. García es como sigue: Los Cálidos=A, los Semicálidos=A(C) y C(A), los Templados=C; para el régimen de lluvia: los Húmedos y Muy Húmedos=m y f, Subhúmedo2=w2, Subhúmedo1=w1, Subhúmedo0=w0, Muy Arido=BW, Arido=BS0, Semiárido=BS1.

Escenario forestal con +2°C y -10% de precipitación (pp)

1. Para el sistema Holdridge

Con la misma metodología y con el fin de obtener una primera aproximación a la sensibilidad que presentan los ecosistemas forestales al cambio climático se realizó el primer escenario futuro con el cual simplemente se consideró un aumento de 2°C en la temperatura y una disminución de 10% en la precipitación. Al igual que para el resultado de la aplicación de las zonas de vida para la creación del modelo base actual, el escenario futuro no resultó satisfactorio.

2. Para las clasificaciones mexicanas

Se trabajó con la tipología climática de García, puesto que ya se cuenta con su correspondiente en tipo de vegetación. Se usaron los parámetros de temperatura y humedad y se aplicó a los datos de temperatura un aumento de 2°C y al parámetro de humedad se le restó 10% con el fin de conocer las modificaciones climáticas y consecuentemente la modificación a la clasificación de vegetación propuesta con base en la relación planteada en el modelo base actual. La tabla 3 presenta de manera resumida el porcentaje con respecto a la superficie de México de cada tipo climático y su equivalencia con la vegetación potencial actual y el nuevo porcentaje con aumento de 2°C y -10% de precipitación. En la Figura 3 se muestra el resultado del cruce del mapa de vegetación actual con el del escenario con el fin de mostrar espacialmente las áreas de cambio con respecto a las condiciones actuales.

TABLA 3. CORRESPONDENCIA ENTRE EL TIPO CLIMÁTICO CON LA VEGETACIÓN ACTUAL Y SUPERFICIE EN PORCIENTO DE LA VEGETACIÓN ACTUAL Y CON EL ESCENARIO DE +2°C DE TEMPERATURA Y -10% DE PRECIPITACIÓN

CLIMA	VEGETACION	VEGETACION ACTUAL (%)	2 T -10% PP (%)
Cálido Húmedo	Bosque Tropical Perennifolio	5.86	6.40
Cálido subhúmedo 2	Bosque Tropical Subcaducifolio	3.67	1.33
Cálido subhúmedo 1	Bosque Tropical Caducifolio y Bosque Tropical Subcaducifolio	17.70	20.12
Semicálido húmedo	Bosque Mesófilo	2.10	0.26
Semicálido Subhúmedo 2	Bosque Trop Sub., Bosque Mesófilo	0.38	0.91
Semicálido Subhúmedo 1	Bosque Tropical Caducifolio	6.58	4.62
Templado Húmedo	Bosque de Coníferas y Quercus	0.56	0.28
Templado Subhúmedo 2	Bosque de Coníferas y Quercus	2.67	1.32
Templado Subhúmedo 1	Bosque de Coníferas y Quercus	3.13	2.31
Semifrío	Bosque de Coníferas	2.31	0.00
Seco Cálido	Bosque Espinoso, Matorral Xerófilo	11.00	19.67
Seco Semicálido	Matorral Xerófilo, Bosque Espinoso	10.50	11.03
Seco Templado	Pastizal, Matorral Xerófilo	11.60	3.97
Arido Cálido	Matorral Xerófilo	6.07	16.88
Arido Semicálido	Matorral Xerófilo	11.37	10.26
Arido Templado	Pastizal	4.72	0.63

NOTA: La equivalencia entre los tipos climáticos aquí señalados con la clasificación de E. García es como sigue: Los Cálidos=A, los semicálidos=A(C) y C(A), los templados=C; para el régimen de lluvia en estos casos: los Húmedo=m y f, Subhúmedo2=w2, Subhúmedo1=w1 y w0. El semifrío=Cb' y Cc. Tanto los Secos=BS1 y BS0 como los Áridos=BW se diferencian por la temperatura.

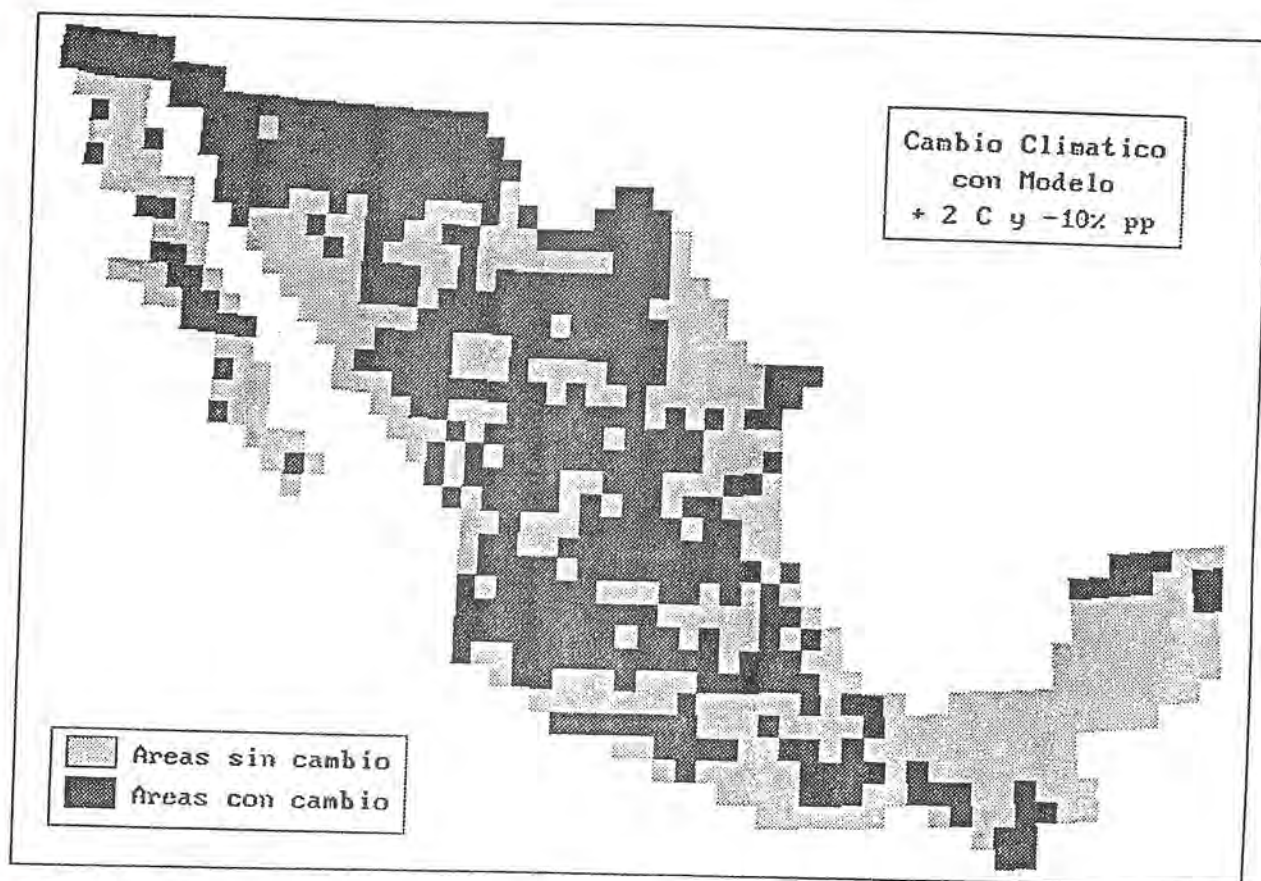


FIGURA 3. AREAS QUE PRESENTARIAN CAMBIO CLIMATICO CON UN AUMENTO DE 2°C Y DISMINUCION DE 10% DE LA PRECIPITACION.

Conclusiones

En general se puede observar que para la clasificación mexicana, y realizando el escenario de +2°C de temperatura y menos 10% de precipitación se favorecerían los climas cálidos y húmedos que corresponden a los bosques tropicales perennifolios. Por otro lado también aumentaría en área los climas cálido subhúmedo que corresponden a bosques tropicales caducifolio y subcaducifolio. Los climas templados y semicálidos donde se distribuyen básicamente los bosques de coníferas y algunos de encinos se verían disminuidos por lo que estos bosques se mostrarían más sensibles al cambio. Finalmente, debido a que existiría un aumento en la temperatura se beneficiarían los matorrales xerófilos y los bosques espinosos.

BIBLIOGRAFIA

- Cramer W. P. and R. Leemans, 1993. Assessing impacts of climate change on vegetation using climate classification systems. In: Allen M., Solomon and H. H. Shugart (Eds.) *Vegetation Dynamics and Global Change*. Chapman and Hall 338pp.
- Emanuel W. R., H. H. Shugart and M. P. Stevenson, 1985. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Clim. Change*, 7, 29-43.
- García E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios México. 217pp.
- García E., 1972 Correlación entre vegetación y clima según dos sistemas climáticos. En: Segunda

- mesa redonda sobre recursos naturales. Comisión de Geografía. Instituto Panamericano de Geografía Publ. No. 329 pp. 103-128. Río de Janeiro.
- García E. 1989. Climas. Hoja IV.4.10. Escala: 1:4,000 000. Atlas Nacional de México. Vol II.
- Holdridge, L. R. 1967 Life zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica 206pp.
- Köppen, W., 1936. Das Geographische System der Klimate in Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C: 1-44.
- Miranda, F. y E. Hernández X., 1963 Los Tipos de Vegetación de México y su Clasificación. Bol. Soc. Bot. Mex. 28:29-179.
- Rzedowski, J. 1978 Vegetación de México. Ed. Limusa México. 432pp.
- Rzedowski, J. 1992 Vegetación Potencial. Hoja IV.8.2. Escala:1:4,000 000. Atlas Nacional de México Vol II.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-89.

Tabla 1
(ANEXO)

TABLA 1. ESTACIONES METEOROLOGICAS SELECCIONADAS POR ENTIDAD FEDERATIVA

Clave	Estación	Clave	Estación	Clave	Estación	Clave	Estación
Aguascalientes:		5025	Palestina	10013	Durango	14027	Cihuahatlán
1011	Pabellón	5026	Parras	10014	Francisco I Madero	14044	El Grullo
Baja California:		5027	Piedras Negras	10016	Guadalupe Victoria	14049	Hostotipaquillo
2001	El Alamo	5036	Torreón	10018	Guatimapé	14057	Jesús María
2004	Bahía de los Angeles	5038	Villa Acuña	10025	Nazas	14064	Mascota
2005	El Arco	5051	Cuatro Ciénegas	10031	Peñón Blanco	14075	Puerto Vallarta
2007	El Barril	5056	General Cepeda	10035	El Rodeo	14078	Quito
2011	Chapala	5065	Muzquiz	10036	El Salto	14090	San Miguel el Alto
2014	Las Escobas	5079	Saltillo	10037	San Antonio	14097	Tamazula
2025	Punta Prieta	5087	Sierra Mojada	10049	Tepehuanes	14098	Tapalpa
2028	El Rosario	5091	Viesca	10050	Topia	14105	Tomatlán
2032	San Felipe	Colima:		10051	Las Truchas	14108	Totatiche
2033	San Fernando	6007	Coquimatlán	10103	Guanaceví	14111	Tuxcueca
2036	San Telmo	6011	Manzanillo	10106	Mezquitil	14113	Unión de Tula
2042	El Socorro	6027	Ixtlahuacán	10113	Santiago Papasquiaro	14114	Valle de Guadalupe
2066	Ensenada	Chiapas:		Guanajuato:		14191	Guadalajara
2068	Mexicali	7020	Cintalapa	11022	Irapuato	14195	Lagos de Moreno
2080	Tijuana	7021	Comitán	11027	León	México:	
Baja California Sur:		7022	Copainala	11034	Ocampo	15028	Ixtlahuaca
3002	El Aguajito	7045	Liquidambar	11044	Salamanca	15056	Río Frío
3005	Buenavista	7058	Ocosingo	11053	San Luis de la Paz	15081	Tenancingo
3006	Cabo San Lucas	7061	Palenque	11054	San Miguel de Allende	15174	Valle de Bravo
3009	Comondú	7090	Tapachula	11102	Guanajuato	15226	Toluca
3013	Paso de Iritú	7097	Venustiano Carranza	11116	Silao	Michoacán:	
3017	Loreto	7098	Villa Flores	Guerrero:		16002	Acuítzio
3020	Mulegé	7156	Finca Hamburgo	12003	Cd. Altamirano	16005	Aguililla
3021	Ojo de Agua	7218	Tonalá	12007	Atoyac	16009	Arteaga
3024	Pénjamo	7223	Tuxtla Gutiérrez	12010	Azoyu	16014	Buenavista Tomatlán
3031	La Purísima	Chihuahua:		12015	Colotipa	16028	Cuitzeo
3032	El Refugio	8016	Cd. Cuauhtémoc	12016	Coyuca de Benítez	16033	Churumuco
3034	El Rosario	8020	Chinipas	12022	Chilapa	16044	La Huacana
3038	San Felipe	8022	Delicias	12035	Olinalá	16046	Huetámo
3039	San Ignacio	8023	Dolores	12042	San Luis San Pedro	16059	Maravatío
3042	San José de Gracia	8024	Galeana	12047	Taxco	16062	Morelia
3047	Santa Rosalía	8030	Cd. Guerrero	12050	El Terrero	16087	San Telmo
3048	Santiago	8032	Hidalgo del Parral	12052	Tierra Colorada	16106	Tuzantla
3049	Sto. Domingo	8034	Cd. Jiménez	12056	La Unión	16117	Zitácuaro
3051	Todos Santos	8036	Cd. Juárez	12058	Xochipala	16122	Apatzingán
3052	Bahía Tortugas	8037	La Junta	12092	Chilpancingo	16182	Uruapan
3068	La Paz	8041	Madera	12097	Iguala	16189	Zamora
Campeche:		8047	Namiquipa	12139	Tlacotepec	16200	Coahuayana
4005	Ciudad del Carmen	8051	Ojinaga	Hidalgo:		Morelos:	
4006	Champotón	8084	Ascención	13009	Mineral el Chico	17004	Cuautla
4007	Dzibalchén	8089	Batopilas	13034	Orizatlán	17044	Cuernavaca
4008	Escárcega	8095	Cd. Camargo	13061	Tulancingo	Nayarit:	
4012	Calkini	8126	Chihuahua	13066	Zimapán	18001	Acaponeta
4016	Sabancuy	8171	Nuevo Casas Grandes	13084	Pachuca	18005	Compostela
4020	Zohlaguna	8231	Villa Ahumada	13102	Tula	18008	Ixtlán del Río
4021	Campeche	Distrito Federal:		Jalisco:		18016	San Blas
Coahuila:		9049	Tacubaya	14005	Ajojuar	18019	Santiago Ixcuintla
5002	Allende	Durango:		14008	Antonio Escobedo	18025	Despeñadero
5022	Monclova	10007	Ceballos	14011	Atengo	18048	Tepic
5024	Nueva Rosita	10011	Cuencame	14013	Atequiza	18051	La Yesca

**TABLA 1. ESTACIONES METEOROLOGICAS SELECCIONADAS POR ENTIDAD FEDERATIVA
(CONTINUACION)**

Clave	Estación	Clave	Estación	Clave	Estación	Clave	Estación
	Nuevo León:	22020	San Juan del Río	26066	Tres Hermanos	30257	Cosamaloapan
19005	Cadereyta	22033	Jalpan	26069	Ures	30261	Jalapa
19007	Cerralvo	22039	Arroyo Seco	26071	Yecora		Yucatán:
19012	El Cuchillo		Quintana Roo:	26084	Cananea	31003	Becanthen
19013	Dr. Arroyo	23001	Carrillo Puerto	26102	Hermosillo	31017	Mérida
19014	Las Enramadas	23003	Cozumel	26110	Naco Arispe	31024	Progreso
19017	Granja Experimental	23005	Tampac	26112	Navojoa	31029	Sotuta
19021	Iturbide	23006	Kantunilkin	26126	Sahuaripa	31032	Telchaquillo
19022	Salinillas	23019	Chetumal	26129	San Luis Río Colorado	31046	Maxcanú
19024	Cienega de Flores		San Luis Potosí:	26130	Santa Ana	31048	Peto
19071	Lampazos	24001	Agua Buena		Tabasco:	31055	Valladolid
19029	Montemorelos	24004	Ballesmi	27022	Villahermosa		Zacatecas:
19033	Raíces	24007	Cedral	27042	Jonuta	32001	Camacho
19036	Rinconada	24008	Cerritos	27047	Macuspana	32002	Canitas
19039	La Boca	24009	Cd. del Malz	27055	Teapa	32008	Excarne
19072	Linares	24010	Charcas		Tamaulipas:	32010	Fresnillo
19075	Monterrey	24015	Matehuala	28001	Abasolo	32015	Juchipila
	Oaxaca:	24018	Moctezuma	28005	Antiguo Morelos	32022	Río Grande
20018	Comaltepec	24031	Sto. Domingo	28007	El Barretal	32025	San Pedro Piedra Gorda
20023	Chacaltongo	24085	Río Verde	28009	Burgos	32028	Santa Rosa
20033	Huajuapán	24093	San Luis Potosí	28011	Ciudad Mante	32029	El Sauz
20047	Juchitán		Sinaloa:	28014	Control B-R-B-1-1	32030	Sombrerete
20053	Matías Romero	25008	El Bledal	28018	Hacienda Sta. Elena	32032	Tecomate
20057	Nejapa Boquilla	25014	Cosala	28026	Jiménez	32060	Chalchihuites
20072	Pinotepa Nacional	25015	La Cruz	28027	Llera	32073	Pinos
20074	Puerto Ángel	25016	Culiacán	28033	Matamoros	32074	El Platanito
20080	Salina Cruz	25022	El Fuerte	28034	Villa Méndez	32086	Villa García
20101	Santo Domingo	25031	Mazatlán	28037	Nuevo Laredo	32089	Zacatecas
20106	Sarabia	25032	Mocorito	28042	Reynosa		
20122	Tepelmeme	25043	Quila	28046	San Fernando		
20129	Tlacolula	25047	San Blas	28053	Soto la Marina		
20132	Tuxtepec	25049	San Ignacio	28056	Tula		
20184	Miahuatlán	25059	Topolobampo	28057	Cd. Victoria		
20199	San Carlos Yautepec	25072	Badirahuato	28058	Villagrán		
20219	Silacayoapan	25084	Choix	28161	Tampico		
20226	Tlaxiaco	25093	Guamuchil		Tlaxcala:		
	Puebla:		Sonora:	29039	Apizaco		
21004	Acatlán	26002	Alamos		Veracruz:		
21026	Cuetzálan	26003	Altar	30001	Acayucán		
21039	Huauchinango	26005	Arivechi	30025	Coatzacoalcos		
21045	Izúcar de Matamoros	26006	Atil	30026	Cordoba		
21058	Oriental	26010	Bavispe	30066	Minatitlán		
21062	Puebla	26018	La Dura	30067	Misantla		
21081	Tecamachalco	26024	Guaymas	30076	Nautla		
21085	Tepeji de Rodríguez	26031	Moctezuma	30084	Ozuluama		
21089	Teziutlán	26040	Nuri	30088	Papantla		
21090	Tlaxiaco	26041	Cd. Obregón	30095	Rinconada		
21108	Zinacatepec	26044	Opodepe	30100	San Andres Tuxtla		
	Querétaro:	26048	Puerto Peñasco	30114	Soledad Doblado		
22002	Arnealco	26052	San Bernardo	30119	Tantoyuca		
22016	Pena Miller	26054	San Javier	30127	Tierra Blanca		
22018	Querétaro	26055	San José	30133	Tuxpan		
				30137	Veracruz		

Comportamiento en la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático global

FLORES, E. M., R. ARAUJO, E. BETANCOURT

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, C. U., 04510, México, D. F., México

D. LIVERMAN

Pennsylvania State University

RESUMEN

En este trabajo se presenta la creación de dos escenarios con las zonas potencialmente aptas para el maíz de temporal, uno con las características de temperatura y precipitación actuales y el otro con un aumento de dos grados de temperatura y un 20% de precipitación. En el escenario actual se obtuvo que el 10.69% de toda la superficie del país puede considerarse como apta para el cultivo de maíz por tener en cada etapa fenológica los valores óptimos para su desarrollo. Mientras tanto el escenario de cambio mostró que solo el 4.34% del territorio sería apto, lo que significaría una disminución drástica de las zonas con aptitud para el cultivo ante un cambio climático de esta naturaleza.

1. Introducción

El presente trabajo incluye resultados preliminares del estudio Agricultura y Cambio Climático que forma parte de la sección vulnerabilidad, del proyecto internacional Estudio de País (Country Study) relativo al Cambio Climático Global.

La agricultura de temporal en México es una actividad que se ha caracterizado por enfrentarse constantemente a condiciones climáticas adversas de tal manera que se ha señalado a México como uno de los países con mayor vulnerabilidad a las variaciones y cambios climáticos. (Liverman 1992a). Al respecto, los estudios de cambio climático predicen, hasta el momento, un futuro con aumento de las temperaturas medias y disminución de las precipitaciones para México, de tal manera que los impactos en la agricultura se esperan muy severos y con ello, el panorama socioeconómico del país es preocupante.

La causa del calentamiento global se debe al incremento de bióxido de carbono y otros gases en la atmósfera, pero la magnitud del impacto que éste tendría en la agricultura de temporal ha propiciado nuevas interrogantes. Una de las mayores inquietudes es ¿cuál será la modificación que tendrían las superficies potencialmente aptas para el cultivo de maíz de temporal ante una virtual modificación climática?

Se propone responder a esta interrogante desarrollando el presente trabajo guiado por los objetivos siguientes:

1. Identificar las zonas potencialmente aptas para el cultivo del maíz de temporal considerando como nuestro escenario base las condiciones climáticas actuales y los requerimientos de temperatura y precipitación en las diferentes etapas fenológicas del maíz.
2. Generar un escenario de cambio considerando un aumento de temperatura de dos grados centígrados y un incremento del 20% en la precipitación. Esto obedece a las pruebas de sensibilidad de los modelos de circulación general. En una etapa posterior de este mismo proyecto se aplicarán los modelos GFDL y CCCM.
3. Identificar y cuantificar los cambios que se manifestaron al contrastar el escenario actual con el del posible cambio climático.

La posibilidad de conocer las modificaciones que tendría la frontera agrícola ante el cambio global nos ofrece la posibilidad de sugerir que se implementen políticas idóneas, basadas en una coherencia agro-ecológica, que tengan una viabilidad económica y que sean de verdadero

beneficio social.

Además, es conveniente señalar que este primer escenario está basado exclusivamente en los valores de temperatura y precipitación que necesita el maíz para alcanzar un óptimo desarrollo en cada una de sus periodos fenológicos (requerimientos climáticos) y que no descartamos la posibilidad de incluir los requerimientos edáficos al finalizar el proyecto.

2. Límites de tolerancia climática para el maíz

El modelo conceptual en el que sustentamos este trabajo obedece a la amplitud de los Límites de Tolerancia, señalado por Wilsie desde 1956 y que aún sigue vigente, donde las plantas y en este caso el maíz tienen un rango de valores óptimos de crecimiento. Cuando estos valores empiezan a disminuir o a sobrepasarse, según sea el caso, también en un rango de amplitud diferente, se ocasiona un decremento en el desarrollo de las plantas llegando éstas a la desaparición (Fig. 1)

FIG. 1 AMPLITUD DE LOS LÍMITES DE TOLERANCIA

LÍMITE MÍNIMO DE DISTRIBUCIÓN	OSCILACIÓN DEL VALOR ÓPTIMO O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN	LÍMITE MÁXIMO DE DISTRIBUCIÓN
AUSENTE		AUSENTE
← DISMINUCIÓN		DISMINUCIÓN →
	ESCALA PARA CUALQUIER FACTOR	

Fuente: Wilsie, C., 1956. Cultivos, aclimatación y distribución. Acribia. Zaragoza, España.

Fig. 1. Amplitud de los límites de tolerancia

Por otro lado, el maíz de temporal requiere diferentes condiciones de temperatura y humedad a lo largo de su desarrollo fenológico. Para fines de este trabajo se consideraron cinco subperiodos fenológicos: germinación, crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez.

Requerimientos o tolerancia de temperatura

El maíz presenta tres valores: óptimo, mínimo y máximo. Estos no son homogéneos sino que fluctúan según el subperíodo fenológico. Los requerimientos óptimos de temperatura son de 20 a 30 grados, exceptuando el período de germinación que es de 20 a 25 grados. Los valores mínimos fluctúan entre 10 y 20 grados y los máximos entre 30 y 40 grados. (Figura 2).

FIG 2. REQUERIMIENTO DE TEMPERATURA EN EL CICLO FENOLÓGICO DEL MAÍZ

Subperíodos Fenológicos	Requerimientos Térmicos (Grados Centígrados)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
1o. Germinación	10	20 a 25	40
2o. Crecimiento Vegetativo	15	20 a 30	40
3o. Floración	20	20 a 30	30
4o. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	20	20 a 30	30
5o. Madurez	20	20 a 30	30

Fuente: Sánchez, S. L., 1983. Comunicación personal. Centro de Investigación Agrícola, Morelia, Mich.

Fig. 2. Requerimiento de temperatura en el ciclo fenológico del maíz

Requerimientos o tolerancia de precipitación

Los requerimientos de precipitación para el maíz en todo su ciclo de desarrollo fluctúan entre 500 y 1000 milímetros, pero la cantidad óptima es de 740. Esta debe estar distribuida de tal manera, que el máximo de precipitación, corresponda a la etapa de floración porque es cuando el maíz tiene la mayor demanda de agua. Mientras que en las etapa de germinación y madurez los requerimientos de humedad son mínimos. (Ver figura 3).

FIG 3. REQUERIMIENTO DE PRECIPITACION EN EL CICLO FENOLÓGICO DEL MAÍZ

Subperíodos Fenológicos	Requerimientos Hídricos (Milímetros)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
Total Ciclo Vegetativo	400 - 500	500- 1000	> 1000
1o. Germinación	-	45	-
2o. Crecimiento Vegetativo	-	170	-
3o. Floración	-	220	-
4o. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	-	215	-
5o. Madurez	-	90	-

Fuente: Secretaría de Educación Pública, 1983. Manuales para Educación Agropecuaria. No. 10. Area Producción Vegetal. Trillas, México.

Fig. 3. Requerimiento de precipitación en el ciclo fenológico del maíz

La etapa de floración, vital para obtener buenos rendimientos, en la mayor parte de las zonas temporaleras del país es en agosto, y muchas veces coincide con sequías de diferente magnitud propiciando bajos rendimientos y en ocasiones la pérdida total de la cosecha.

3. Metodología

Para llevar a cabo la caracterización de las zonas potencialmente aptas para el cultivo del maíz se construyó en primera instancia el escenario climático base considerando temperatura y precipitación y, por tratarse de una agricultura de temporal, se consideró exclusivamente los valores de mayo a octubre. Los valores considerados en el caso de la temperatura fueron las medias mensuales, la máxima y mínima promedio y la máxima y mínima extrema. En el caso de la precipitación, la media mensual.

Se seleccionaron originalmente 162 estaciones meteorológicas uniformemente repartidas en el país. Sin embargo, no todas presentaron datos de las cinco variables seleccionadas en el período 1950 a 1980. Las estaciones que cumplieron con esta condición fueron 83 para temperatura y 95 para precipitación. Los datos de las variables meteorológicas seleccionadas fueron obtenidas del CLICOM y a partir de ellas mediante interpolación, utilizando el paquete de graficación SURFER, se obtuvieron los mapas de isotermas e isoyetas. Siguiendo el procedimiento anterior se creó el escenario de cambio aumentando dos grados de temperatura e incrementando el 20% de precipitación a los valores del escenario base. Los mapas generados fueron accesados a un Sistema de Información Geográfica (MAPINFO e IDRISI) lo que facilitó el manejo de la información cartográfica dando como resultado los dos escenarios de aptitud para el maíz.

4. Resultados y discusión

Escenario Actual

Analizando los valores de cada una de las estaciones y contrastándolos con los requerimientos fenológicos del maíz se tuvo que muy pocas estaciones pueden ser clasificadas como aptas. Estrictamente las zonas aptas para el cultivo del maíz serían aquellas que durante los seis meses presentaron los valores óptimos. Así, de las 83 estaciones seleccionadas sólo 6 de ellas, que representan el 7.2% del total, demostraron tener esta condición, lo que dejaría al 92.7% restante clasificadas como medianamente aptas y no aptas. Con esto corroboramos que las condiciones climáticas actuales para la agricultura de temporal de maíz no son las óptimas.

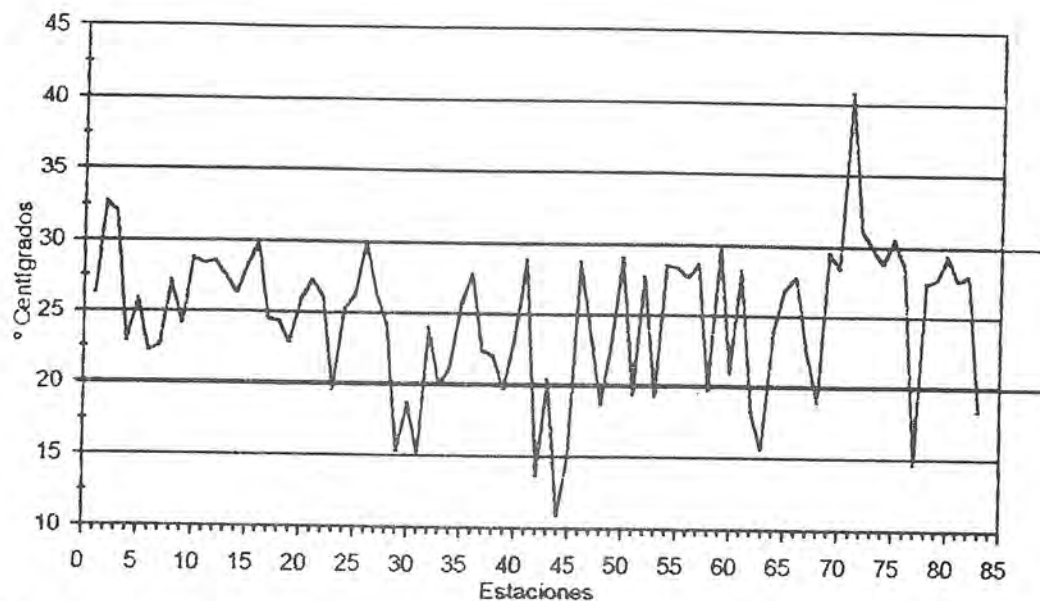
El mayor número de estaciones que presentó valores con aptitud se observó en el mes de agosto. Tanto para temperatura como precipitación éste mes es de gran significado porque coincide con la floración, fase crucial para obtener buena cosecha. (Figuras 4 y 5).

Con respecto a la superficie cuantificada actualmente, y no considerando los requerimientos edáficos ni de deterioro como erosión o desertificación, se tiene que tan sólo 209 340 km² pueden ser considerados como zonas aptas para el cultivo de maíz de temporal mientras que 213 037 km² como medianamente aptas por presentar déficit o exceso de temperatura o precipitación mientras el resto del territorio es considerado como no apto. Con estos resultados el 78.44% del país no es apto para cultivar maíz con las condiciones actuales. (Figura 6).

Escenario de Cambio

En el escenario de cambio, los valores de temperatura se incrementaron homogéneamente dos grados, coincidentemente con el escenario actual, resultaron el mismo número de estaciones (seis) como aptas para el cultivo del maíz. Aunque iguales en número no corresponden a las mismas estaciones. Con respecto a la superficie del país con aptitud para el maíz, al incrementarse la temperatura y la precipitación, ésta sería de 85 090 km², es decir 4.34% del total lo cual implicaría una disminución de la actual superficie con aptitud. La superficie medianamente apta sería de 165 164 km², equivalente a un 8.46% del país, mientras que la superficie no apta se incrementaría a 1 707 948 km², lo que significaría que el 87.20% del territorio estaría considerado como no apto. (Figura 6).

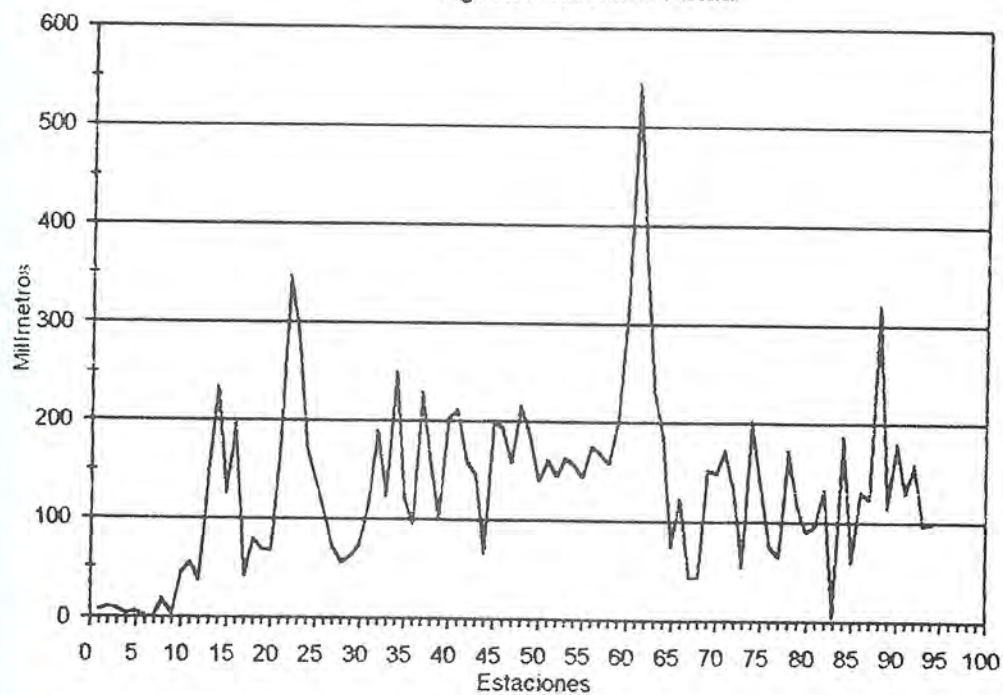
Fig. 4
Temperatura Media Mensual 1950-1980
 Agosto. Escenario Actual



Vulnerabilidad: Subárea

CCA. UNAM

Fig. 5
Precipitación Media Mensual
 Agosto. Escenario Actual



Vulnerabilidad: Subárea Agrícola

CCA. UNAM

Aptitud	Escenario Actual		Escenario de Cambio Incremento de 2° de temp. y 20% más de precipitación.		Diferencia Escenario Actual / Escenario de Cambio	
	Km2	%	Km2	%	Km2	%
Apta	209 340	10.69	85 090	4.34	- 124 250	- 6.35
Medianamente apta	213 037	10.87	165 164	8.45	- 47 873	- 2.41
No apta	1 535 825	78.44	1 707 948	87.20	+ 172 123	+ 8.76
Total	1 958 202	100.00	1 958 202	100.00		

Fig. 6 Cuadro comparativo de escenarios.

5. Conclusiones

Liverman (1992) llama la atención acerca de la falta de certidumbre en los modelos que hasta ahora indican que, de aumentarse al doble los volúmenes de bióxido de carbono en la atmósfera, las temperaturas se elevarían desde dos grados en el ecuador hasta 14 grados en los polos. En este caso, creando un escenario con un aumento de dos grados centígrados y un 20% de precipitación se reducen drásticamente las zonas con aptitud para el maíz con lo que podemos concluir que no cabe duda que debemos seguir considerando lo que implicaría un cambio climático para países como México que enfrenta problemas de disponibilidad y distribución de recursos. De tal manera, se sugiere trabajar en la aplicación de modelos de cambio climático a nivel regional así como perfeccionar las técnicas para evaluar sus impactos en la agricultura por ser esta una actividad generadora de alimentos.

BIBLIOGRAFIA

- Flores, M., 1987. Comportamiento y distribución de la temperatura y la precipitación durante la época estival y su influencia en la agricultura de temporal. Tesis maestría. UNAM. México
- Flores, E. M., 1992. Aplicación de un sistema de información geográfica en estudios de zonificación agroclimática. En: Mem. del II Congreso Ciencias de la Tierra. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- Gay, C., 1992. Modelos de clima y el cambio global. En: Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM. (Octubre).
- Liverman, D., 1992. The regional impact of global warming in Mexico. In: The Regions and Global Warming. Schmandt, J. y J. Clarkson (eds) Oxford Univ. Press.
- Liverman, D., 1992a. Posibles impactos de los cambios climáticos en México. En: Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM. (Octubre).
- Liverman, D., 1993. Global Change and Mexico. *Earth and Mineral Sciences*, 60(4), 71-76.
- Sánchez, S. L., 1983. Comunicación personal. Centro de Investigación Agrícola. Morelia, Mich.
- Secretaría de Educación Pública, 1983. Manuales para educación agropecuaria No. 10. Área Producción Vegetal. Trillas, México.
- Wilsie, C., 1956. Cultivos, aclimatación y distribución. Acribia. Zaragoza, España.

Agricultura en México y cambio climático global

FERRER, R., CONDE, C. VILLAREAL, G.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F.

LIVERMAN, D.

Pennsylvania State University

RESUMEN

Presentamos los resultados de los posibles efectos de un cambio climático en la producción de temporal del maíz en una localidad del Estado de México (Atlacomulco). Para ello se emplea el modelo CERES - Maize que requiere de datos diarios de temperatura (máxima y mínima), precipitación y radiación solar para simular la producción real. Para el caso de Atlacomulco se obtuvieron 14 años de datos diarios de la base de datos CLICOM. También se utilizan los datos recabados referentes al manejo del maíz y al tipo de suelo.

Para simular el cambio climático se utilizaron dos modelos de circulación general (GFDL - R30 y CCCM). También se realizaron estudios de sensibilidad proponiendo combinaciones de incrementos en la temperatura y la precipitación (+2°C y +4°C para temperatura; $\pm 20\%$ en precipitación).

ABSTRACT

We present the results obtained in the study of the possible effects of a climate change in the rainfed corn production for Atlacomulco, in the Estado de Mexico. To achieved this purpose, the model CERES - Maize was used. This model needs daily temperature (maximum and minimum), precipitation and solar radiation data to simulate the actual production. For Atlacomulco, 14 years of these daily data were obtained from the CLICOM data base. Also the soil and crop management data are employed.

To simulate climate change, two General Circulation Models were used: the GFDL-R30 and the CCCM. Sensibility analysis were also done combining changes in temperature and precipitation (+2°C and +4°C with $\pm 20\%$ changes in precipitation).

1. Introducción

El Estado de México ha sido en las dos últimas décadas uno de los dos principales productores de maíz en México; de 1981 a 1989 produjo 1.77 millones de toneladas de maíz con rendimientos promedio de 2.71 ton/ha. De la superficie cosechada promedio para tales años, el 82.56% corresponde a cultivos de temporal. Por estas dos razones (alta producción a nivel nacional y producción de temporal), se decidió que un estudio de la vulnerabilidad de la agricultura en este Estado a un cambio climático sería relevante para el país ya que es representativa del método de producción socialmente más extendido.

En la primera fase del "Estudio de País: México", se seleccionaron las localidades de Toluca y Atlacomulco debido a que representan comunidades de buen rendimiento. Atlacomulco se localiza a 2,520 msnm con una longitud de 99°42' oeste y una latitud de 19°49'. Toluca está localizada a una altitud de 2,638 en longitud oeste de 99°38' y latitud de 19°17'.

Si bien regímenes hídricos utilizados en la zona corresponden a riego completo, riego incompleto (punta de riego), temporal con humedad residual y temporal estricto, es la forma de temporal la que predomina en el Estado (ver figura 1).

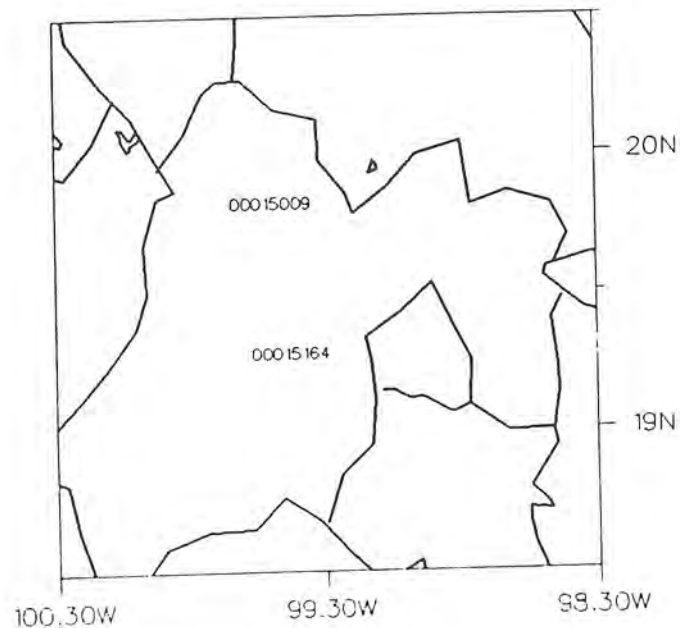
2. El modelo empleado (CERES - Maize)

El Modelo CERES - Maize requiere para la construcción del "escenario base" de archivos de clima, de suelos, de manejo de cultivo y de la variedad de maíz empleada. (ver figura 2) Con ello se podrá simular entonces la producción real.

Estado de México

Atlacomulco 19° 49' -99° 42' 2,520.0 m

Toluca 19° 17' -99° 38' 2,638.0 m



Sup. Sembrada	Sup. Cosechada (1993)	Producción
107, 551 Ha Riego 480,301 Temporal	102,404 Ha Riego 466,638 Temporal	321,458 Ton Riego 911, 965 Temporal

FIGURA 1.

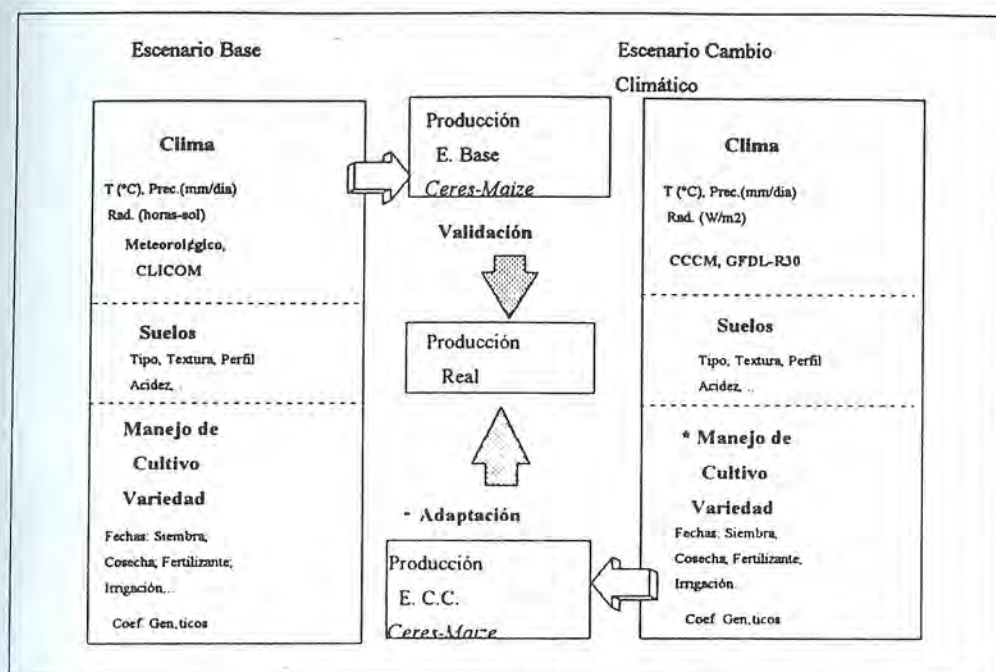


Figura 2. Esquema que describe al modelo *CERES - Maize*. A la izquierda se ilustran los archivos de entrada para construir el escenario base. A la derecha se muestran los correspondientes para construir escenarios de cambio climático. Al centro, las simulaciones de producción de maíz, que deben de ser contrastadas con la producción real.

La comparación entre la producción simulada y la producción real, permitirá calibrar al modelo antes de introducir las condiciones de cambio climático. En este nivel también es posible realizar estudios de sensibilidad, proponiendo incrementos en la temperatura y precipitación tales que permitan analizar la capacidad de "respuesta" del cultivo a dichos cambios.

En la misma figura 2, se observa que la construcción del escenario de cambio climático se basa en la introducción de los cambios propuestos por los modelos CCCM y GFDL-R30 bajo condiciones de una duplicación de bióxido de carbono. Los otros archivos de entrada (suelos, manejo de cultivos, etc.). permanecerán iguales.

La diferencia que exista entre la simulación de la producción real y la que se obtiene por un cambio climático será la medida del impacto que pudiera tener dicho cambio en la producción agrícola para el sitio seleccionado.

El modelo también permite proponer medidas de adaptación, variando las condiciones de manejo de cultivo y/o proponiendo el cambio en la variedad de semilla empleada (por ejemplo, semillas mejoradas).

3. Escenario Base

Los tipos de suelo utilizados para Toluca y Atlacomulco se obtuvieron de la SARH y de inspecciones en estos dos lugares y se indican en las tablas 1a y 1b.

Tabla 1a
ATLACOMULCO

TIPO	TEXTURA	pH	PROFUNDIDAD
Planosol mólico + Vertisol pélico + Feozem háplico	38% arcilla, 24% limo, 38% arena	5.5	90 cm
Feozem háplico + Vertisol pélico	32% arcilla, 26% limo, 42% arena	6.2	54 cm
Planosol mólico + Planosol eutríco	14% arcilla, 54% limo, 32% arena	7.2	mayor a 100 cm

Tabla 1b
TOLUCA

TIPO	TEXTURA	pH	PROFUNDIDAD
Feozem háplico + Vertisol pélico	24% arcilla, 18% limo, 58% arena	5.7	mayor a 100 cm
Feozem háplico	16% arcilla, 26% limo, 58% arena	6.5	99 cm
Feozem gléyico + Luvisol crómico	16% arcilla, 24% limo, 60% arena	7.0	mayor a 100 cm

Para las condiciones de manejo de cultivo se utilizaron los datos recomendados por la SARH para la zona seleccionándose como fecha de siembra el 5 de mayo (día 125) y se añadió una aplicación de fertilizante el día de la siembra (50 Kg de N, Urea). La variedad de semilla seleccionada fue SUWAN - MOD AT, resultado del cálculo de los coeficientes genéticos P1 y P5 y de la adecuación de los otros coeficientes:

$$P1 = 288, P2 = 0.60, P5 = 500, G2 = 480 \text{ y } G3 = 7.00$$

En este trabajo, presentamos exclusivamente los resultados para Atlacomulco. Finalmente, para la elaboración del escenario base se usaron 14 años de datos climatológicos diarios para Atlacomulco (1961-1974) obtenidos de CLICOM y para Toluca 28 años (1960-1987) del Meteorológico de Tacubaya. De estos datos climáticos presentamos los promedios mensuales (en lugar de los datos diarios) correspondientes a Atlacomulco. En la figura 3 se muestran los datos de temperatura máxima y mínima y en la figura 4 se presentan los datos de radiación solar y precipitación para la misma serie de tiempo.

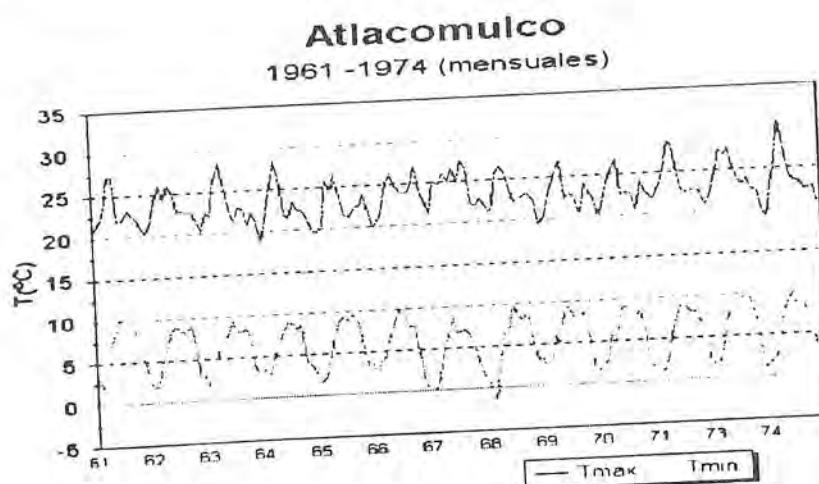


Figura 3. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para Atlacomulco (1961 - 1974)

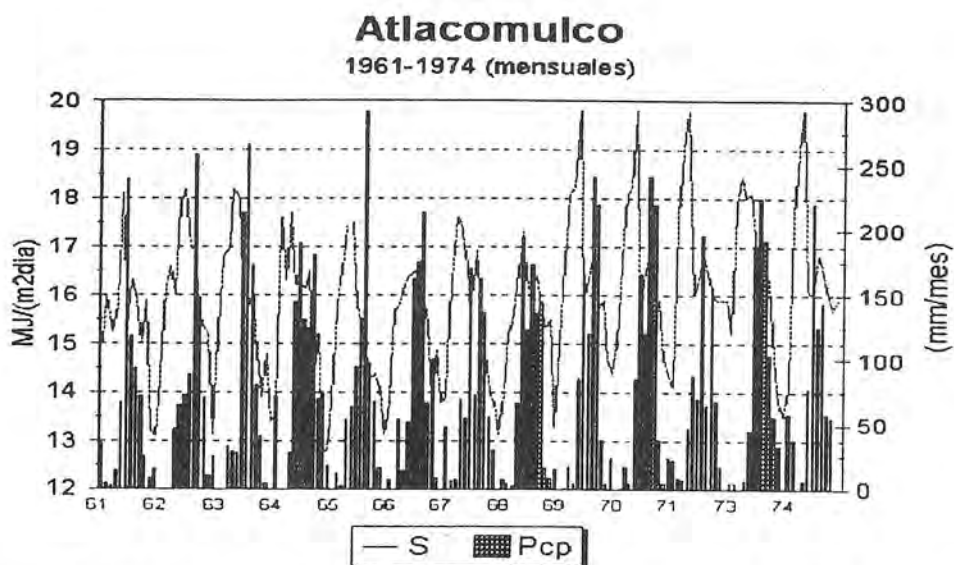


Figura 4. Precipitación (barras, mm/mes) y Radiación solar promedio (línea, MJ/m²día) para Atlacomulco (1961 - 1974).

Siendo la variación climática durante el año importante para la producción, particularmente para la selección de la variedad de maíz para la región, presentamos en la tabla 2 los promedios mensuales de temperatura, precipitación y radiación solar para los catorce años estudiados y en la figura 5 las variaciones anuales de temperatura y precipitación.

De la figura se puede observar que el período de lluvias prácticamente se inicia en mayo y termina en octubre, alcanzando un máximo para el mes de julio. Sin embargo, según reportes de la SARH - INIFAP, la variedad de semilla empleada tiene que resistir la sequía que se presenta a mediados de mayo y también la cosecha se tiene que efectuar a finales de septiembre o principios de octubre, ya que en esas fechas se presentan las llamadas "heladas tempranas" que con cierta frecuencia azotan el altiplano del país.

Tabla 2
Promedios de 1961 a 1974

MES	TMAX (°C)	TMIN (°C)	S (MJ/(m2día))	PCP (mm/día)
ENE	20.8	1.7	14.5	19.8
FEB	22.5	1.9	16.6	6.7
MAR	25.2	4.7	17.3	12.4
ABR	26.7	6.6	17.6	30.7
MAY	26.7	8.3	17.5	77.9
JUN	23.9	9.4	16.2	158.2
JUL	22.9	8.6	16.3	158.2
AGT	23.3	8.4	16.3	175.8
SEP	22.8	8.3	15.4	129.4
OCT	22.9	6.0	15.1	53.6
NOV	22.3	3.3	14.5	17.3
DIC	21.1	2.1	13.9	8.9

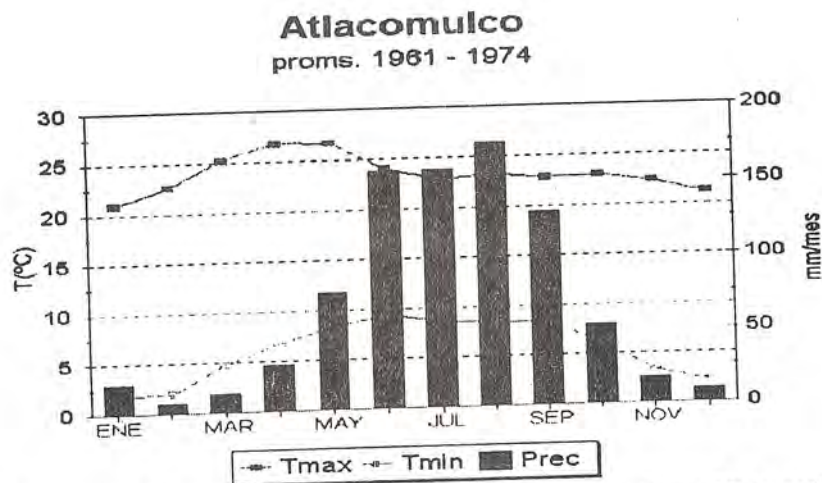


Figura 5. Precipitación (barras, mm/mes) y Temperaturas máxima y mínima (líneas, °C) promedio mensual para Atlacomulco (1961 - 1974).

Es importante resaltar de la figura 5 que los máximos de precipitación se observan en el mes de agosto y que las temperaturas mínimas se encuentran por abajo de los 10 °C, lo que influye en el cálculo de los coeficientes genéticos P1 y P5.

4. Producción Real

Los estudios de la SARH - INIFAP (Turrent *et al.*, 1992) indican que el rendimiento de maíz en el Estado de México es de 3.5 a 4 ton/ha en el mejor de los casos, para la producción de maíz con sistema de riego. Para el caso de temporal, se estima que este rendimiento es de 3 a 3.5 ton/ha

si se trata de temporal con punta de riego y de 2 a 2.5 ton/ha si se trata de temporal estricto. Como ejemplo, se muestran en la siguiente figura estos rendimientos para la década de los '80. Observamos que la diferencia máxima entre uno y otro sistema es de 0.25 ton/ha, máximo.

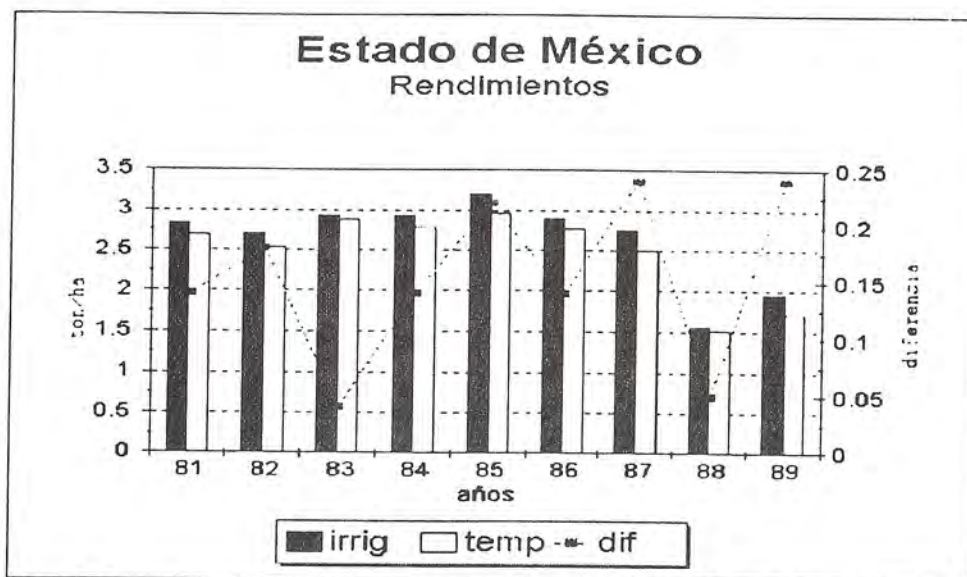


Figura 6. Comportamiento productivo de las tierras maiceras del Estado de México (1981 - 1989).

Las fuertes diferencias en la producción de un año a otro se atribuyen a las "heladas tempranas". Esto es, la razón es básicamente climática.

En este estudio, se tuvieron dificultades para obtener los datos de producción de maíz por el sistema de temporal para los sitios y años seleccionados, sólo se obtuvieron los rendimientos para el caso de riego. Sin embargo, estos datos sirven para hacer una estimación de la producción de temporal, considerando las diferencias mostradas en la figura anterior.

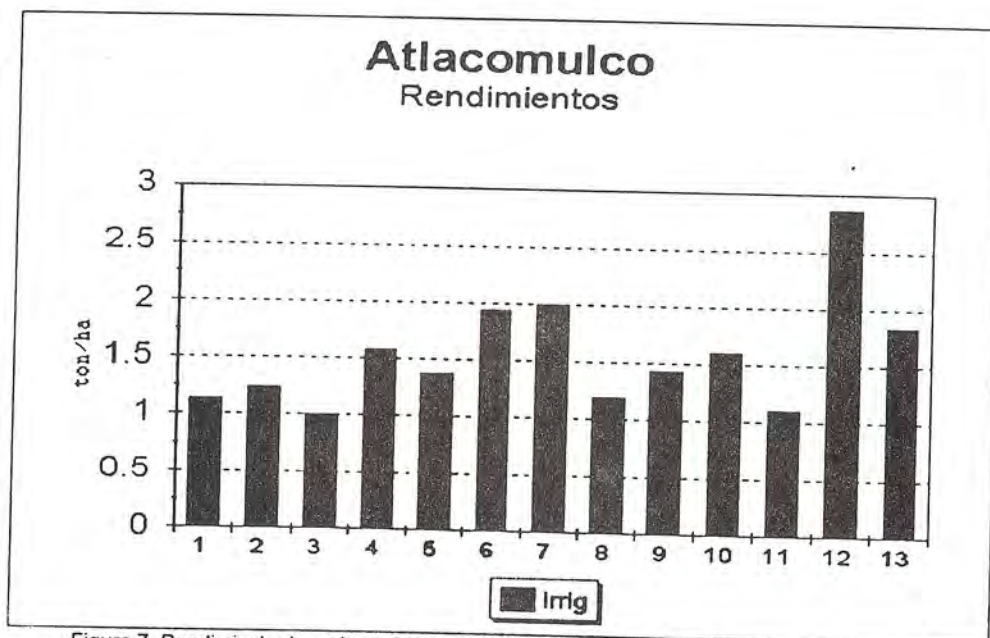


Figura 7. Rendimiento de maíz en Atlacomulco, con sistema de riego de 1961 a 1973.

Tabla 3

GFDL - R30									
MONTH	TEMPERATURE (°C)			PRECIPITATION (mm/day)			SOLAR (W/M**2)		
	1xCO2	2XCO2	Diff	1xCO2	2XCO2	RATIO	1xCO2	2XCO2	RATIO
1	15.7	19.3	3.62	2.0	2.9	1.44	213.0	215.0	1.01
2	16.4	19.6	3.20	2.2	1.9	0.88	253.0	264.0	1.04
3	17.2	20.8	3.58	1.8	2.5	1.36	298.0	288.0	0.97
4	19.5	22.7	3.16	2.1	2.4	1.15	321.0	320.0	1.00
5	20.8	23.1	2.35	5.5	6.8	1.22	299.0	301.0	1.01
6	19.1	21.7	2.65	12.0	17.1	1.42	228.0	203.0	0.89
7	18.3	20.4	2.08	16.4	20.6	1.25	208.0	199.0	0.96
8	18.2	20.5	2.30	17.0	22.4	1.32	201.0	195.0	0.97
9	18.9	21.5	2.53	10.8	13.8	1.29	209.0	195.0	0.93
10	18.5	21.1	2.54	6.1	6.2	1.02	220.0	206.0	0.93
11	17.0	19.6	2.59	2.2	2.6	1.19	222.0	229.0	1.03
12	15.8	19.6	3.84	2.9	2.9	0.98	198.0	204.0	1.03

Tabla 4

CCCM									
MONTH	TEMPERATURE (°C)			PRECIPITATION (mm/day)			SOLAR (W/M**2)		
	1xCO2	2XCO2	Diff	1xCO2	2XCO2	RATIO	1xCO2	2XCO2	RATIO
1	16.0	17.5	1.53	9.3	6.5	0.70	132.0	135.0	1.02
2	16.1	18.1	1.92	6.5	6.3	0.97	171.0	170.0	1.00
3	16.8	18.8	1.98	6.4	4.6	0.72	210.0	216.0	1.03
4	18.4	20.8	2.40	6.3	7.1	1.12	233.0	222.0	0.95
5	19.7	22.0	2.28	12.3	16.9	1.37	216.0	201.0	0.93
6	19.9	21.8	1.90	22.4	19.1	0.85	190.0	187.0	0.99
7	19.9	22.0	2.09	22.2	13.3	0.60	181.0	199.0	1.10
8	20.0	22.4	2.40	17.8	18.5	1.04	190.0	186.0	0.98
9	20.0	22.3	2.37	23.5	17.3	0.73	172.0	169.0	0.99
10	18.6	21.3	2.70	13.3	17.0	1.28	164.0	147.0	0.90
11	17.2	19.5	2.32	10.8	8.3	0.76	140.0	135.0	0.96
12	16.2	18.0	1.80	7.7	7.2	0.93	127.0	128.0	1.00

ATLACOMULCO

Rendimiento Simulado (125)

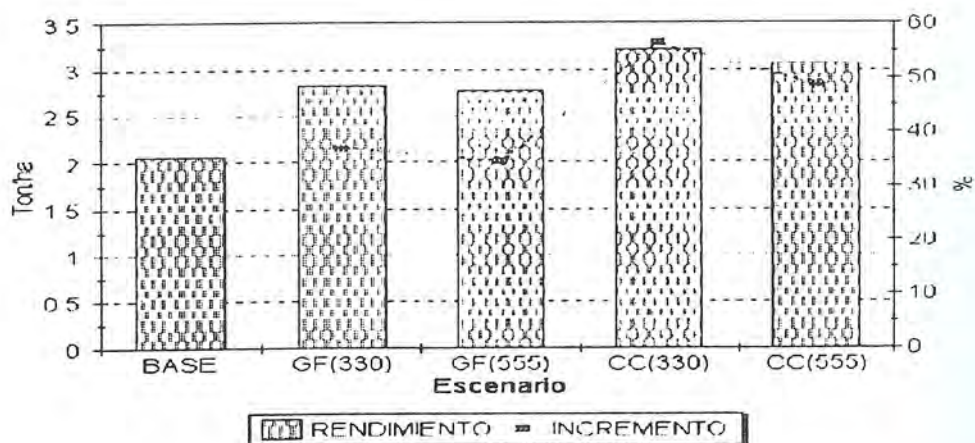


Figura 8. Rendimientos según el escenario base y los escenarios de cambio climático.

En la figura 7 observamos que el máximo rendimiento alcanzado fue de 2.5 ton/ha en 1972. Podemos suponer que los rendimientos de temporal fueron análogos, con una diferencia máxima de 0.25 ton/ha.

5. Escenarios de Cambio Climático

Las condiciones de suelo, manejo de cultivo y variedad permanecieron iguales al escenario base. Para construir los escenarios de cambio climático se utilizaron los incrementos propuestos por los modelos CCCM y GFDL-R30 para condiciones de duplicación de bióxido de carbono.

En las tablas 3 y 4 mostramos las variaciones mensuales obtenidas con esos modelos de circulación general para la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la Precipitación (mm/día) y la Radiación Solar (Wm^{-2}). El incremento aplicado a las temperaturas máximas y mínimas aparece en la columna "Diff" y las variaciones para la precipitación y la radiación solar se muestran en las columnas respectivas como "ratio", esto es, representan el cambio porcentual en esos parámetros.

Se corrió entonces el programa CERES - Maize para el escenario Base y para los modelos GFDL-R 30 y CCCM en condiciones de $2\times \text{CO}_2$, los resultados más relevantes se muestran la figura 8.

En la figura 8, se observa que los rendimientos aumentan en condiciones de cambio climático sólo y en condiciones de los efectos fisiológicos del aumento de concentración de CO_2 a 555 ppm. Sin embargo, en este segundo caso el incremento es menor. Los datos graficados en la figura 8 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5

ESCENARIO	SIMULACIÓN	INCREMENTO
	Ton /Ha	%
BASE	2.06	
GFDL 330ppm CO2	2.82	36.89
GFDL 555ppm CO2	2.77	34.47
CCCM 330 ppm CO2	3.22	56.31
CCCM 555ppm CO2	3.06	48.54

6. Análisis de sensibilidad

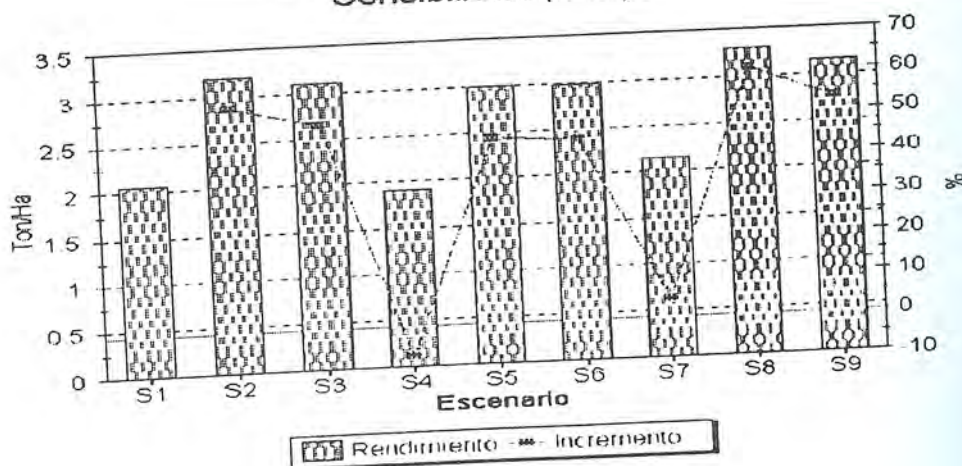
Para el análisis de sensibilidad se realizaron experimentos de simulación en las condiciones indicadas en la siguiente tabla 6 y en la figura 9:

Tabla 6

	ESCENARIO	SIMULACIÓN	INCREMENTO
	Sen (330ppm CO ₂)	Ton /ha	%
S1	BASE	2.06	
S2	T +2°C	3.20	55.34
S3	T +4°C	3.10	50.48
S4	+20% PREC	1.91	-7.28
S5	T +2°C, +20% PREC	3.00	45.63
S6	T +4°C, +20% PREC	2.98	44.66
S7	-20% PREC	2.15	4.36
S8	T +2°C, -20% PREC	3.31	60.68
S9	T +4°C, -20% PREC	3.15	52.91

Estos experimentos permiten evaluar, partiendo del escenario base, el comportamiento del cultivo bajo condiciones extremas. Se puede observar entonces en la figura 9 que el incremento de temperatura favorece el cultivo con mejores resultados para un incremento de 2°C. Se observa también que el cambio en precipitación combinado con el incremento en la temperatura favorece la producción y no así el cambio exclusivo en la precipitación. Concluimos entonces que para zonas altas (como Atlacomulco) es el aumento en la temperatura el que permitirá un aumento notable en la producción debido a un aumento en las temperaturas mínimas que, en condiciones actuales, frecuentemente se encuentran por debajo de la temperatura base provocando con ello la pérdida de las cosechas por las heladas tempranas.

ATLACOMULCO Sensibilidad (125)



Es notable también que la única condición que disminuye los rendimientos es el escenario de un aumento de +20% de la precipitación. Lo anterior se explica al analizar el estrés de nitrógeno al que se somete la planta en los diferentes estadios de desarrollo. Se observó que bajo este escenario aumenta considerablemente dicho estrés debido, probablemente, al arrastre de los nutrientes asociado a un mayor nivel de precipitación.

BIBLIOGRAFIA

- Aveldaño, S. R., et al., 1991. Resultados de la Evolución del Maíz en el Estado de México. CIFAMEX. 182 pp.
- Turrent, F. A., et al. 1992. Manual de Diagnóstico. Recomendación para el Cultivo de Maíz en el Estado de México. I. Provincias Agronómicas de Riego y Buen Temporal de "Muy Buena y de Buena Productividad". SARH - INIFAP. México.
- CIMMYT. Growing Degree Days: A Compendium of Data for El Batán, Poza Rica, Tlaltizapan and Toluca Experiment Stations. 25 - 28 p.
- CIMMYT. Compendium of Selected Meteorological Data for El Batán, Poza Rica, Tlaltizapan and Toluca Experiment Stations. 80 - 94 p.
- Cultivos de INV - PV. Chapingo, México. 1980.
- IBSNAT Project. 1986. Technical Report 5. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Documentation for IBSNAT Crop Model Input and Output Files, Version 1.0. Dept. Agron. Soil Sci. College of Trop. Agr. and Human Resources, Univ. Hawaii.
- INEGI. 1992. Anuario Estadístico del Estado de México. México.
- INICAAFEM - ICAMEX. 1994. Paquete Tecnológico. Gobierno del Estado de México. 25 pp.
- Jones, C. A. and J. R. Kiriny (eds). 1986. CERES-Maize: A simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A & M University Press. College Station. Texas.
- Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D., and Hunt, L. A. User's Guide to CERES- Maize - V2.10. Michigan State University.
- Rosenzweig C. and Iglesias, A. (Ed). 1994. Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study. EPA.
- SARH. 1984. Agenda Técnica Agrícola. México Zona II. Dirección General de Producción y Extensión Agrícola.
- SARH. 1982. Diagramas de las Principales Especies Vegetales en las Cuales se Efectúan Investigaciones Agrícolas en México. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Diagrama 56 y 57.
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 60 - 61 (Informe No. 19).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 61 - 62 (Informe No. 20).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 62 - 63 (Informe No. 21).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 63 - 64 (Informe No. 22).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 64 - 65 (Informe No. 23).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 65 - 66 (Informe No. 24).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 66 - 67 (Informe No. 25).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 68 - 69 (Informe No. 27).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 69 - 70 (Informe No. 28).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 70 - 71 (Informe No. 29).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 71 - 72 (Informe No. 30).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 72 - 73 (Informe No. 31).

- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 74 - 75 (Informe No. 33).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 75 - 76 (Informe No. 34).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 77 - 78 (Informe No. 35).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 78 - 79 (Informe No. 36).
- SARH. Estadística Agrícola del Ciclo 79 - 80 (Informe No. 37).
- SARH. 1993. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Tomos 1 y 2. Subsecretaría de Planeación.
- SARH. 1991. Variedades Recomendadas de los Principales Cultivos con Indicaciones para las Epocas de Siembra y Cosecha. Ciclo Primavera - Verano 1991. 114 - 123 p.
- SARH. 1994. Producción y Comercialización de Maíz 1987 - 1993. Subsecretaría de Planeación.
- SARH - INIFAP. 1990. Guía para la Asistencia Técnica Agrícola en el Distrito de Desarrollo Rural de Atlacomulco.
- SPP. 1983. Carta Edafológica E14 - 21: 250000.

Fenología y cambio climático global

VICTOR L. BARRADAS

Centro de Ecología, UNAM., Apdo. Postal 70-275, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

RESUMEN

Se plantea y se discute el papel que puede jugar la fenología vegetal en el estudio del impacto que puede presentar un cambio climático futuro en la agricultura de la República Mexicana. Se hace un pequeño recorrido y se reflexiona sobre las principales constantes fenológicas (unidades de calor acumuladas, horas frío y períodos críticos), que podrían usarse como una herramienta para determinar con mayor precisión las nuevas aptitudes agrícolas del territorio nacional en un cambio climático global. Finalmente, se concluye que es necesario realizar y profundizar estudios de fenología agrícola.

ABSTRACT

The role of plant phenology in global climatic change impact on agriculture in Mexico is presented and discussed. A little inspection of the phenology constants (heat units, cold hours and critical periods) is made in order to use them as a powerful tool to find out the new agriculture suitability of Mexico on a global climatic change. Finally, it is concluded that it is necessary to carry out and enhance actual phenology studies.

Introducción

Estudiar el efecto del cambio climático global en la agricultura, no sólo en México, sino en cualquier región del mundo, se torna imposible de abordar desde un punto de vista holístico, debido a la gran complejidad que presenta este tipo de investigaciones. Por ello, una solución bastante adecuada es la de compartamentizar cada uno de los elementos de este universo. Sin embargo, para un país como México, que se encuentra en una situación de mayor vulnerabilidad a un cambio climático por su dependencia de las lluvias de temporal en grandes áreas de cultivo (Livermann, 1992), esta compartimentización debe ser mas detallada y necesita de escenarios de cambio climático futuro mas precisos.

Durante el transcurso de este taller, se han abordado temas como la generación de diferentes escenarios climáticos al suponer un aumento de bióxido de carbono en la atmósfera al doble de la concentración actual. El cambio climático más probable es el ascenso de la temperatura del aire a un promedio de 2°C a escala global (esta cifra es un promedio de las predicciones de varios modelos atmosféricos). En cuanto a la precipitación pluvial la controversia es mayor (Grotch, 1992), pero en algunos casos se supone un aumento del 40% sobre la República Mexicana, no obstante, es de esperarse que existan regiones donde la precipitación disminuya.

La ecofisiología es la contraparte de la ecología en la climatología estudiando el efecto del ambiente en los seres vivos. Desde este punto de vista, la fenología pasa a formar parte de la ecofisiología encargándose de estudiar los patrones temporales climáticos asociados al desarrollo secuencial de los organismos. Las plantas en general y los cultivos en particular presentan requerimientos climáticos (radiación solar, precipitación y temperatura) y edáficos (textura, pH, nutrimentos, capacidad de campo, retención de agua, drenaje etc.) para llevar a cabo sus funciones fisiológicas a buen término. Sin embargo, dentro de los requerimientos climáticos las diferentes especies vegetales se encuentran distribuidas sobre el planeta de tal forma que el efecto de la radiación solar, y sobre todo en los trópicos, se puede despreciar, tornándose los rangos térmicos y pluviométricos de mayor importancia. También hay que hacer hincapié sobre la fisiología de los cultivos y cómo éstos responden al ambiente destacando, por razones obvias, su productividad. Sin embargo, a lo largo de la vida de las plantas se presentan ciertos períodos críticos en los cuales, la planta es muy sensible al comportamiento climático. Muchas especies y en particular el maíz presentan un período crítico durante la floración que puede coincidir

con la sequía. Por esta razón, las constantes fenológicas pueden jugar un papel muy importante en el estudio de impacto del cambio climático global en la agricultura, ya que probablemente se podrán usar directamente en diferentes escenarios de cambio climático para determinar la aptitud del territorio nacional a los diferentes cultivos.

Este trabajo aborda dos variables fenológicas: las unidades de calor y las horas frío, con base en el posible incremento de la temperatura del aire que pronostican los diferentes modelos climáticos y enfatiza sobre la vulnerabilidad de las plantas en los períodos críticos. Al mismo tiempo, este trabajo se torna en una reflexión alrededor de la fenología y del cambio climático.

Las unidades de calor

Las unidades de calor acumuladas (UCA) son generalmente usadas para definir el desarrollo de las plantas en el período de cultivo. Estas sumas lo que hacen es describir el régimen de la temperatura media durante este período así como el inicio y el término del mismo. Por otro lado, el pasaje de un cultivo a través de una secuencia de estados morfológicos o períodos temporales tales como la germinación, emergencia, floración, fructificación, maduración, etc., se le denomina como desarrollo del cultivo.

La duración de cada uno de estos subperíodos del desarrollo de los cultivos es una función de: un factor genético (G), de la temperatura (T), de la luz o del fotoperíodo (L) y de otros factores como la humedad, nutrición, densidad de plantas, etc., (K), de donde

$$t = f(G, T, L, M) \quad (1)$$

y t es el número de días o de horas en el período de desarrollo que interesa y G depende de la variedad del cultivo. De todos estos factores, la temperatura es la que tiene mayor influencia sobre la velocidad de crecimiento y desarrollo. Los otros factores están razonablemente cerca de los valores óptimos, por ejemplo, la humedad del suelo retiene del 70 al 90% de la disponibilidad del agua (en cultivos bajo riego) y los cultivos generalmente están adaptados a la disponibilidad de luz o al fotoperíodo (Brown, 1979).

El concepto usual de UCA supone una relación lineal paralela a la escala térmica y una temperatura base o umbral (T_u), de la siguiente forma (Lowry, 1966):

$$UCA \text{ diaria} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_u \right), \quad \text{cuando } \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) > T_u \quad (2)$$

$$UCA \text{ horaria} = \sum_{n=1}^n (Th - T_u), \quad \text{cuando } Th > T_u \quad (3)$$

donde T_{max} , T_{min} y Th son la temperatura máxima diaria, mínima diaria y media horaria, respectivamente. N es el número de días y n es el número de horas.

De esta manera las UCA representan una "constante" de la variedad cultivada ya que siempre es la misma para diferentes años y para diferentes sitios. En la tabla 1 se presentan valores de UCA para algunas especies agrícolas.

Tabla 1. Valores de unidades acumuladas de calor para las diferentes fases fenológicas en ciertos cultivos del noreste del Estado de Morelos (según Gómez, 1988)

Cultivo	Siembra	Germinación	Floración	Fructificación		Cosecha
				Inicio	Plena	
Sorgo ($T_u=15^{\circ}\text{C}$)	—	—	515	665	817	880
Jitomate ($T_u = 15^{\circ}\text{C}$)	—	58	223	335	599	655
Manzana	—	—	207		737	

Horas frío

El estímulo de bajas temperaturas es de vital importancia para inducir la floración en ciertas especies de plantas tales como los frutales caducifolios (manzana, tejocote, pera, etc.) y los cereales de invierno que reflejan una adaptación a las bajas temperaturas. Se considera hora frío al período cuando la temperatura del aire es igual o menor de 7°C , sin embargo, esta cifra es convencional.

Los períodos críticos

Los períodos críticos probablemente en un país como México donde la agricultura es de temporal, dependen más de la cantidad de agua disponible vía precipitación que se dé en los sitios de cultivo. Aunque la temperatura pueda jugar un papel importante, como es el caso del tomate donde la planta es susceptible tanto a altas como bajas temperaturas en el período de floración (Wang, 1967), probablemente la precipitación pluvial juegue un papel mucho más importante. En la Figura 1 se muestra la disponibilidad de agua vía precipitación durante las fases fenológicas del maíz en el año de 1981 (año normal de lluvias) y en el año de 1982 (año anormal de lluvias) en la región de Chamela, Jalisco, donde la producción promedio de maíz es de 948 kg ha^{-1} (de Ita-Martínez y Barradas, 1986). En el año de 1981 el decremento de precipitación (sequía intraestival) es obvio al iniciarse la floración, período crítico que afecta negativamente la producción de maíz. Mientras que para 1982 la precipitación es baja durante todo el período agrícola. No obstante, es necesario notar que la precipitación es una variable asociada a la disponibilidad de agua, ya que realmente es el agua retenida en el suelo la disponible para las plantas.

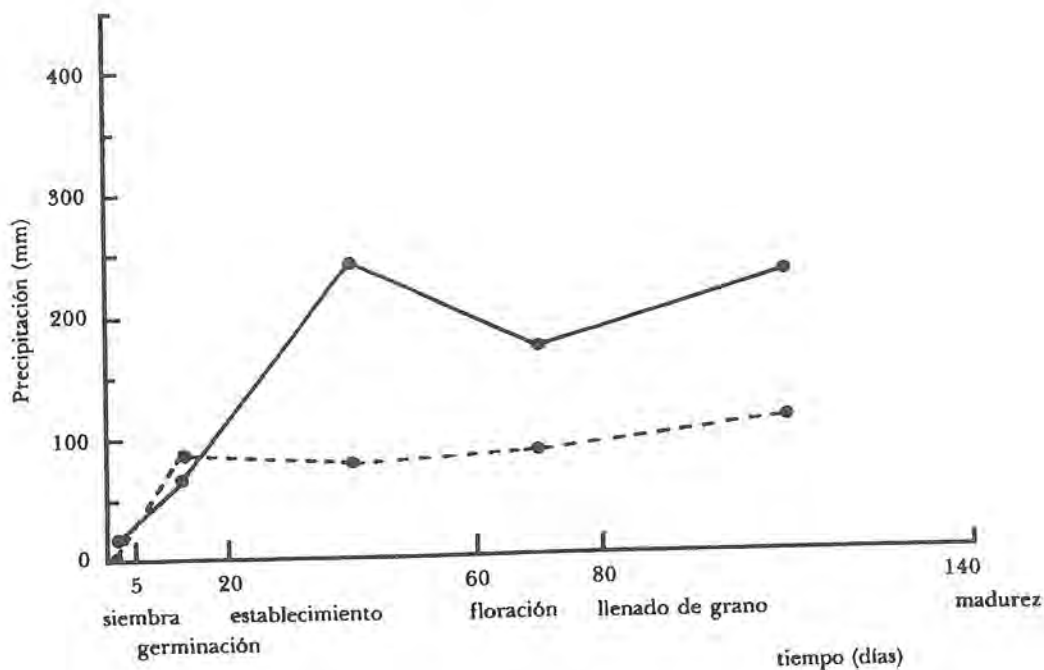


Fig. 1. Representación Gráfica de la precipitación pluvial durante las diferentes fases fenológicas del maíz en el año 1981 (año normal de lluvias (línea continua) y en el año 1982 (año anormal de lluvias) (línea discontinua) para la región de Chamela, Jalisco (según de Ita-Martínez y Barradas, 1986).

Discusión

Las unidades de calor acumuladas resultan una herramienta excelente para traslapar las diferentes fases fenológicas de los diferentes cultivos en diferentes escenarios climáticos futuros. Probablemente el desarrollo general de las plantas se acelerará con el aumento de la temperatura ya que las unidades calor necesarias para cada una de las fases fenológicas se alcanzarán más rápidamente. No obstante, esta función (ecuación 1) depende entre otros, de un factor genético (que se desprecia porque permanece constante), el cual no se puede asegurar que se mantenga así con una temperatura más alta y pueda tener cierta influencia en T_U , llevando con ello que las unidades de calor acumuladas cambien también.

Sin embargo, la principal limitante del uso de las UCA es la falta de estudios fenológicos de las diferentes variedades de las diferentes especies cultivables en México. El desconocimiento que se tiene de la fenología del maíz es enorme, aunque México sea el centro de origen del maíz y de la Revolución Verde.

Una ventaja del cambio climático futuro al elevarse la temperatura es que la incidencia de heladas será menor. No obstante, la producción de los cultivos que dependen de horas frío para llevar a cabo sus funciones fisiológicas posiblemente será afectada negativamente, a menos que se utilicen productos que estimulen la floración, lo que representa un artículo mas dentro de los insumos agrícolas.

Generalmente, la precipitación pluvial se toma como un elemento climático y se correlaciona directamente con la productividad agrícola con buenos resultados. Sin embargo, la disponibilidad de agua para un cultivo de temporal (o aún bajo riego) viene del suelo. Aunque, la precipitación proporciona una cantidad determinada de agua, las características físicas del suelo son las que finalmente generan la disponibilidad efectiva de agua para los cultivos. Por otro lado,

en los escenarios de cambio climático se usan valores de precipitación mensual que no se pueden interpolar a valores de precipitación diaria, además que se ignora por completo la presencia de la sequía intraestival y la intensidad de la lluvia. La intensidad de la precipitación juega un papel muy importante en la disponibilidad de agua para las plantas, ya que en función de la velocidad de absorción de un suelo se tendrá mayor o menor disponibilidad de agua. Un escenario climático futuro debe contener también estas características para conocer con mayor precisión las nuevas aptitudes que tendrá el territorio mexicano en un futuro donde el clima haya cambiado.

Conclusiones

De acuerdo a lo expuesto anteriormente es necesario realizar series de estudios tendientes a determinar tanto las unidades de calor acumuladas para diferentes variedades de maíz cultivado y para todos los demás cultivos básicos en México, como el efecto de la disminución de las horas frío en la fisiología de frutales caducifolios y de cereales de invierno.

Por otro lado, para tener una mejor planeación en la adaptación o mitigación ante un cambio climático global, es necesario incluir los mecanismos de precipitación pluvial más detallados como la sequía intraestival, y la intensidad de precipitación, así mismo como la humedad del suelo en los escenarios de cambio climático.

REFERENCIAS

- Brown D. M., 1979. Notas de Agrometeorología. Informe Técnico No. 10. Universidad Veracruzana. Jalapa, Veracruz, México. México. 21 pp.
- de Ita Martínez C. y Barradas V. L., 1986. El clima y los patrones de producción agrícola en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 11: 237-245.
- Gómez Rojas J. C., 1988. Agroclimatología y Espacio Geográfico en el Noreste del Estado de Morelos. Tesis de Doctor. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México. 240 pp.
- Grotch S.L., 1992. A statistical comparison of temperature and precipitation predicted by four general circulations models with historical data. In: M. Schlesinger (ed). *Greenhouse-Gas-Induced Climatic Change: A Critical Appraisal of Simulations and Observations*. Elsevier.
- Lowry W. P., 1969. *Weather and Life, An Introduction to Biometeorology*. Academic University Press. New York. 305 pp.
- Livermann D., 1992. The regional impact of global warming in Mexico. In: *The Regions and Global Warming*. Schmandt J y Clarkson J (eds). Oxford University Press.

Estudio preliminar del efecto de niveles elevados en bióxido de carbono atmosférico en algunos parámetros de crecimiento en *Lepidium sativum* L.

SANCHEZ ESPINO, P., A. LARQUE SAAVEDRA, T. NAVA SANCHEZ
y R. SAN MIGUEL CHAVEZ

Programa Docente de Botánica, Instituto de Recursos Naturales,
Colegio de Postgraduados, Montecillo México. Km 36.5 Carretera México-Tezaco, C. P. 56230.

RESUMEN

Se evaluó el efecto de niveles elevados de bióxido de carbono (CO_2) sobre algunos parámetros de crecimiento (peso fresco, peso seco, longitud del vástago y de las raíces) de *Lepidium sativum* L., utilizando botellas de plástico como un sistema que permitió mantener diferentes concentraciones de CO_2 en su interior. Se llevaron a cabo dos experimentos independientes, uno en agrolita y otro en vermiculita, estableciendo tres concentraciones del gas para cada experimento: 360, 620 y 920 ppm, el registro sistemático de estas concentraciones se llevó a cabo con un analizador de gases en infrarrojo (IRGA). En el sustrato de agrolita, la biomasa mostró incrementos de 62 y 67% a 620 y 920 ppm respectivamente, mientras que en vermiculita el incremento fue de 15% a 620 ppm, y 41% a 920 ppm; los incrementos en la longitud de la raíz fueron, en vermiculita con 620 ppm 153%, y de 123% ante 920 ppm, en el caso de agrolita este incremento fue sólo de 19% a 920 ppm, y de 74% a 620 ppm.

ABSTRACT

The effect of high levels of carbon dioxide (CO_2) were evaluated on the fresh weight, dry weight, shoot and root length of *Lepidium sativum* L. cultivated on plastic bottles as a simple system that permitted kept inside different concentrations of CO_2 . Two independent experiments were carried out, one in perlite and other in vermiculite. Three CO_2 levels were tested for each experiment, 360, 620, and 920 ppm, determined by an Infrared gas analyzer (IRGA). Results showed that in perlite, biomass increases of 62 and 67% for the 620 and 920 ppm respectively, while in vermiculite the increase was of 15% at 620 ppm, and 41% at 920 in comparison with the control of 360 ppm. The increases in root length was in vermiculite at 620 ppm 153% comparison with the control. For perlite as substrate, this increase was only of 19% at 920 ppm, and 74% at 620 ppm.

Introducción

Durante la última década se han publicado diversos trabajos que resumen modelos climáticos y evaluaciones de la respuesta de las plantas al incremento de niveles de bióxido de carbono atmosférico. En el manejo de cultivos y bajo condiciones de invernadero se utilizan a menudo enriquecimientos de CO_2 con el fin de incrementar el rendimiento (Minster y Merlivat, 1992).

El efecto fisiológico que tiene una mayor concentración de CO_2 sobre las plantas, es la estimulación de la cantidad de CO_2 asimilada. El índice de penetración de este gas en el interior de la hoja de la planta, y la subsecuente fijación fotosintética del material orgánico, está enormemente influenciada por el gradiente de concentración de CO_2 que existe entre la atmósfera y las células de la hoja. Las plantas pueden vivir en una atmósfera con mayor proporción de CO_2 de la que normalmente existe (alrededor de 350 ppm); al aumentar el CO_2 , en general las plantas pueden sintetizar mayor cantidad de azúcares (Rojas, 1993; Enoch, 1988).

Materiales y métodos

Se sembraron semillas de *Lepidium sativum* L. en envases de plástico de bebidas gaseosas de 2 litros. Se realizaron dos experimentos independientes, uno en agrolita y otro en vermiculita, cada tratamiento bajo un diseño experimental completamente al azar con 3 repeticiones, para 3 concentraciones diferentes de CO_2 (tratamiento control, 620 y 920 ppm), cada repetición con 20 plántulas de *L. sativum* L., que se mantuvieron durante cuatro semanas en condiciones

experimentales.

Los envases se mantuvieron cerrados en un cubículo en el que se registró una temperatura promedio de 20 °C. La humedad relativa dentro de las botellas fue de cerca del 100% durante todo el día. El periodo de luz que recibieron las botellas fue de un promedio de 10 horas diarias. Se aplicaron dos riegos por semana con una solución nutritiva de Hoaglan (Hoaglan y Arnon, 1950), con el fin de mantener una buena disponibilidad de agua y nutrientes en los substratos.

Las aplicaciones de CO₂ se realizaron con una jeringa cada tercer día después de ventilar las botellas durante dos horas. El registro sistemático de las concentraciones de CO₂ se llevó a cabo usando un analizador de gases en infrarrojo (IRGA) modelo LCA-2 (ADC, Inglaterra) de sistema abierto.

Las plántulas se cosecharon tres semanas después de que emergieron las primeras hojas, se extrajeron del substrato y las raíces se lavaron hasta dejarlas totalmente expuestas. Las variables cuantificadas fueron: peso fresco, peso seco y longitud de las plantas, se tomaron medidas de longitud del tallo, raíz y longitud total, en la que se incluyeron las hojas. El peso fresco se determinó en una balanza digital (Ohaus, con una precisión de 1 mg), la biomasa se secó en una estufa FELISA, modelo FE-293 AD durante 24 horas a una temperatura de 64 °C y se pesó en una balanza analítica Mettler HK 160, con una precisión de 0.1 mg.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System).

Resultados

Las botellas como sistema experimental

Las botellas desechables de plástico resultaron ser unas cámaras apropiadas para mantener altas concentraciones de CO₂. Aunque el espacio dentro de ellas podría ser una limitante dependiendo del tipo de estudio que se realice o la especie que se utilice; no obstante si se utilizan plántulas o especies pequeñas pueden mantenerse adecuadamente durante un periodo de uno a dos meses en condiciones experimentales.

Experimento en Agrolita

Peso Fresco.

Las altas concentraciones de CO₂ incrementan significativamente el peso fresco de las plántulas de *L. sativum* L. Para los tratamientos de 620 y 920 ppm se obtuvo un incremento de 56 y 117% respectivamente, comparado con el tratamiento control (Fig. 1).

Peso seco

Las plántulas expuestas a 620 ppm mostraron un incremento de 62% en peso seco comparado con el control, y las expuestas a 920 ppm incrementaron su peso en un 67%. Ambos tratamientos tuvieron diferencias estadísticas con el tratamiento control pero no entre ellos (Fig. 1).

Longitud de las plantas

El crecimiento de las plántulas aumentó con los incrementos de CO₂. En la concentración de 620 ppm se encontraron incrementos con respecto al control de 25, 74 y 45% en la longitud del tallo, raíz, y longitud total, en orden respectivo (Fig. 2) con diferencia significativa entre tratamientos.

La respuesta de crecimiento también mostró incrementos de 19% en raíz, 20% en tallo y 27%

en longitud total para el tratamiento de 920 ppm comparandolo con el control. Entre estos dos tratamientos se encontraron diferencias estadísticas (Tukey $p < 0.05$), excepto en la longitud de la raíz.

Experimento en vermiculita

Peso Fresco

En la respuesta de peso fresco en vermiculita únicamente se encontró un incremento para el tratamiento de 920 ppm con respecto al control que fue de 49% con diferencias estadísticas entre tratamientos (Fig. 1).

Peso seco

El peso seco de las plántulas desarrolladas en vermiculita a las concentraciones de 620 y 920 ppm superó significativamente el peso de las plantas bajo 360 ppm. Para la primera concentración mencionada, se tuvo un incremento de 15%, y de 41% para la segunda (Fig. 1).

Longitud de las plantas

Se observaron incrementos para 620 ppm con respecto al control de 153% en raíz y 47% en longitud total, para el tallo no se observó ningún incremento (Fig. 2). El tratamiento de 920 ppm tuvo un incremento en longitud de tallo de 19%, en raíz de 123% y de 54% en longitud total, con diferencias estadísticas entre tratamientos.

En resumen, el sistema radical observó una notable diferencia entre las plantas que crecieron a 360, 620 y 920 ppm. El crecimiento de la raíz respondió favorablemente a las concentraciones elevadas, su longitud total se incrementó en más del doble comparada con el control en el caso de vermiculita, con la agrolita no se llegó a esta magnitud, sin embargo a 620 ppm se obtuvo un incremento significativo.

Discusión

El empleo de recipientes desechables de plástico ofreció una vía alternativa de bajo costo para experimentación, a pesar de algunas restricciones que se observaron, tales como no poder mantener plantas de mayor tamaño dado el espacio y número de plantas en cada botella, sin embargo estos recipientes resultaron apropiados para mantener durante cuatro semanas las plantas de *Lepidium sativum* L., bajo condiciones normales de luz, temperatura y humedad variando únicamente la concentración de CO_2 .

Uno de los aspectos importantes a considerar cuando las plantas realizan intercambios de CO_2 y vapor de agua, es que dichos intercambios son favorecidos cuando las plantas se encuentran en un ambiente en el que el aire tenga un flujo turbulento, ya que éste, favorece la entrada y salida de los gases a través de los estomas de la planta, debido a que se reduce la resistencia de la capa de frontera o límite. En este trabajo no se utilizó ningún dispositivo para tratar de mantener un flujo turbulento dentro de las botellas porque el objetivo principal fue evaluar el nuevo sistema con estos recipientes en los cuales se mantuvieron altas concentraciones de CO_2 . Sería importante que en la continuación de trabajos semejantes a éste se implementen dispositivos que permitan mantener flujos de aire turbulentos dentro de las botellas, aunque sin duda esto encarecería el sistema. Cabe mencionar que aún con las restricciones que presentó este sistema se lograron observar marcadas diferencias entre tratamientos.

En la respuesta fisiológica de acumulación de peso fresco, se obtuvieron resultados variables en comparación a los resultados de peso seco, es decir, la tendencia de mayor acumulación de peso

en función a los incrementos de CO_2 no se observaron en este caso. Esto se debió posiblemente a las variaciones que se presentan en el momento de la cosecha y cuantificación de peso fresco, ya que los resultados dependen del contenido de agua en la planta, la rapidez con que se pese antes de que se evapore ésta y la hora en que se efectúe la cuantificación. Por ejemplo, debido a la transpiración, una hoja siempre tiene mayor cantidad de masa fresca en la mañana que a medio día (Salisbury y Ross, 1992).

En cuanto a la acumulación de peso seco, las plantas de *L. sativum* L. respondieron favorablemente a los niveles de CO_2 superiores a 360 ppm incrementando la acumulación de biomasa en relación a las concentraciones de dicho gas.

La respuesta observada en el peso seco de este trabajo, es similar a la encontrada por Harley *et al.*, (1992) en experimentos con algodón (*Gossypium hirsutum* L.) expuesto a concentraciones de CO_2 de 65 Pa (aproximadamente 650 ppm) donde se tuvieron incrementos en biomasa del 30%, con respecto a las que fueron expuestas a 35 Pa (aproximadamente 350 ppm). Estos autores, señalan que Thomas y Strain (1991), trabajando con la misma especie y las mismas concentraciones obtuvieron resultados similares.

Por otro lado, Havelka *et al.*, (1984) (citado por Lawlor y Mitchell, 1991) utilizando concentraciones de CO_2 de $1200 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$, durante todo el ciclo en cultivares de soya Kent y Ware, encontraron incrementos de materia seca hasta de 54 y 28% respectivamente.

El efecto inductor de altas concentraciones de CO_2 sobre el crecimiento de las plantas era esperado si se considera que existe una estrecha relación entre la fotosíntesis y la acumulación de biomasa (Zelitch, 1982). No obstante Dutton y colaboradores, (1988), señalan que los incrementos en la fotosíntesis no necesariamente se traducen en aumentos en la producción de materia seca. Haciendo referencia de las plantas con metabolismo C_3 (Stitt, 1991; Farrar y Williams, 1991), han señalado que con una duplicación de bióxido de carbono se estimula la fotosíntesis, lo que provoca un mayor suministro de carbohidratos para el crecimiento de las plantas, sin embargo consideran que el resto de las plantas (C_4 y CAM) son incapaces, por varias razones, de utilizar o almacenar los carbohidratos adicionales, debido a que su tasa fotosintética es casi máxima para el nivel actual de bióxido de carbono.

Respecto a los resultados del presente trabajo, se plantea que el incremento de la longitud de las plántulas probablemente fue debido a que las concentraciones altas utilizadas, favorecieron un aumento en la asimilación de bióxido de carbono que permitió que las plantas tuvieran un mejor crecimiento y desarrollo de sus componentes (hojas, tallo y raíz). Esto coincide con lo encontrado por Allen, (1989) quien reporta que concentraciones elevadas de CO_2 (superiores a las 350 ppm) se manifiestan en incrementos de tamaño y peso seco en la mayoría de los componentes de las plantas. Lorente y Redaño (1992), por su parte señalan que en ambientes ricos en bióxido de carbono se presentan aumentos en la superficie de las hojas y la longitud de sus raíces. Por otro lado, se señala que los incrementos de CO_2 tienen un mayor efecto en el crecimiento de la raíz que en el tallo, en raíz se han encontrado incrementos en diámetro, longitud, volumen y peso seco, Rogers *et al.*, (1992) reportan incrementos de 110% en la longitud de la raíz y 143% en peso seco de la misma para plantas de soya expuestas a concentraciones de CO_2 de $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$, en comparación con las plantas expuestas a concentraciones de $350 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

De acuerdo a lo observado por estos autores, los resultados obtenidos para el presente estudio muestran también que la raíz fue la más favorecida con mayores incrementos en longitud que el tallo y las hojas (incluidas en longitud total). Mousseau y Saugier, (1990) (citado por Minster y Merlivat, 1992) reportan que los castaños, en presencia de un nivel de CO_2 que duplique el nivel actual, extienden más su sistema de raíces que sus partes aéreas. Es posible deducir que un mejor desarrollo de las raíces aumenta la probabilidad de penetración en el sustrato para llevar a cabo una mejor exploración y tener acceso a mayor cantidad de nutrientes. Igualmente un estímulo de CO_2 , puede conducir a las plantas cultivadas en el campo a explorar mejor el suelo de modo que la absorción de sales minerales por las raíces aumenta incluso cuando la cantidad de nutrientes es pequeña (Minster y Merlivat, 1992). Aunque existen otros factores que pueden limitar el crecimiento de la raíz, como la temperatura, aereación, disponibilidad de agua, y tipo de suelo

entre otros (Salisbury y Ross, 1992). A este respecto la diferencia de la respuesta de crecimiento de las plántulas de *L. sativum* L. encontrada entre las desarrolladas en agrolita y vermiculita se podría atribuir al tipo de sustrato ya que en vermiculita se retiene mayor cantidad de humedad que en agrolita. Por otra parte, aunque el objetivo de explorar los aspectos de crecimiento de *L. sativum* bajo ambientes controlados se logró con mayor claridad utilizando vermiculita, los resultados con agrolita también mostraron un efecto claro de los incrementos de CO₂ sobre el crecimiento de las plantas.

Conclusiones

Las plantas de *Lepidium sativum* L. desarrolladas en ambientes con altas concentraciones de bióxido de carbono responden incrementando la acumulación de biomasa (peso seco).

En este trabajo se observó que al mantener plantas con altas concentraciones de bióxido de carbono se tiene un mayor efecto sobre el crecimiento de la raíz en comparación con la parte aérea de la planta (vástago).

REFERENCIAS

- Allen, H. L., Jr., 1989. Global Climate change and its impact on plant growth regulator. Society of America. 16th Annual Meeting. Ag. 6-10.
- Dutton, R. C., J. Jiao, M. J. Tsujita and B. Grodzinski, 1988. Whole plant CO₂ exchange measurements for nondestructive estimation of growth. *Plant Physiol.* 86, 355-358.
- Enoch, H. Z. 1988. Global and Horticultural Carbon Dioxide Enrichment. En Neuman, P. M., Plant Growth and Leaf-applied Chemicals. CRC Press, Boca Raton, Fl. Chap. 9. 178 pp.
- Farrar, J. F. and M. L. Williams, 1991. The effects of increased atmospheric carbon dioxide and temperature on carbon partitioning, source-sink relations and respiration. *Plant Cell and Environment.* 14, 819-830.
- Harley, P. C. R., B. Thomas, J. F. Reynolds and B. R. Strain, 1992. Modelling Photosynthesis of cotton growth in elevated CO₂. *Plant Cell and Environment.* 15, 271-282.
- Hoagland, D. R. and D. I. Arnon, 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Calif. Agric. Exp. Sta. Circular 347. En: Moore, T. C. 1974. Research experiences in Plant Physiology. U S A. 361-380.
- Lawlor, D. W. and R. A. C. Mitchell, 1991. The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity: a review of field studies. *Plant Cell and Environment,* 14, 802-818.
- Lorente, J. y Redaño, A., 1992. Calentamiento Global y Ciclo Hidrológico. *Mundo Científico,* 126 (12): 656-663.
- Minster, J. F. y L. Merlivat, 1992. ¿A dónde va el gas carbónico?. *Mundo Científico,* 126 (12): 682-692.
- Rojas, G. M., 1993. Fisiología Vegetal Aplicada. Interamericana. Mc Graw Hill. México. 275 pp.
- Rogers, H. H., C. M. Peterson, J. N. McCrimmon and J. D. Cure. 1992. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Cell and Environment,* 15, 749-752.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross, 1992. Plant Physiology. Wadsworth. Inc. Betmont, Cal. 682 pp.
- Stitt, M. 1991. Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. *Plant Cell and Environment,* 14, 741-762.
- Zelitch, I., 1982. The close relationship between net photosynthesis and crop yield. *Bioscience,* 32 (10): 796-802.

Vulnerabilidad del litoral a los efectos por ascenso del nivel del mar en las costas Bajas del Golfo de México

M. A. ORTIZ PEREZ y A. P. MENDEZ LINARES

Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México

RESUMEN

Se identifica y se zonifican las características geomorfológicas del litoral, considerando la distribución de los componentes del perfil longitudinal de la costa en dos zonas: zona I o de intermareas como el escenario básico de impacto directo en las variaciones del nivel del mar. Además, se reconoce una franja adyacente (zona II) que por su disposición constituye un área de riesgo potencial o de amortiguamiento, en ambas se lleva a cabo un inventario del uso del suelo con objeto de estimar el impacto en cuestión.

ABSTRACT

The geomorphological characteristics of the coastal zone have been identified taking in account the distribution of the two zones were defined longitudinal profiles the intertidal section (zone I) where the level sea variations have a direct impact. Another strip of land close to intertidal area (zone II) is recognized like a potential risk region or damping area; for this reason, an inventory of land use has been developed, and then, the impact in the coastal zone would be estimated.

1. Introducción

Se muestra un avance parcial de la estimación de las áreas frágiles, las cuales presentan una mayor vulnerabilidad a las repercusiones por ascenso del nivel del mar, consideradas en principio como el escenario básico del impacto de las variaciones del nivel del mar (zona de intermareas).

Se estiman las condiciones de uso del suelo en la zona de riesgo potencial y o de amortiguamiento que se definen en función del arreglo geomorfológico. La zona de amortiguamiento se caracteriza porque presenta un arreglo con formas acumulativas (cordones litorales, dunas, diques o bordes naturales y barras), esta disposición y distribución de los gradientes de mayor declive, limitan e impiden el avance de la líneas de costa con dirección al continente, por el contrario, se tiene una disposición susceptible o vulnerable a las tierras bajas como son esteros, llanuras palustres o lacustres que facilitan la penetración de la cuña salina del mar. Este diseño y modificaciones del drenaje facilitan la entrada de agua del mar al continente.

2. Objetivo general

2.1 Determinar la vulnerabilidad de las costas ante el ascenso del nivel del mar.

3. Objetivos particulares

- 3.1 Clasificación geomorfológica de la línea de costa por su tipología (enfocado a la manera de un inventario sistemático).
- 3.2 Hacer una reorganización de unidades homogéneas a partir de características geomorfológicas (ordenadas y agrupadas por afinidad de propiedades, con una concepción de síntesis).
- 3.3 Identificar y zonificar las regiones susceptibles o expuestas a los cambios de nivel del mar, mediante la elaboración de escenarios básicos de unidades vulnerables, usando levantamientos geomorfológicos de las costas.
- 3.4 Identificar y definir cartográficamente las áreas críticas de los escenarios físicos, delimitando

la línea de costa aproximada a la altura media de las mareas altas.

- 3.5 Identificar y zonificar cartográficamente el área potencial o de amortiguamiento, comprendida entre la línea de la marea alta y los 2 metros por arriba de ella aproximadamente.
- 3.6 Complementar la información con los estudios de caso que registran impactos de importancia ecológica, de carácter económico y social.

4. Material y método

Se lleva a cabo la regionalización a manera de inventario, clasificando las costas en función de su geomorfología y uso del suelo; zonificando las áreas costeras críticas en dos franjas marginales: la cubierta por la marea (intermareal) considerada como el escenario básico y aquella franja comprendida entre el nivel medio relativo del mar (NMRM) y los dos metros de altura. Esta última se considera, como una superficie de riesgo potencial o amortiguamiento a los efectos del avance del agua sobre la costa, en virtud de las olas de tormenta, (mareas de tormenta) como parte del impacto hidrometeorológico que se yuxtapone con el de las mareas astronómicas en cuya conjunción repercuten como los impactos del ascenso del nivel marino.

El inventario comprende dos tipos de mediciones: lineal y areal para ambas zonas. En las mediciones lineales para la zona I Intertidal, se mide el frente marginal de los componentes geomorfológicos costeros como son: la línea de costa con playas de dunas, playas bajas y costas rocosas; para la zona II de riesgo potencial o amortiguamiento, correspondiente a las tierras bajas de llanuras costeras, se miden cuestiones de infraestructura como caminos, puentes e instalaciones portuarias. Los usos del suelo que se estiman en área para la zona I, corresponden a superficies de manglar, marisma con halófitas; y para la zona II pastizales, pantanos, zonas agrícolas, campos de dunas y asentamientos urbanos.

El avance del trabajo muestra que de las 115 cartas topográficas escala 1:50 000 que cubren la costa del Golfo de México, han sido digitalizadas 88 en los sistemas de información geográfica ILWIS y ARC/INFO, a partir de éstas se obtiene el mapa base y se hace la transferencia de las unidades geomorfológicas, la regionalización de las unidades costeras y las áreas críticas de los escenarios básicos y de riesgo potencial, que simultáneamente se están determinando a partir de la interpretación de fotos aéreas en escala diversa.

Por otro lado se consideran tres casos de estudio importantes: 1) San Fernando en el delta de Río Grande en Tamps.; 2) El Complejo deltaico Tabasqueño y Laguna de Términos, Camp. y 3) Bahías de Sian Kan, Qroo; cuyo análisis se basa en imágenes de satélite y modelos de terreno; a partir de éstos se proyectan las curvas de nivel cada metro hasta 5 y cada 10 hasta 50 metros, mismas que se precisarán en la medida que se cuente con mayor número de puntos de control o banco de datos de nivel, para ajustar la interpolación y que dé mayor confiabilidad al contorno de los niveles proyectados, con estos modelos se pretende conocer la distribución espacial, por donde penetrará la inundación, su extensión y los cambios en el uso del suelo que se esperarán, así como el de estar en posición para conocer las zonas de mayor peligrosidad; y poder estimar costos en la defensa de las costas o pérdidas por la erosión.

5. Resultados

En el inventario de mediciones lineales (tabla 1), para la zona intertidal se observa que la suma del porcentaje de playas con dunas y costas rocosas, es de 53.8%, y el correspondiente a playas bajas arenosas es de 46.2%, es decir, prácticamente un poco menos la semilongitud de la línea de costa es susceptible al ascenso del nivel del mar, si consideramos para ello el factor exclusivamente geomorfológico, en donde las playas con dunas y costas rocosas actúan como barreras, amortiguando el avance de la línea de costa. Las playas con dunas y costas rocosas se distribuyen hacia el delta del Río Grande y centro de Veracruz y Tamaulipas (Gráfica 1), no obstante del centro hacia el sur de la costa se encuentran con mayor frecuencia las playas bajas,

lo cual implica zonas o áreas más susceptibles a la erosión. En términos de infraestructura, en la zona II los caminos y canales son obras que predominan con respecto a los puentes y frentes portuarios, (Gráfica 2). Hacia el norte de la costa hay mayor porcentaje de caminos y hacia el sur de canales; lo que implica, elementos que facilitan la penetración de la cuña salina.

Haciendo énfasis en las unidades areales, para la zona I intermareal, se han evaluado hasta el presente estudio 390,507.2 has de marisma con manglar y marisma con halófitas (Tabla 2), comunidades que entre otros aspectos importantes actúan en la estabilización del sustrato de la costa a través del sistema de raíces superficiales que fijan y protegen la playa, promoviendo la formación del suelo al capturar detritus, condición que se da cuando el nivel del mar es estable o varía ligeramente, pero cuando se eleva el nivel del mar, las zonas de manglar migran tierra adentro. Se consideran modificaciones importantes, debido a que si la línea de la costa está avanzando tierra adentro, el manglar también migrará, siempre y cuando los manglares no estén sometidos a un desequilibrio ecológico importante; como son las perturbaciones que el hombre provoca (deforestación, rellenos y cambios de drenaje) y también por los efectos naturales (huracanes, sedimentación) que pueden causar modificaciones en los ecosistemas. Ambos ecosistemas (manglar y halófitas) son importantes para evaluar el escenario básico, ya que pueden registrarse el avance de la línea de costa y el impacto sobre estos; mediante registros que son posibles de seguir con el análisis multitemporal en las modificaciones del relieve costero. En la gráfica 3, se representa la distribución de estos tipos de vegetación costera, que predomina hacia el sur del Golfo de México, debido a una mejor y mayor distribución de los recursos hídricos representados por amplios sistemas fluviodeltaicos de la franja tropical.

En la zona II se sitúan áreas susceptibles o vulnerables a la penetración de la cuña salina, como son las lagunas, pantanos, esteros, mismos que se ven afectados por las altas concentraciones de sales, modificándose las propiedades del sustrato, del agua y por tanto del ecosistema en general. En la gráfica 4, se observa que los pantanos presentan una distribución centro-sur a lo largo de la costa de Tabasco y Campeche. Otras áreas importantes en el ámbito productivo son los pastizales y tierras agrícolas, las cuales también se contaminan con la intrusión salina, y son remplazadas por ambientes costeros. Estas unidades también se distribuyen en la porción centro y sur de la costa del Golfo de México.

6. Conclusion

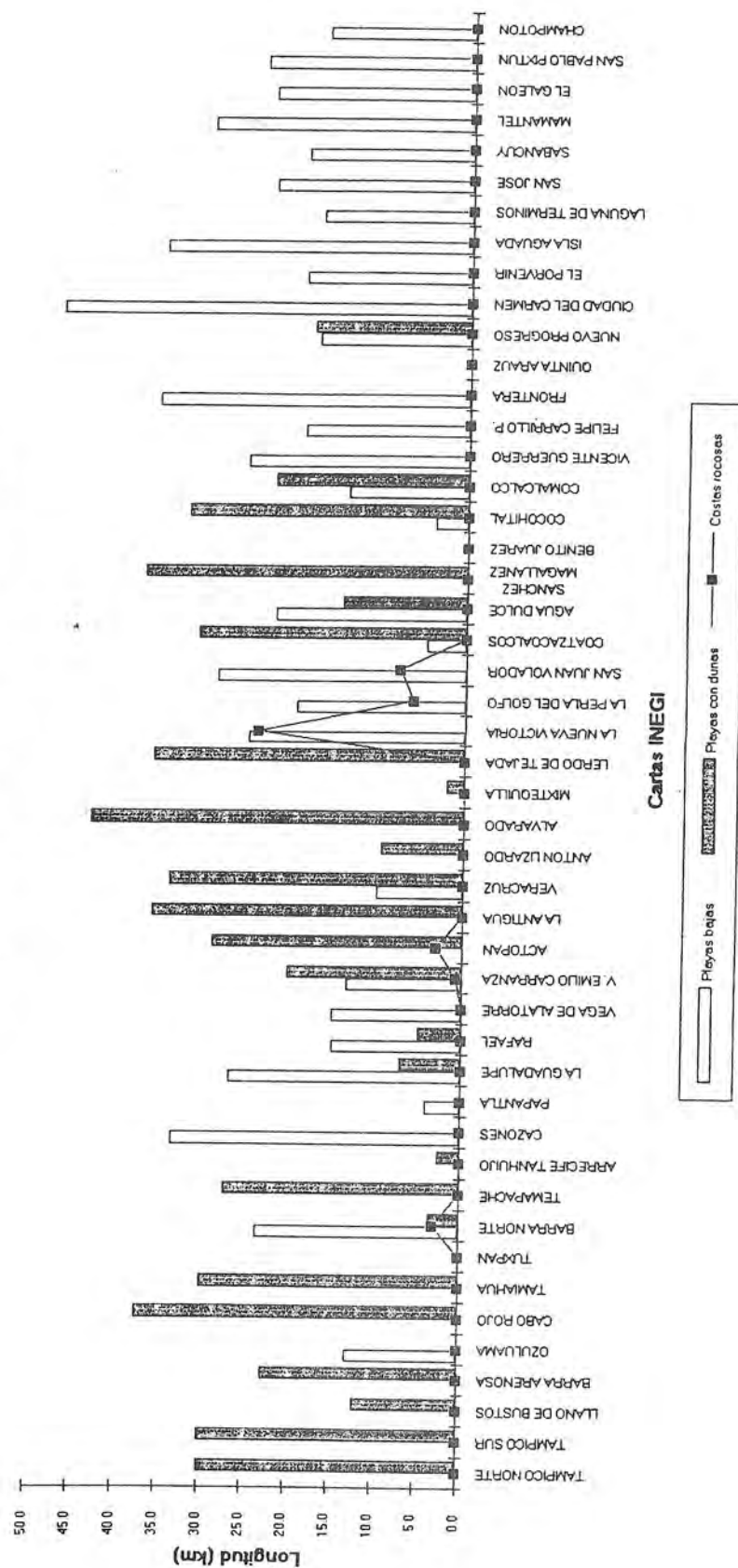
Para esta evaluación, se estima una clara zonificación de la distribución de las áreas vulnerables (zona intermareal y riesgo potencial) principalmente localizada en el complejo deltaico tabasqueño, en donde las modificaciones son profundas y drásticas al cambiar aceleradamente la línea de costa por erosión e inundación de las tierras bajas adyacentes y al alterarse el uso del suelo debido a la presión antrópica como son: cambios en el drenaje, proceso de ganaderización con pastos inducidos, etc., que rempazan a la zona de pantanos y marismas.

Mientras que en la porción norte (Tamaulipas y Veracruz) los gradientes de la línea de costa son más pronunciados por la presencia de barreras arenosas y dunas que mortiguan el avance y penetración de la cuña salina.

TABLA 1. ELEMENTOS LINEALES

NOMBRE	Zona I. Intertidal o Intermareas			ZONA II. Amortiguamiento o de Riesgo Potencial			
	PLAYAS BAJAS	PLAYAS CON	COSTAS	CAMINOS	PUENTES	CANALES	FRENTES
		DUNAS	ROCOSAS				PORTUARIOS
TAMPICO NORTE	0.0	30.0	0.0	18.0	0.0	0.0	2.5
TAMPICO SUR	0.0	30.0	0.0	2.5	1.2	0.0	13.8
LLANO DE BUSTOS	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA ARENOSA	0.0	22.8	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0
OZULUAMA	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CABO ROJO	0.0	37.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
TAMIAHUA	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.1
TUXPAN	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0
BARRA NORTE	23.5	3.5	3.0	0.0	2.0	0.0	0.0
TEMAPACHE	0.0	27.4	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0
ARRECIFE TANHUJO	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CAZONES	33.5	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
PAPANTLA	4.0	0.0	0.0	36.0	0.5	0.0	1.0
LA GUADALUPE	26.9	7.1	0.0	21.2	0.1	0.0	0.4
RAFAEL	15.0	5.0	0.0	8.2	1.0	0.0	0.0
VEGA DE ALATORRE	15.0	0.0	0.0	12.0	0.1	0.0	0.0
V. EMILIO CARRANZA	13.3	20.2	0.7	3.0	0.7	0.0	0.0
ACTOPAN	0.0	29.0	3.0	1.0	0.0	0.2	0.0
LA ANTIGUA	0.0	36.0	0.0	4.0	0.2	0.0	0.0
VERACRUZ	10.0	34.0	0.0	0.0	0.5	0.0	12.0
ANTON LIZARDO	0.0	9.5	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0
ALVARADO	0.0	43.0	0.0	6.0	0.5	0.0	1.0
MIXTEQUILLA	0.0	2.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0
LERDO DE TEJADA	0.0	36.0	0.0	0.0	0.5	11.2	2.3
LA NUEVA VICTORIA	25.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0
LA PERLA DEL GOLFO	19.5	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SAN JUAN VOLADOR	28.8	0.0	7.6	28.7	0.0	0.0	0.0
COATZACOALCOS	4.5	31.0	0.0	35.0	1.3	13.7	9.0
AGUA DULCE	22.0	14.3	0.0	2.0	0.4	21.0	0.0
SANCHEZ MAGALLANEZ	0.0	37.3	0.0	8.1	0.0	2.0	1.5
BENITO JUAREZ	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	27.3	0.0
COCOHITAL	3.7	32.3	0.0	19.8	0.0	0.0	0.0
COMALCALCO	13.8	22.3	0.0	2.0	0.0	0.0	3.0
VICENTE GUERRERO	25.5	0.0	0.0	0.0	0.2	28.0	0.0
FELIPE CARRILLO P.	18.9	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0
FRONTERA	35.9	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	2.2
QUINTA ARAUZ	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	52.2	0.0
NUEVO PROGRESO	17.4	18.0	0.0	4.4	0.0	11.6	0.0
CIUDAD DEL CARMEN	47.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0
EL PORVENIR	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0
ISLA AGUADA	35.3	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	1.8
LAGUNA DE TERMINOS	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SAN JOSE	22.7	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
SABANCUY	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MAMANTEL	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EL GALEON	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SAN PABLO PIXTUN	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHAMPOTON	16.8	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	3.0
TOTAL	623.2	572.6	44.3	289.9	14.0	178.0	57.6

Gráfica 1. Elementos lineales. Zona I. Inter tidal ó Intermareas



Gráfica 2. Elementos lineales. Zona II. Amortiguamiento ó Riesgo potencial

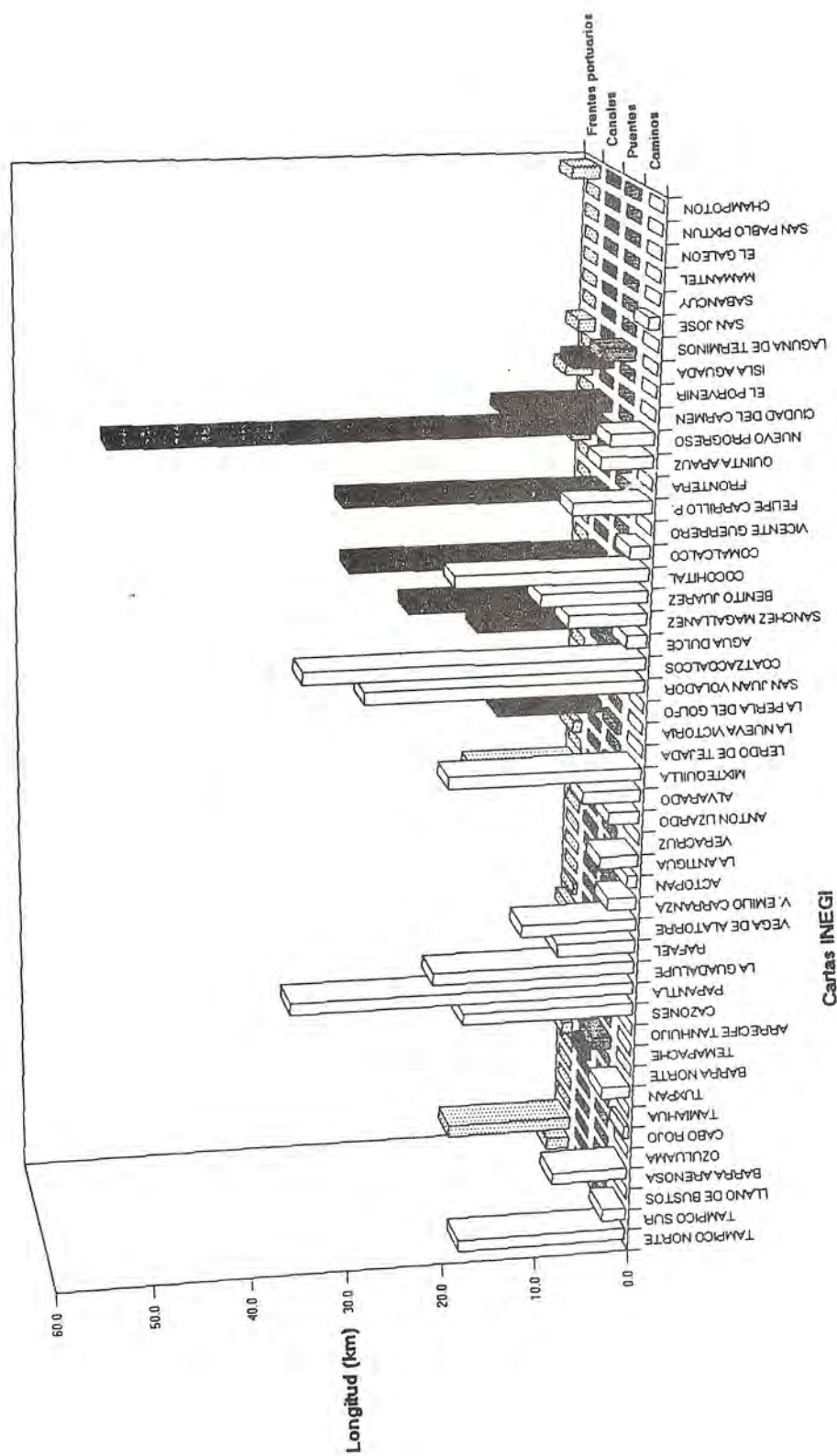
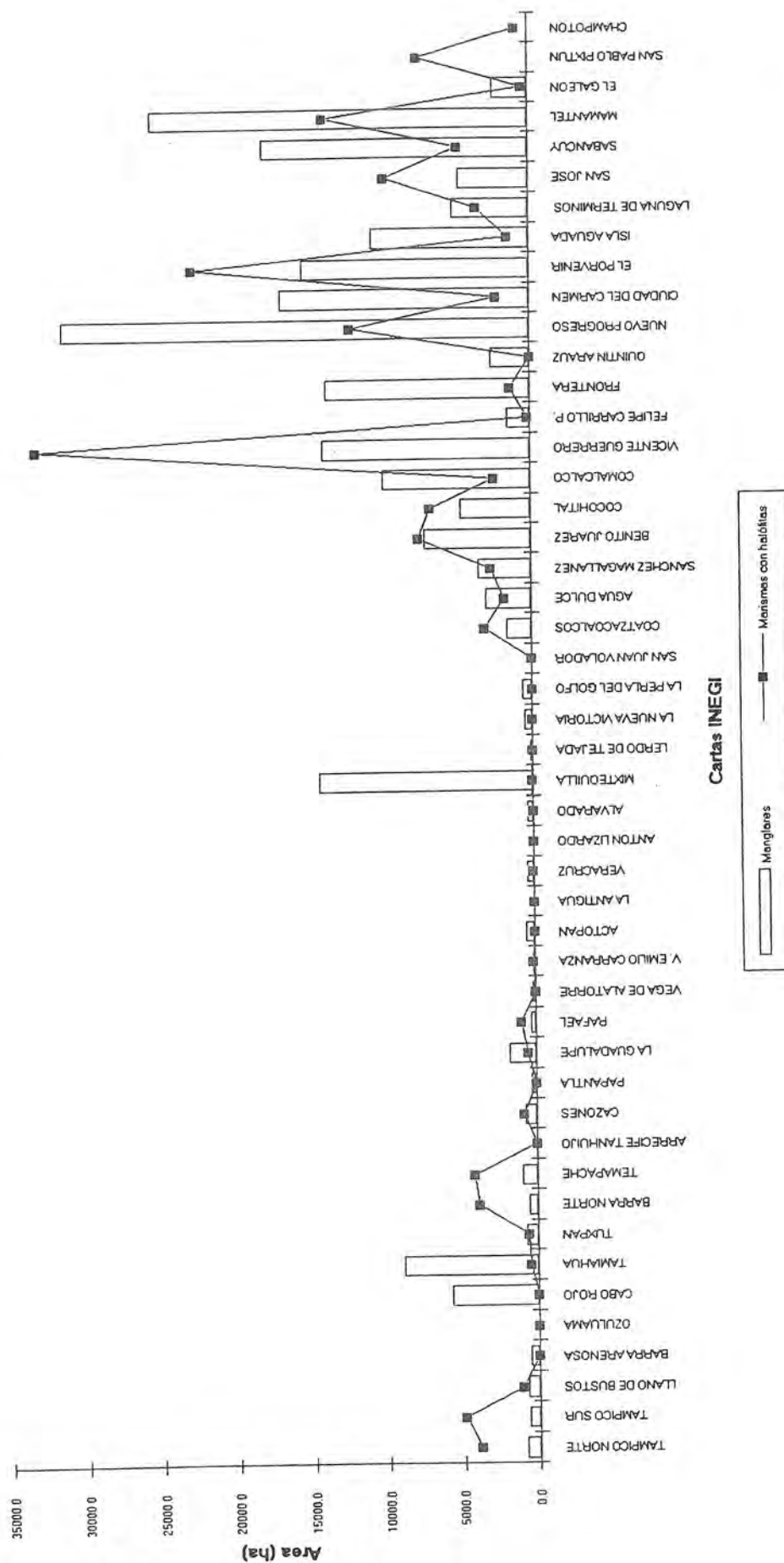


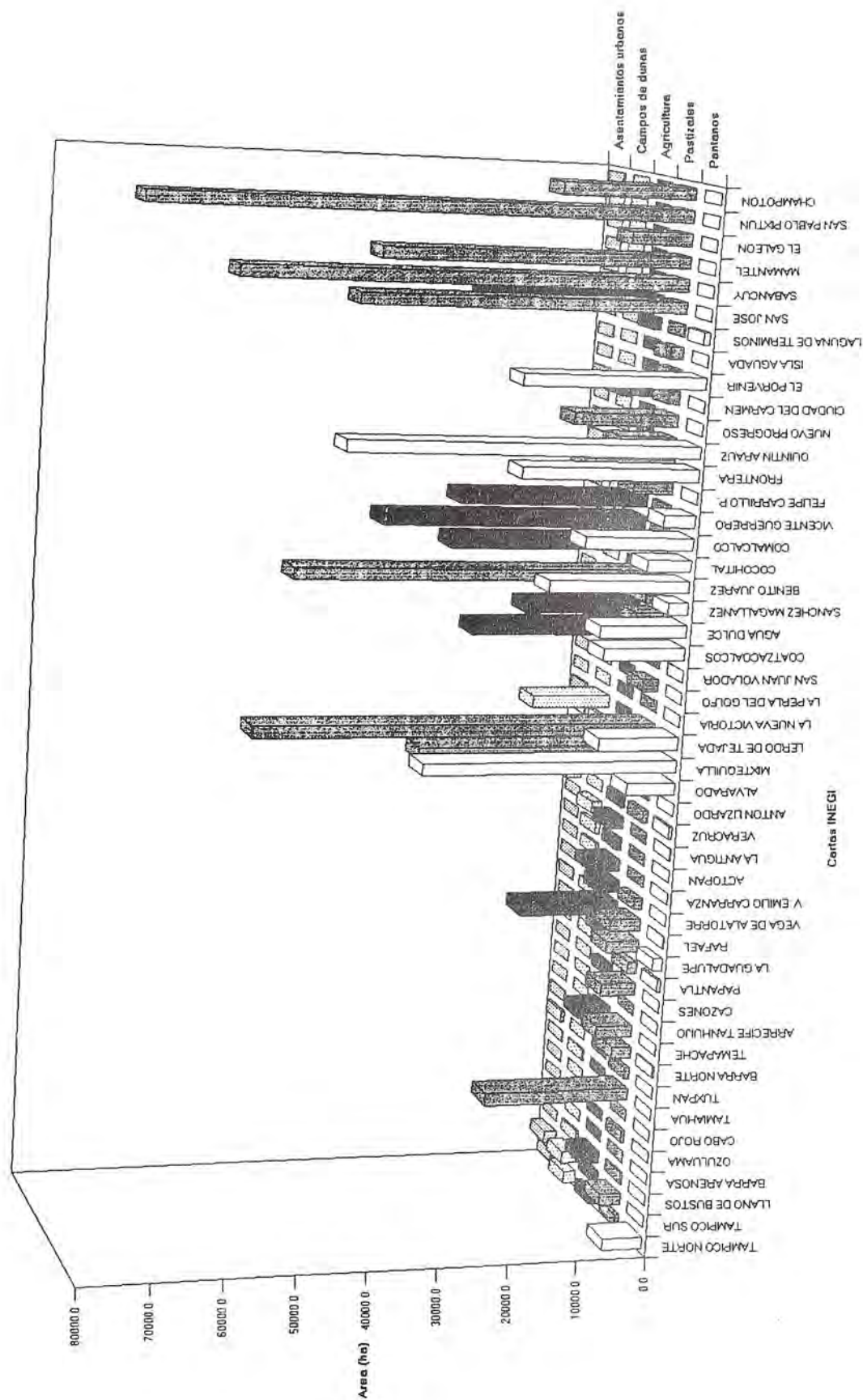
TABLA 2. CUANTIFICACION DEL RIESGO DEL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR. ELEMENTOS AREALES (HA)

CLAVE INEGI	NOMBRE	ZONA I INTERTIDAL		ZONA II AMORTIGUAMIENTO O RIESGO POTENCIAL				
		MANGLARES	MARISMAS	PANTANOS	PASTIZALES	AGRICULTURA	CAMPOS	ASENTAMIENTOS
			CON HALOFITAS				DE DUNAS	URBANOS
F14B74	TAMPICO NORTE	883.3	3865.5	5744.8	582.2	1191.4	1855.6	560.6
F14B84	TAMPICO SUR	661.0	4939.7	0.0	3048.4	701.5	2321.9	1827.2
F14D14	LLANO DE BUSTOS	742.9	1077.8	0.0	216.4	2933.2	353.4	0.0
F14D15	BARRA ARENOSA	525.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F14D24	OZULUAMA	0.0	0.0	0.0	571.5	0.0	0.0	0.0
F14D25	CABO ROJO	5700.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F14D35	TAMIAHUA	8941.2	514.2	0.0	20955.3	0.0	281.1	71.3
F14D55	TUXPAN	730.6	635.8	0.0	725.9	0.0	0.0	532.5
F14D56	BARRA NORTE	528.3	3893.0	254.8	2803.9	44.5	0.0	200.0
F14D45	TEMAPACHE	959.8	4175.6	0.0	5270.8	4611.6	0.0	0.0
F14D46	ARRECIFE TANHULIO	0.0	0.0	0.0	23.6	0.0	0.0	0.0
F14D66	CAZONES	722.6	832.2	0.0	5056.5	939.1	0.0	0.0
F14D76	PAPANTLA	316.0	0.0	494.6	1356.2	9.8	0.0	49.0
F14D77	LA GUADALUPE	1784.7	532.5	1315.9	4776.9	2245.1	150.9	16.9
F14D87	RAFAEL	287.8	987.1	72.3	4358.5	14368.0	251.5	145.0
F14D88	VEGA DE ALATORRE	194.0	0.0	0.0	1151.8	2918.8	0.0	22.9
E14B18	V. EMILIO CARRANZA	109.5	120.4	0.0	0.0	4200.2	448.3	0.0
E14B28	ACTOPAN	552.4	0.0	0.0	0.0	750.3	669.2	0.0
E14B39	LA ANTIGUA	0.0	0.0	19.1	0.0	2200.2	1449.5	5.0
E14B49	VERACRUZ	460.1	57.0	426.3	742.0	533.5	99.2	2269.1
E15A41	ANTON LIZARDO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.6	0.0
E15A51	ALVARADO	356.4	0.0	6975.2	0.0	11135.7	2181.9	63.5
E15A61	MXTEQUILLA	14333.7	94.2	35729.7	33402.1	0.0	744.7	139.9
E15A62	IERDO DE TEJADA	144.1	0.0	11341.3	56944.3	0.0	11275.6	306.4
E15A63	LA NUEVA VICTORIA	502.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
E15A64	LA PERLA DEL GOLFO	599.4	0.0	0.0	2139.1	0.0	0.0	0.0
E15A74	SAN JUAN VOLADOR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
E15A85	COATZACOALCOS	1620.1	3180.5	11571.5	0.0	24004.6	5818.3	0.0
E15A86	AGUA DULCE	3039.3	1831.6	12224.2	3861.5	16461.5	0.0	74.1
E15A77	SANCHEZ MAGALLANEZ	3546.2	2733.7	2859.9	2588.0	0.0	395.0	43.8
E15A87	BENITO JUAREZ	7113.5	7547.6	19705.3	52256.2	0.0	0.0	0.0
E15A78	COCOITAL	4644.5	6725.8	6266.3	0.0	27675.9	1303.3	0.0
E15A79	COMALCALCO	9885.7	2468.8	15194.1	536.8	37661.2	1405.5	355.0
E15B71	VICENTE GUERRERO	13913.2	33038.9	4476.9	484.9	26940.0	0.0	0.0
E15B61	FELIPE CARRILLO P.	1523.3	163.4	0.0	5548.6	0.0	0.0	0.0
E15B62	FRONTERA	13690.5	1341.7	24607.0	12656.2	1168.0	0.0	411.4
E15B72	QUINTIN ARAUZ	2640.4	0.0	48706.0	7955.6	0.0	0.0	0.0
E15B63	NUEVO PROGRESO	31260.9	12078.0	0.0	14600.0	0.0	0.0	0.0
E15B64	CIUDAD DEL CARMEN	16719.7	2268.1	0.0	1630.7	5040.7	0.0	441.5
E15B74	EL PORVENIR	15301.7	22626.4	25310.0	1313.1	0.0	0.0	0.0
E15B35	ISLA AGUADA	10520.8	1452.6	0.0	1931.1	0.0	0.0	80.0
E15B65	LAGUNA DE TERMINOS	5112.5	3513.5	817.9	184.7	1065.3	0.0	0.0
E15B75	SAN JOSE	4661.4	9714.5	0.0	45420.2	25432.4	0.0	0.0
E15B56	SABANCUY	17881.1	4751.4	0.0	61927.3	0.0	0.0	0.0
E15B66	MAMANTEL	25300.5	13800.1	55.8	42773.6	0.0	0.0	0.0
E15B46	EL GALEON	2387.4	455.7	0.0	8475.6	0.0	0.0	0.0
E15B47	SAN PABLO PIXTUN	0.0	7427.6	0.0	74870.2	0.0	0.0	0.0
E15B37	CHAMPOTON	0.0	864.7	0.0	18566.7	0.0	0.0	336.0
TOTAL		230797.6	159709.6	234169.1	501706.4	214232.5	31086.5	7951.0

Gráfica 3. Elementos areales. Zona I Inter tidal ó Intermareas



Gráfica 4. Elementos areales. Zona II Amortiguamiento o Riesgo potencial



Una estimación del impacto de la duplicación del CO₂ atmosférico en el bioclima humano de México

E. JAUREGUI, A. RUIZ, C. GAY

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México

A. TEJEDA

C. C. A., Universidad Veracruzana

RESUMEN

Se hace una estimación preliminar de las condiciones bioclimáticas en México que resultarían de un doblamiento del CO₂. Esta estimación se basa en los escenarios regionales para México, derivados de algunos modelos de circulación general. Se presentan mapas de un índice bioclimático simple (la temperatura efectiva) que muestran que con un doblamiento del CO₂ las regiones donde aumentaría marcadamente el estrés por calor en el verano serían el norte y noroeste del país, donde las condiciones bioclimáticas alcanzan actualmente niveles elevados de carga de calor en esta estación.

ABSTRACT

An effective temperature scenario for Mexico due to doubling of CO₂ is presented. The procedure consists in applying a simple biometeorological index: the effective temperature (ET) concept (Thom, 1957) eq. 1 to monthly normals of temperature and relative humidity for 67 climatological stations in Mexico. Mean wet-bulb monthly temperatures (tw) were estimated by using eq. 2 following an iterative procedure. Once mean values of tw were calculated, mean monthly maps of ET were drawn with corresponding 1950-80 normals.

On the other hand a regression was established to estimate the ambient vapour pressure (*e*) based on mean monthly temperature (*t*), and precipitation totals (*r*) (eq. 3). The correlation coefficient was 0.8917, the significant level obtained was 0.001 and a standard error of estimate was 3.0 hPa. The following step was to use monthly values of *t* and *r* taken from corresponding regional maps (for Mexico) kindly provided by Conde *et al.* and derived from various (4) general circulation models. Effective temperature for 2 × CO₂ was calculated for January and July considering 4 simulations.

Results of GFDL model combined with changes in R.H. estimated by eqs. 4) and 5) located about the mid-point between the extreme values given by other (3) combinations, were adopted.

Finally, the E.T. maps for 2 × CO₂ for Mexico were drawn. In January bioclimatic conditions in the country vary from neutral to cool and cold environments. In July however, while neutral comfort conditions are maintained in the highlands of central Mexico the heat load increases to the North and Northwest reaching ET values beyond sultriness levels. It should be noted that these are estimations of the mean monthly values and therefore the afternoon levels are likely to be 2° to 3°C higher. Estimates of impact of additional heat loads on the projected population are made.

1. Introducción

Entre los impactos potenciales asociados al calentamiento global, se encuentran un mayor riesgo de las ondas de calor y ambientes bochornosos que inciden sobre la salud humana. A esta carga adicional de calor se agregará en las grandes ciudades el efecto adverso de la elevación de los niveles de ozono. ¿En qué medida y en qué regiones del país aumentará la incomodidad del hombre para el momento en que se duplique la concentración actual del CO₂? En el presente trabajo se intenta hacer una valuación del bioclima humano en México en condiciones de un doblamiento de los gases de invernadero.

2. Los datos

Se contó con las normales climatológicas mensuales de temperatura y humedad relativa para la red de 67 observatorios del país (período 1950-80). Se contó además los mapas mensuales

de escenarios de temperatura y precipitación para el país resultantes de la modelación para un doblamiento de CO₂ proporcionados gentilmente por la Sección de Interacción de Radiación y Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias de la Atmósfera. (Conde *et al.*, 1995).

3. Métodos

Se utiliza un índice bioclimático empírico simple de la temperatura efectiva (TE) propuesta por Thom (1957) que considera el efecto combinado de la temperatura y humedad sobre la fisiología humana, siendo válida para sujetos vestidos de acuerdo al ambiente, realizando tareas sedentarias, en equilibrio radiativo intramuros y con una ventilación natural. La expresión es:

$$TE = 0,4(t + tw) + 4.8 \quad (1)$$

t - temperatura ambiente °C

tw - temperatura del bulbo húmedo °C

Con los datos mensuales de temperatura y humedad relativa (HR) se calculó la temperatura del bulbo húmedo (tw), mediante la expresión siguiente:

$$e_{sw} - \left(\frac{HR}{100}\right)e_s = 6,53 \times 10^{-4}p(t - tw) \quad (2)$$

donde:

e_s - tensión de saturación del vapor a temperatura ambiente

p - presión atmosférica media de la estación (hPa)

e_{sw} - tensión de saturación del vapor a temperatura de bulbo húmedo

Para calcular tw se utilizó un método iterativo con un error máximo de aproximación de tw menor de 0.1°C (Tejeda, 1994).

Una vez calculada tw se calculó la TE según la expresión 1) y se trazaron los mapas de TE para el período 1950-80.

Por otra parte se hizo el cálculo de la tensión de vapor utilizando la siguiente relación empírica basada en la temperatura mensual (°C) y la precipitación r (mm/mes) medios mensuales. Previamente se comprobó la no dependencia de t con r .

$$e = -5.81 + 1.056/t + 1.65 \times 10^{-2}r \quad (3)$$

La regresión para el cálculo de e obtuvo un coeficiente de correlación de 0.8917 (es decir, un coeficiente de determinación de 79.6%) a un nivel de significación de 0.001 y un error estandar de estimación de 3.0 mb.

Cálculo de la TE para $2 \times \text{CO}_2$

Una vez comprobada la confiabilidad de la regresión para calcular la tensión del vapor ambiente (e), se procedió a estimar la correspondiente tensión del vapor para los valores de t y r correspondientes a $2 \times \text{CO}_2$ utilizando la expresión (3):

$$e_{2 \times \text{CO}_2} = -5.81 + 1.056t_{2 \times \text{CO}_2} + 1.65 \times 10^{-2}r_{2 \times \text{CO}_2} \quad (4)$$

de escenarios de temperatura y precipitación para el país resultantes de la modelación para un doblamiento de CO₂ proporcionados gentilmente por la Sección de Interacción de Radiación y Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias de la Atmósfera. (Conde *et al.*, 1995).

3. Métodos

Se utiliza un índice bioclimático empírico simple de la temperatura efectiva (TE) propuesta por Thom (1957) que considera el efecto combinado de la temperatura y humedad sobre la fisiología humana, siendo válida para sujetos vestidos de acuerdo al ambiente, realizando tareas sedentarias, en equilibrio radiativo intramuros y con una ventilación natural. La expresión es:

$$TE = 0.4(t + tw) + 4.8 \quad (1)$$

t - temperatura ambiente °C

tw - temperatura del bulbo húmedo °C

Con los datos mensuales de temperatura y humedad relativa (HR) se calculó la temperatura del bulbo húmedo (tw), mediante la expresión siguiente:

$$e_{sw} - \left(\frac{HR}{100}\right)e_s = 6.53 \times 10^{-4} p(t - tw) \quad (2)$$

donde:

e_s - tensión de saturación del vapor a temperatura ambiente

p - presión atmosférica media de la estación (hPa)

e_{sw} - tensión de saturación del vapor a temperatura de bulbo húmedo

Para calcular tw se utilizó un método iterativo con un error máximo de aproximación de tw menor de 0.1°C (Tejeda, 1994).

Una vez calculada tw se calculó la TE según la expresión 1) y se trazaron los mapas de TE para el período 1950-80.

Por otra parte se hizo el cálculo de la tensión de vapor utilizando la siguiente relación empírica basada en la temperatura mensual (°C) y la precipitación r (mm/mes) medios mensuales. Previamente se comprobó la no dependencia de t con r .

$$e = -5.81 + 1.056/t + 1.65 \times 10^{-2} r \quad (3)$$

La regresión para el cálculo de e obtuvo un coeficiente de correlación de 0.8917 (es decir, un coeficiente de determinación de 79.6%) a un nivel de significación de 0.001 y un error estándar de estimación de 3.0 mb.

Cálculo de la TE para $2 \times \text{CO}_2$

Una vez comprobada la confiabilidad de la regresión para calcular la tensión del vapor ambiente (e), se procedió a estimar la correspondiente tensión del vapor para los valores de t y r correspondientes a $2 \times \text{CO}_2$ utilizando la expresión (3):

$$e_{2 \times \text{CO}_2} = -5.81 + 1.056t_{2 \times \text{CO}_2} + 1.65 \times 10^{-2} r_{2 \times \text{CO}_2} \quad (4)$$

Los valores de $t_{2 \times CO_2}$ y $r_{2 \times CO_2}$ se obtuvieron del promedio de los mapas mensuales de estas variables que resultaron de la aplicación del modelo GFD3 (Conde, 1994).

Se calculó la tensión del vapor de saturación ($e_{s2 \times CO_2}$) aplicando la ecuación de Clausius-Clapeyron para $t_{2 \times CO_2}$

$$e_s = \exp\left(\frac{2.14t(2 \times CO_2) + 494.41}{t(2 \times CO_2) + 273.15}\right) \quad (5)$$

$$\log e_{s(2 \times CO_2)} = 8.4051 - \frac{2353}{t_{2 \times CO_2}} \quad (6)$$

y la $HR_{2 \times CO_2}$

$$RH_{2 \times CO_2} = \frac{e(2 \times CO_2)}{e_{s(2 \times CO_2)}} \times 100 \quad (7)$$

$tw_{(2 \times CO_2)}$ resultó también de aplicar un método iterativo (Tejeda, 1994) a la ec. 2 considerando invariante la presión ante la duplicación de CO_2 atmosférico.

Finalmente se aplicó la ec. 1 con los nuevos valores de $t_{2 \times CO_2}$ y $tw_{(2 \times CO_2)}$

$$TE_{(2 \times CO_2)} = 0.4[t_{2 \times CO_2} + t_{w(2 \times CO_2)}] + 4.8 \quad (8)$$

Los escenarios climáticos regionales y la temperatura efectiva

Los escenarios regionales que se utilizan en el presente trabajo son los que resultaron de los modelos CCCM (canadiense) y CFDL (estadounidense) aplicados para México. Es conocida la limitación que tienen los modelos regionales que se derivan de aquellos de circulación general de la atmósfera (GCM) (Magaña, 1995). De modo que los resultados del escenario bioclimático para $2 \times CO_2$ que aquí presentamos tendrá las mismas limitaciones que dichos CGM en los cuales se basa. Aquí, como ilustración, se presentan sólo los mapas de enero y julio de temperatura ($2 \times CO_2$) y precipitación $2 \times CO_2/1 \times CO_2$ (Figs. 1 a 4). La temperatura aumentará hacia el NW del país mientras que la precipitación exhibirá una gradiente hacia esa misma región.

Para los meses de enero a julio se hizo el cálculo de $TE_{2 \times CO_2}$ considerando 4 simulaciones:

- Con el modelo GDFL y HR (mensual) invariante ante $2 \times CO_2$.
- Con el modelo CCCM y HR invariante para $2 \times CO_2$.
- Con modelo GFDL y HR cambia según ecs. 4) y 5).
- Con modelo CCCM y HR cambia según ecs. 4) y 5).

Los cálculos con la opción (c) resultaron estar aproximadamente en el punto medio de las cuatro opciones, por lo que se decidió aplicarla a la estimación de TE para los meses de enero, abril, julio y octubre.

4. Resultados

Las Figs. 5 a 8 muestran la distribución de las TE para 4 meses significativos del año y para las condiciones promedio actuales (1950-80): enero (mes frío), abril (caluroso en el centro/sur de México), julio (lluvias y caluroso en el norte) y octubre (transición).

Para interpretar los resultados se presenta la siguiente tabla de sensaciones térmicas:

		TE°C
- 3	muy frío	< 5
- 2	frío	6 - 14.9
- 1	fresco	15 - 18
0	neutro	18.1 - 21
+ 1	tibio confortable	21.1 - 24
+ 2	caluroso	24.1 - 27
+ 3	bochorno	27 - 30

La sensación de ambiente neutro (0) en la que el sujeto no pierde ni gana calor del ambiente no siempre corresponde a la TE preferente y usualmente es ligeramente sesgado hacia un ambiente algo tibio. En estas condiciones la temperatura de la piel es de 33.3°C (para una revisión de los índices bioclimáticos (ver Taesler, 1987)). Esta tabla corresponde a sujetos realizando actividad sedentaria, vestidos de acuerdo al ambiente térmico intramuros en equilibrio radiativo de un recinto ventilado.

a) Condiciones bioclimáticas actuales

En enero las condiciones actuales bioclimáticas medias en el país van de ambiente neutro a fresco/frío. En julio, mientras que en el altiplano central el ambiente es neutro, la carga de calor aumenta hacia el NW.

b) El bioclima humano en México a mediados del siglo XXI

En las Figs. 9 a 12 se muestran los mapas de TE que resultarían de un doblamiento del CO₂.

Mientras que en enero los ambientes neutros o frescos entre el ser humano y el ambiente bioclimático prevalecen en casi todo el país, para julio las TE se mantienen en la neutralidad en el altiplano pero se elevan más allá de los límites de confort en el N del país y en ambas costas.

Conviene advertir que los resultados obtenidos en las Figs. 9 a 12 representan los valores medios del día, por lo que si se desea conocer los valores máximos del día, digamos de las 10 a las 16 hrs, habría que agregar a la TE en promedio de 2 a 4°C. Además, si la persona en vez de encontrarse intramuros sale a la calle al mediodía con cielo despejado en el verano, la intensa radiación y viento débil agrega una carga de TE de unos 4° adicionales (Fig. 2 en Hentschel, 1987). Así, en el noroeste y norte áridos, los valores de la TE después del mediodía podrán alcanzar hasta más de 31° de TE, lo que implica ambientes bioclimáticos que están más allá del umbral aceptado como límite de tolerancia humana (Landsberg, 1972). Según este autor menciona que arriba de TE 30 a 31°C la temperatura corporal comienza a subir, mientras que una TE de 35 es el límite superior de la tolerancia fisiológica humana.

De resultar realistas estos escenarios bioclimáticos, las ondas de calor durante el verano que usualmente se presentan asociados a los niveles de contaminación en las grandes ciudades estarán ligadas a una mayor incidencia de morbilidad y mortalidad de la población urbana del N de México donde el bioclima está determinado por las altas temperaturas y fuerte radiación. En un ambiente más caluroso, el mecanismo importante de intercambio del humano con el ambiente es la evaporación del sudor de la piel. En un ambiente caluroso, el cuerpo tiene que aumentar la circulación sanguínea para aliviar la carga de calor. Como el incremento de calor será gradual

y tal vez en forma de una mayor frecuencia de ondas de calor, la población tendrá tiempo de adaptarse fisiológicamente a las nuevas condiciones bioclimáticas del N del país. En las costas de México las nuevas TE resultantes del doblamiento del CO₂ en los meses calurosos de mayo-septiembre resultarán más críticas, especialmente para un peatón en un mediodía soleado, ya que no podrá aligerar sino parcialmente la carga de calor ~~normalmente soportable~~ debido a que la elevada humedad ambiente limitará el enfriamiento por evaporación del sudor de la piel expuesta.

c) Los incrementos de la TE

Las Figs. 13 y 15 muestran los incrementos en la TE para $2 \times \text{CO}_2$ y para los meses de enero, abril y julio. Los incrementos mayores que ocurren en el mes de abril (hasta 5.5°TE en Chihuahua) reduciéndose dichos incrementos a 2-3°TE en enero y julio. Es en el NW del país donde las condiciones bioclimáticas se tornarán más críticas debido a los incrementos considerables en la carga de calor en esa región.

d) Impacto del calentamiento global sobre la población

Los diagramas de barras de las Figs. 16 a 18 muestran para tres grados de confort (incomfort) y para el conjunto del territorio las condiciones bioclimáticas que impactan a la población del país en la actualidad (1980) en comparación con la población que resultaría afectada de acuerdo con la proyección estimada por Aguilar (1995 este volumen). Es claro que para todo el país una mayor población resultará afectada por los ambientes cálidos (TE mayor que 24°) sobre todo en la región norte de México.

5. Consideraciones finales

En este trabajo se ilustra el efecto que tendría el calentamiento global sobre cambios del bioclima humano estimados con la aplicación de un índice bioclimático empírico simple, (no considera los efectos de otros factores bioclimáticos así como el vestido y grado de actividad del sujeto) que intenta relacionar las condiciones higrotérmicas ambientales con las correspondientes sensaciones térmicas del ser humano. Los resultados señalan que las mayores cargas térmicas en la población ocurrirán en el Noroeste y Norte del país, de realizarse un doblamiento de CO₂. La veracidad de este escenario bioclimático está condicionada al grado de aproximación obtenido de la simulación de los GCM a la escala regional del país en los cuales se basa esta estimación de un escenario futuro para México.

Reconocimientos

Los autores agradecen al Dr. G. Aguilar la información de la demografía del país; a la Geog. Elda Luyando y al Met. Jorge García M. por la captura de datos, a Jorge Ruíz B. por elaborar programa de cómputo. A C. Conde y O. Sánchez por proporcionar mapas de escenarios regionales y a G. Zárraga por el trabajo del texto en computadora.

REFERENCIAS

- Aguilar, R. G., 1995. Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humanos en México.-Vulnerabilidad al cambio climático. Memorias II, Taller Estudio de país. Cuernavaca.
- Conde, C., 1994. Comunicación Personal.
- Conde, C., O. Sánchez y C. Gay, 1995. Escenarios básicos y regionales. Estudio de país, México. Memorias Primer Taller de Estudio de País, México ante el cambio global, Cuernavaca 18-22

- abril de 1994, pp. 39-44.
- Hentschel, G., 1987. A human biometeorology classification of climate. En Proceed. of WMO Symp. on Human Health and Climate. WCPA-1 120-137, Leningrado.
- Landsberg, H., 1972. The assessment of human bioclimate - a review. WMO Tech. Note 123, WMO 331, Ginebra.
- Magaña, V., 1995. A strategy to determine regional climate change. En Memoria del Primer Taller de Estudio de País, México. Cuernavaca, Abril 1995, 45-53.
- Taesler, R., 1987. Climate characteristics and human health. En Proceed. Symp. on Climate and Human Health. WCPA No. 1. P. 81-119.
- Tejeda, A., 1994. On the evaluation of the wet-bulb air temperature as a function of dry-bulb temperature and relative humidity. *Atmósfera*, 7, 179-184.
- Thom, E. C., 1957. A new concept for cooling degree-days. *Air. Cond. Heat. and Ventil.*, 54, 6, 73-80.

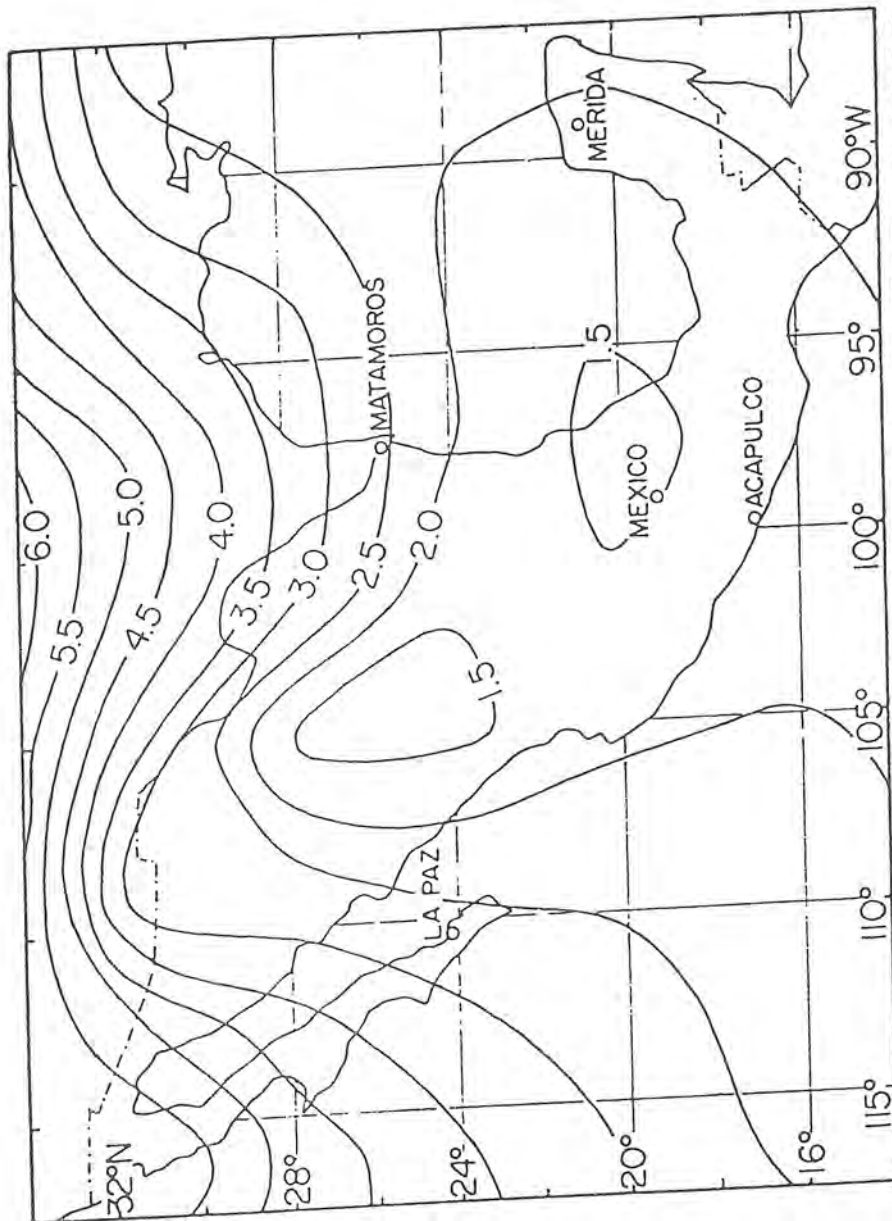


FIG. 1. TEMPERATURE INCREASE (°C) FOR JANUARY WITH DOUBLING OF CO₂ (2x CO₂ - 1x CO₂). APPLYING CCCM. (AFTER CONDE ET AL, 1995).

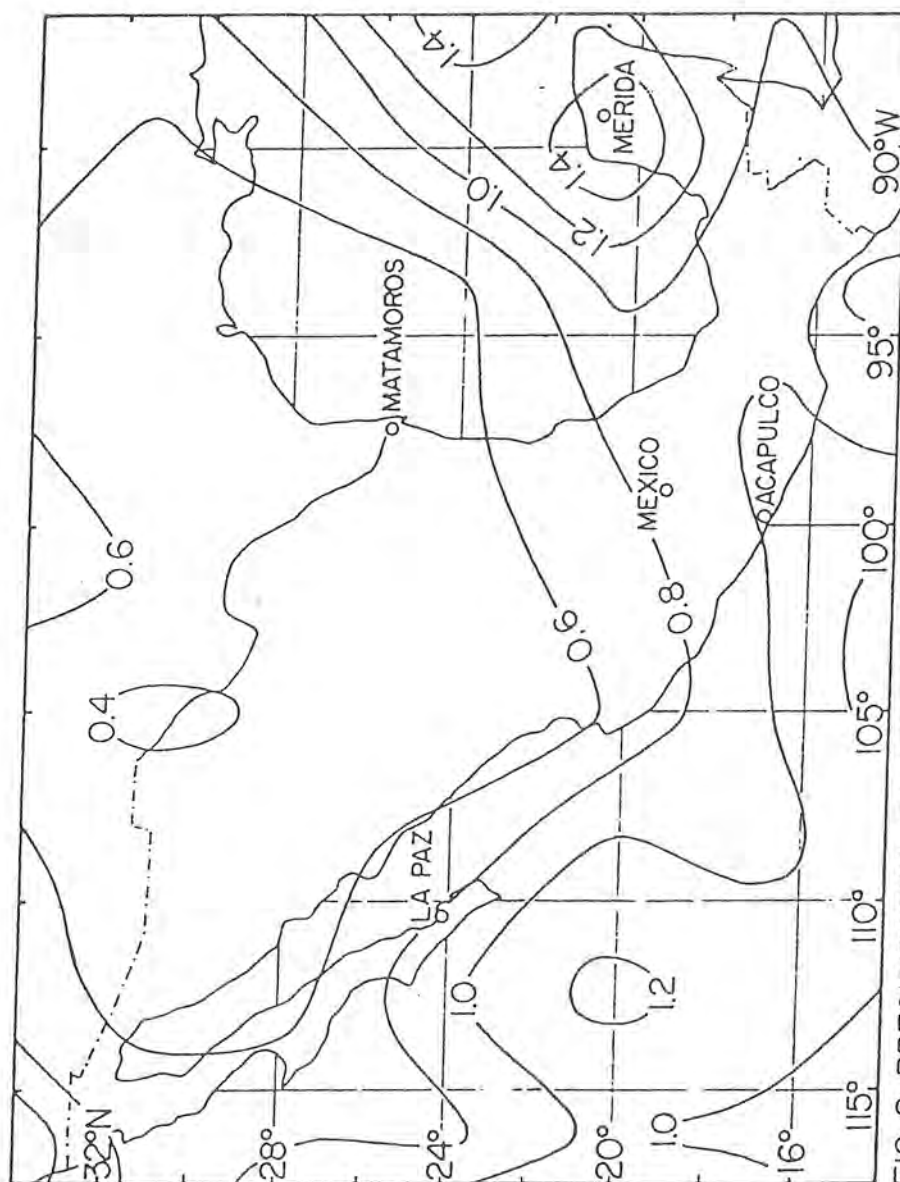


FIG. 2. PRECIPITATION RATIOS ($2 \times \text{CO}_2 / 1 \times \text{CO}_2$) FOR JANUARY: USING CCCM. (AFTER CONDE ET AL, 1995).

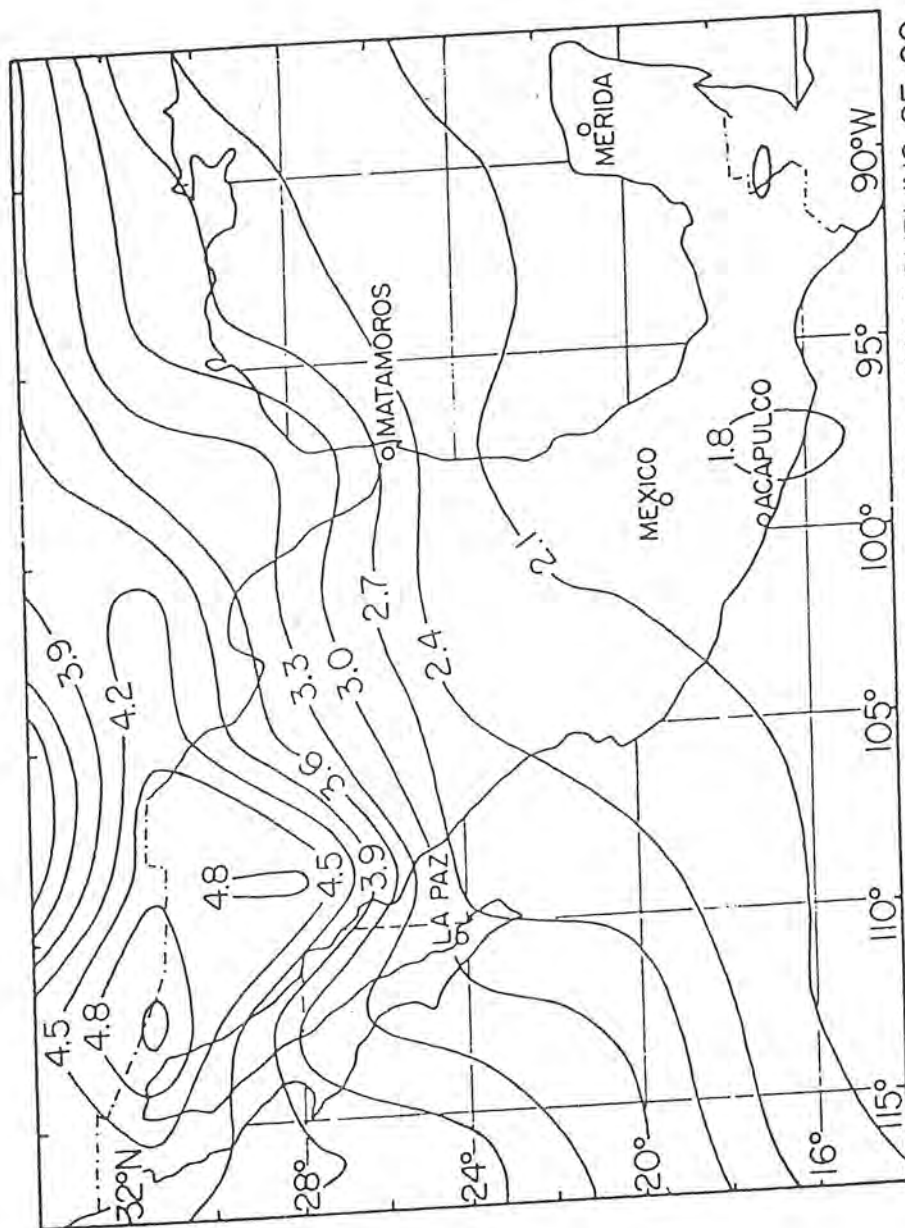


FIG. 3. TEMPERATURE INCREASE (°C) FOR JULY WITH DOUBLING OF CO₂ (2xCO₂ - 1xCO₂). APPLYING CCCM. (AFTER CONDE ET AL, 1995).

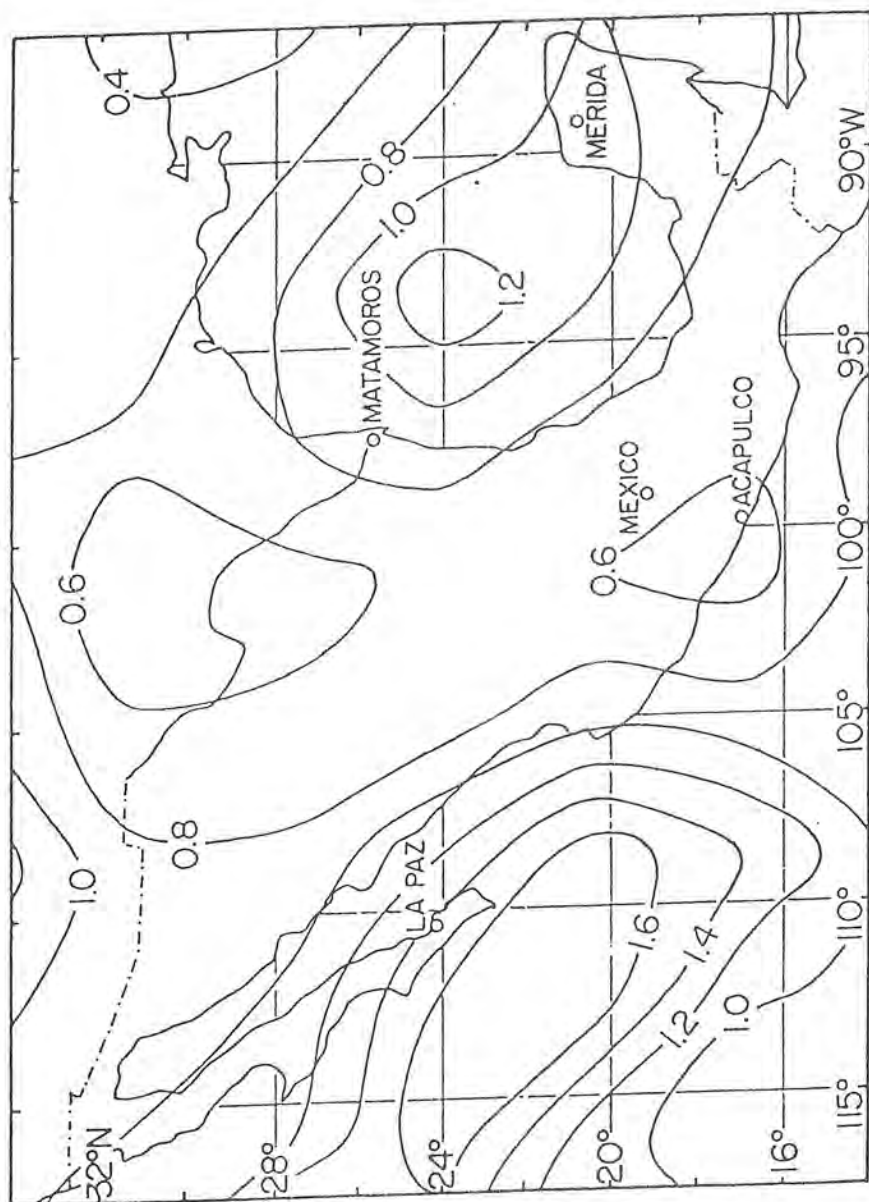


FIG. 4. PRECIPITATION RATIOS ($2 \times \text{CO}_2 / 1 \times \text{CO}_2$) FOR JULY. USING CCCM. (AFTER CONDE ET AL, 1995).

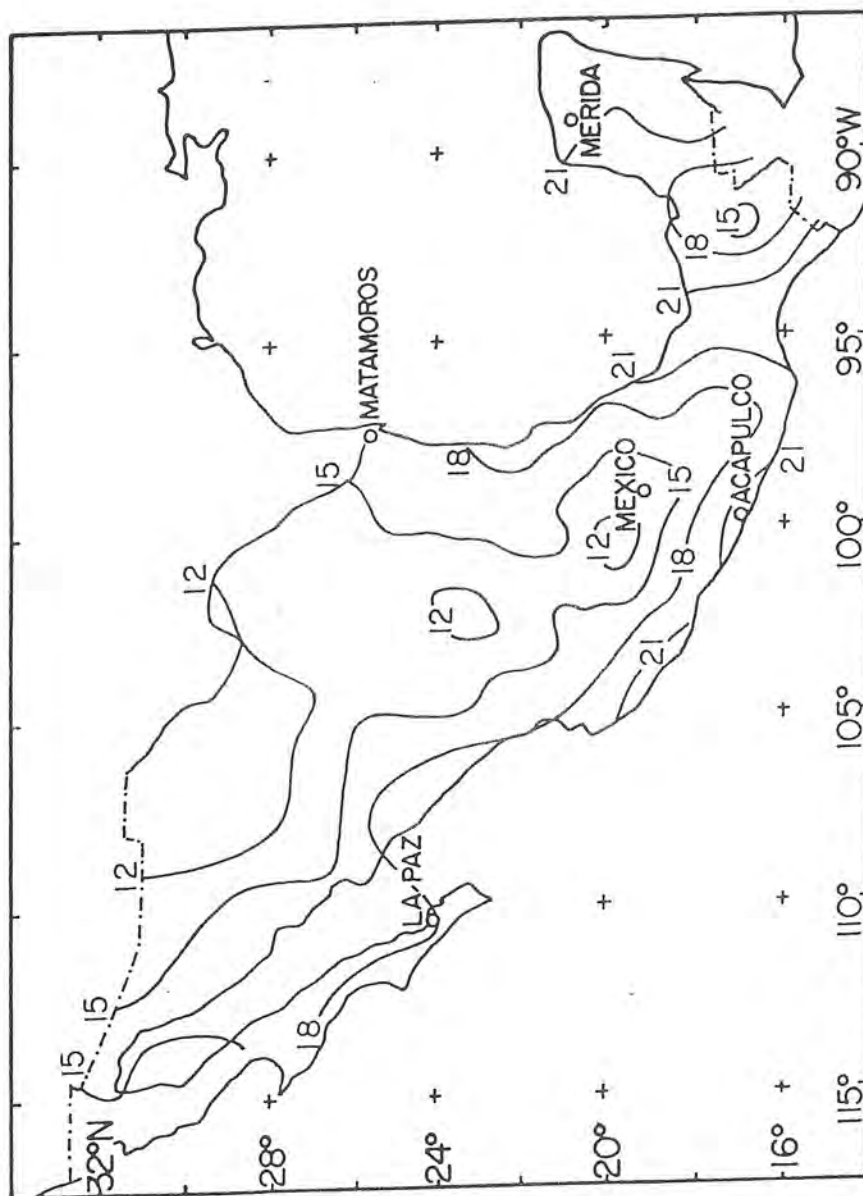


FIG. 5. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (ET) (°C) FOR JANUARY.
PERIOD 1951-1980.

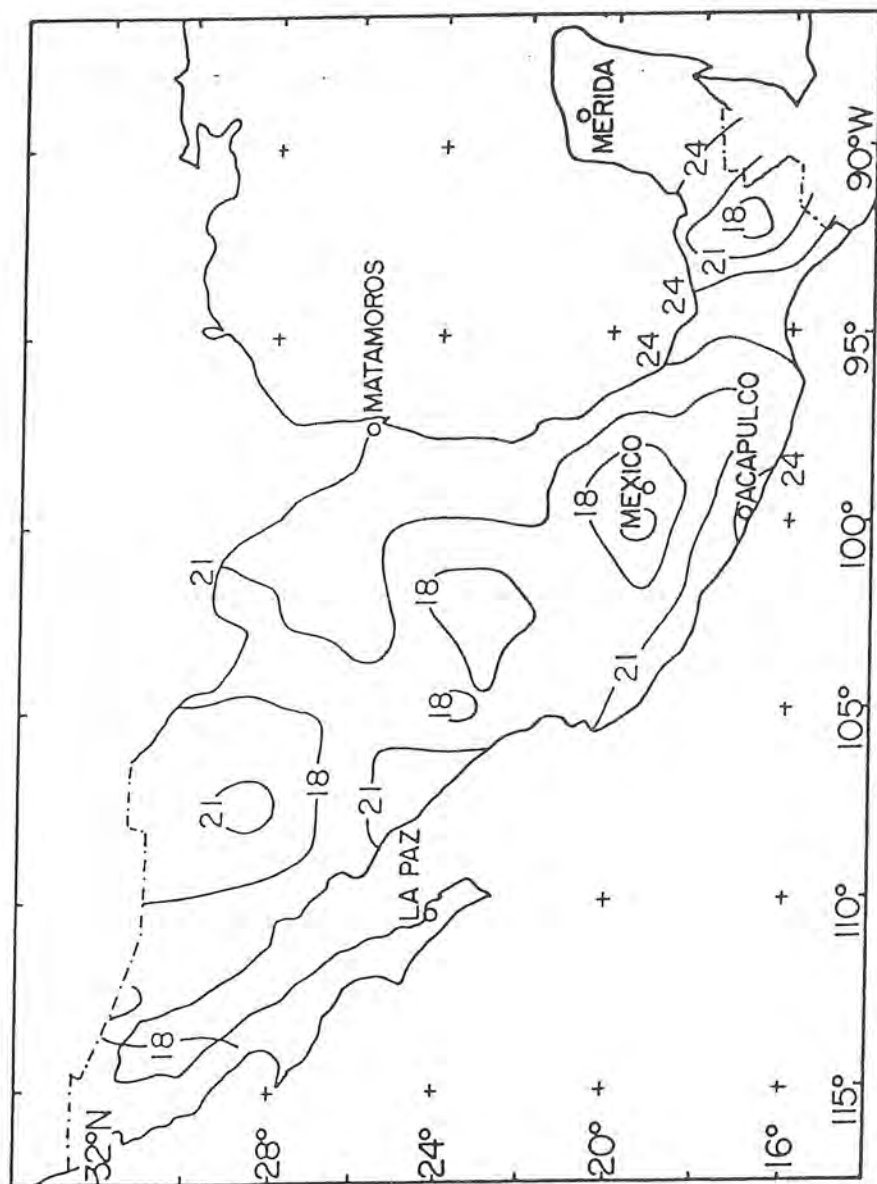


FIG. 6. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (ET) ($^{\circ}\text{C}$) FOR APRIL.
PERIOD 1951-1980.

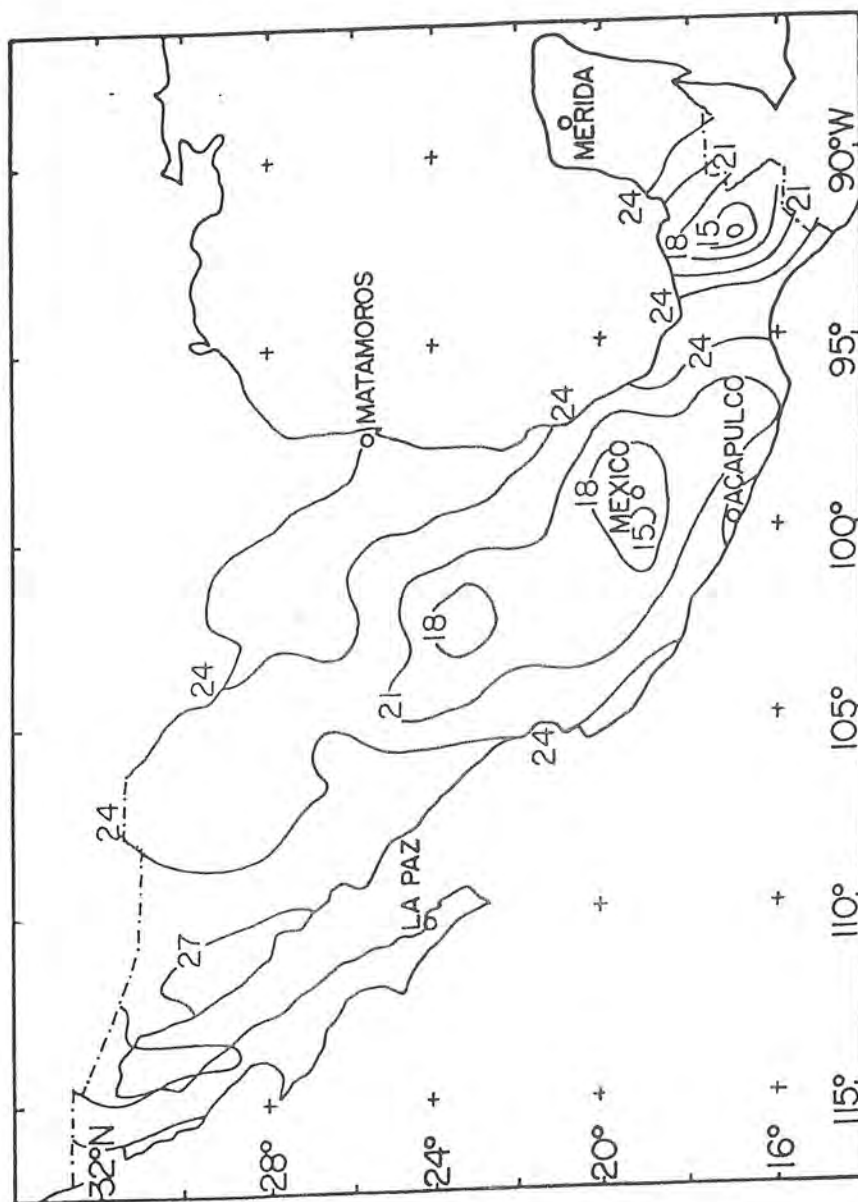


FIG. 7. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (ET) ($^{\circ}\text{C}$) FOR JULY. PERIOD 1951-1980.

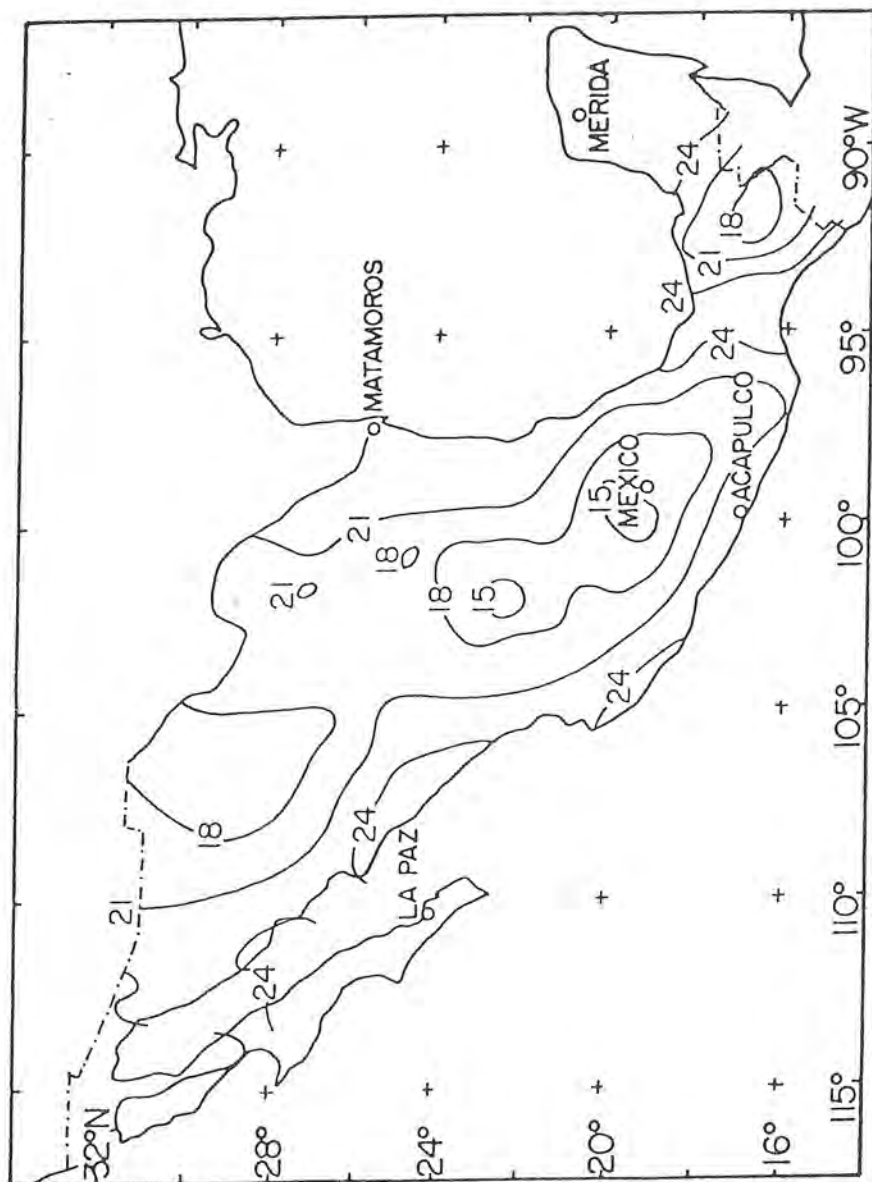


FIG. 8. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (ET) ($^{\circ}\text{C}$) FOR OCTOBER.
PERIOD 1951-1980.

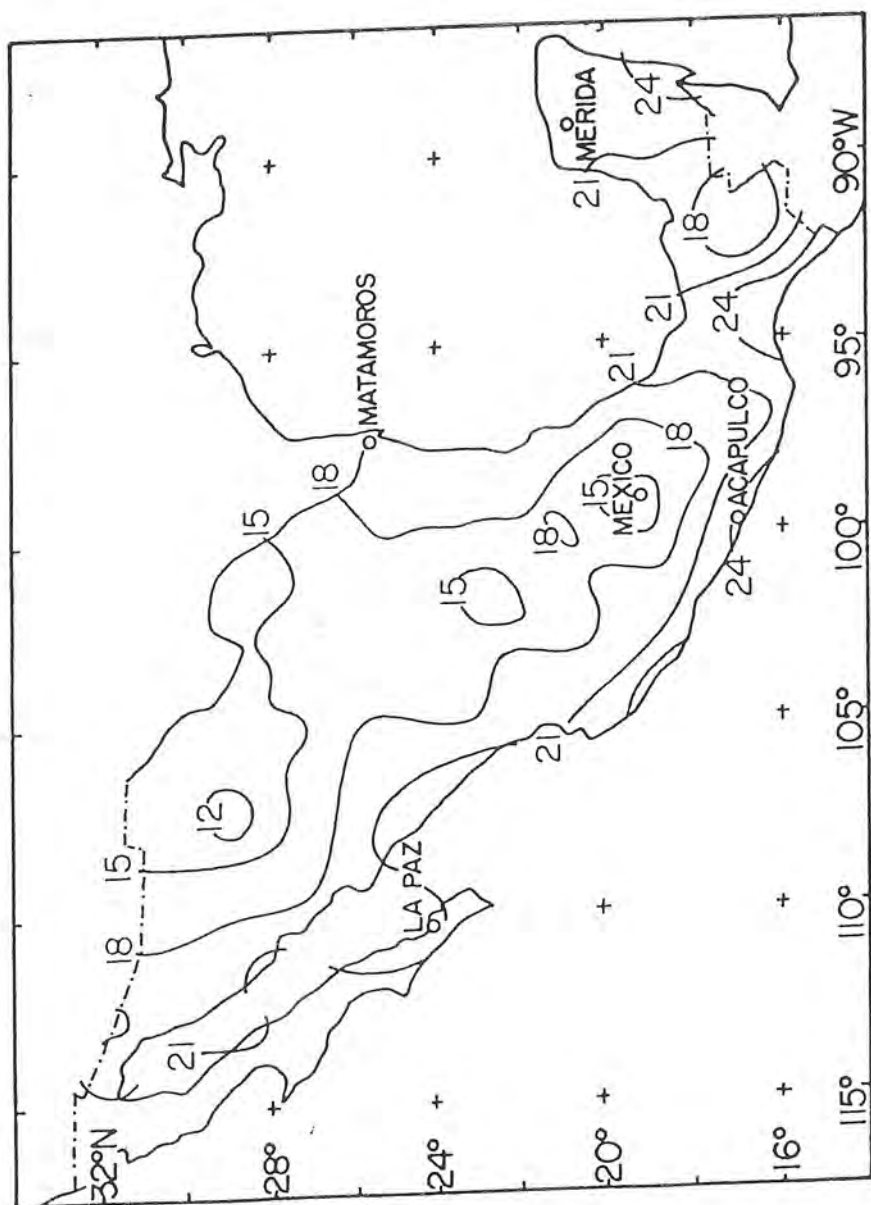


FIG. 9. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (°C) FOR A DOUBLING OF CO₂ IN JANUARY.

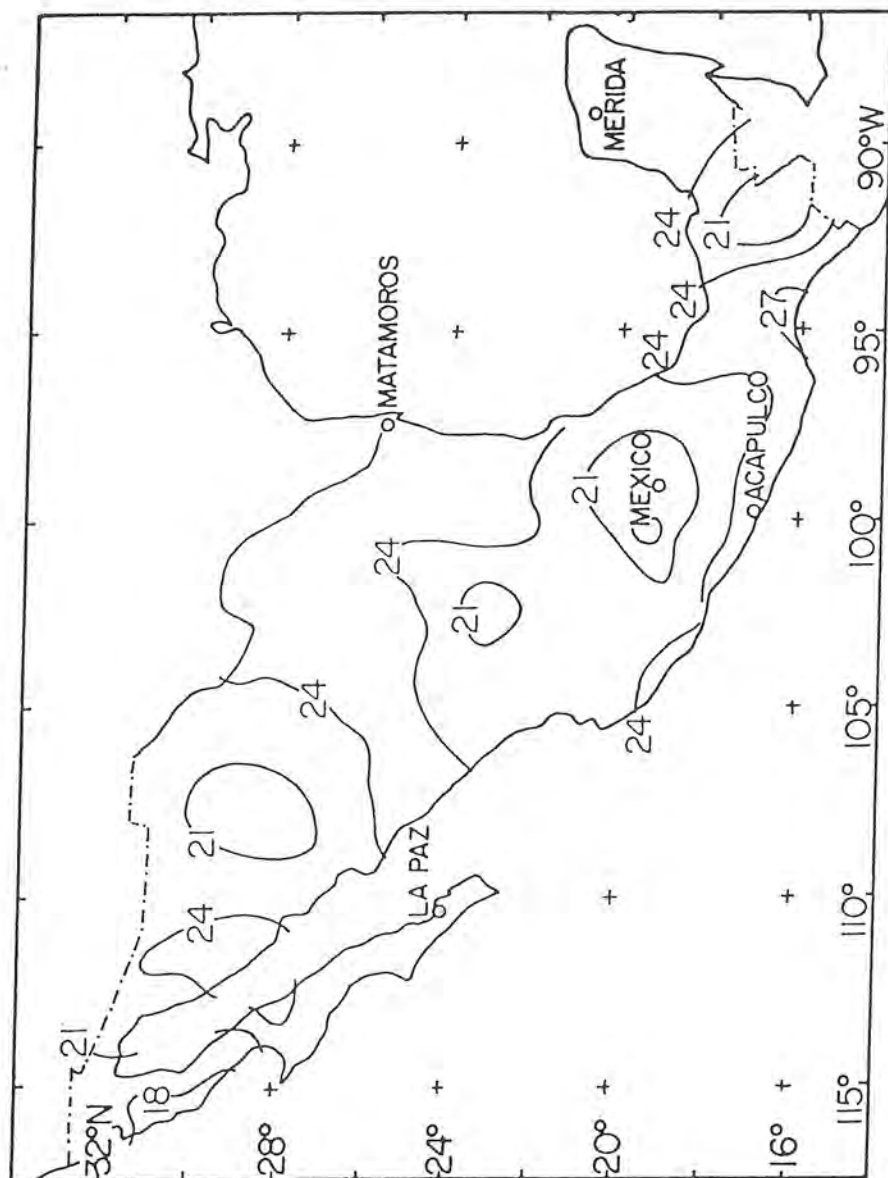


FIG. 10. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (°C) FOR A DOUBLING OF CO₂ IN APRIL.

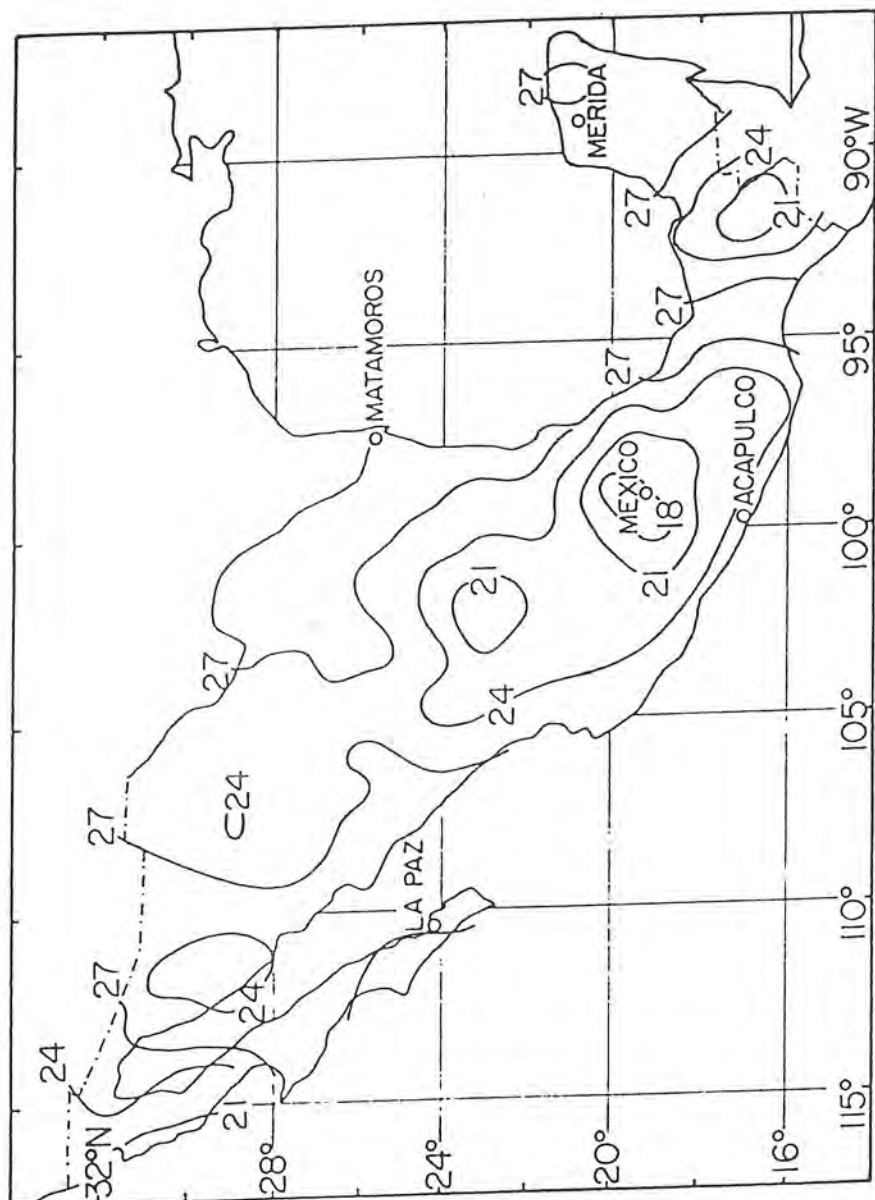


FIG. 11. EFFECTIVE TEMPERATURE DISTRIBUTION FOR A DOUBLING OF CO₂ IN JULY.

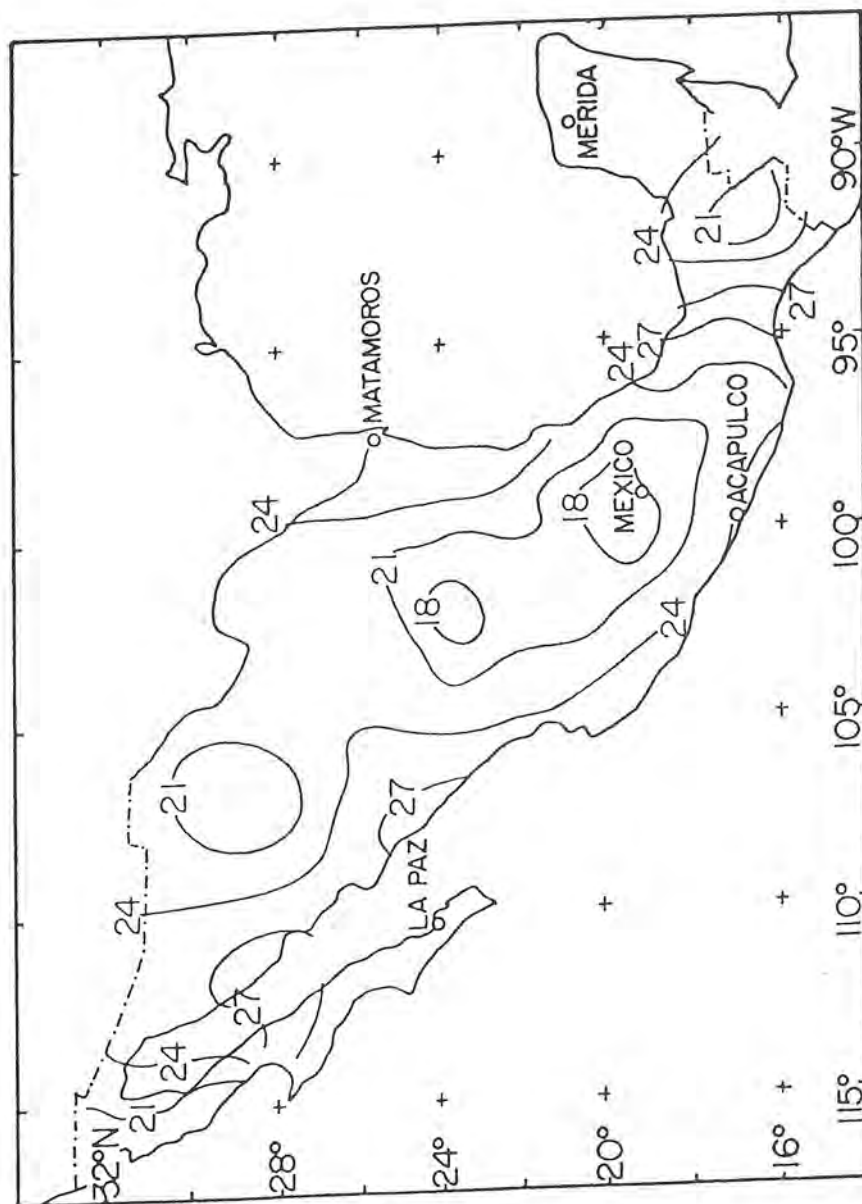


FIG. 12. MEAN EFFECTIVE TEMPERATURE (ET) ($^{\circ}\text{C}$) FOR A DOUBLING OF CO_2 IN OCTOBER.

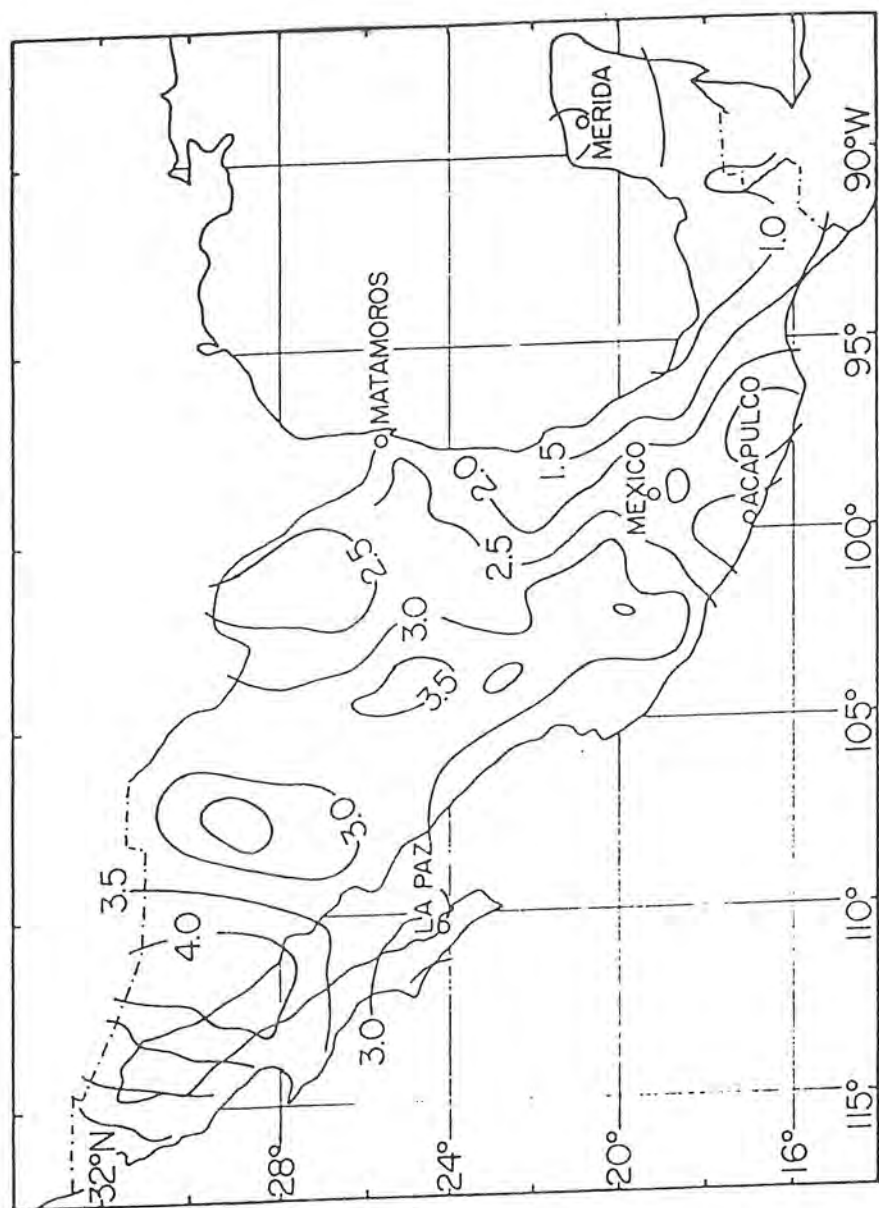


FIG.13. EFFECTIVE TEMPERATURE INCREASE WITH 2 x CO₂ - AVERAGE 1951-1980. FOR JANUARY.

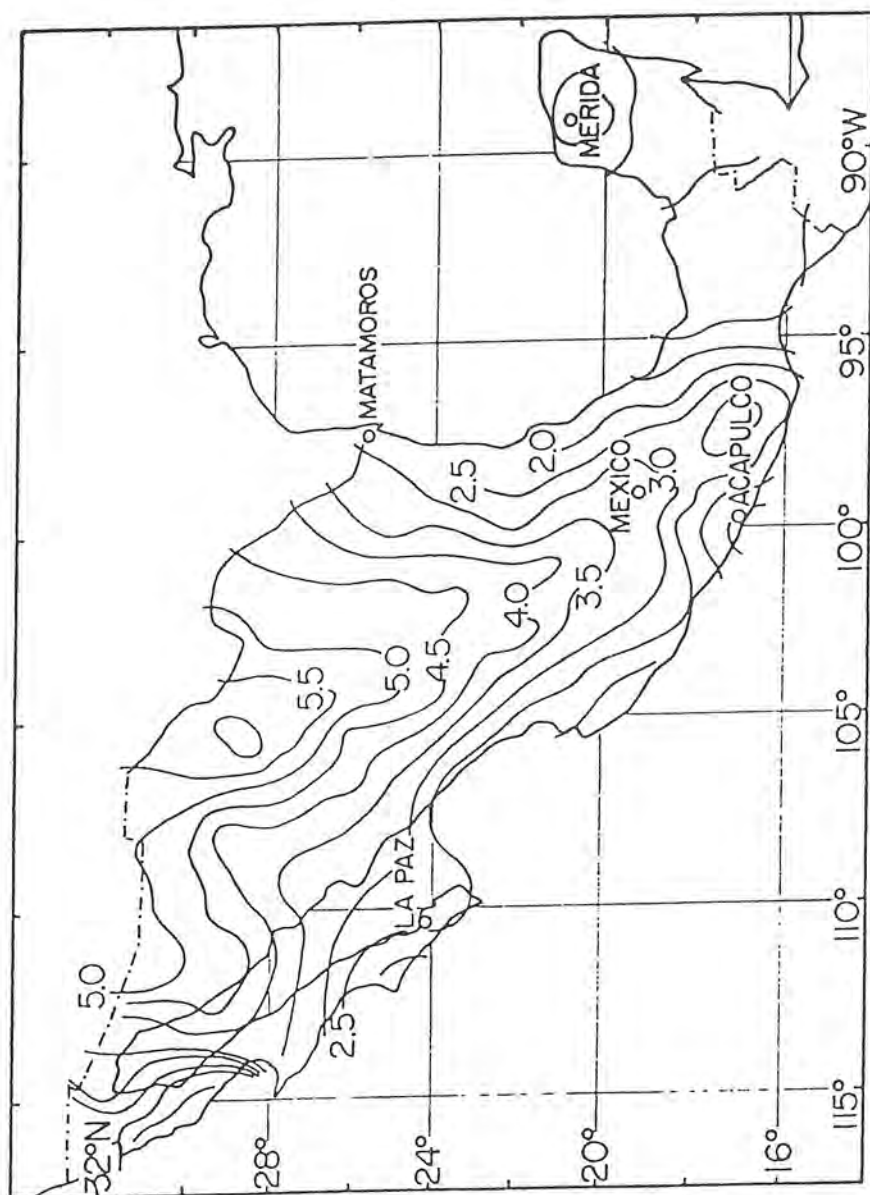


FIG. 14. INCREASES OF EFFECTIVE TEMPERATURE WITH DOUBLING OF CO₂ (2 CO₂ - AVERAGE 1951-1980). FOR APRIL.

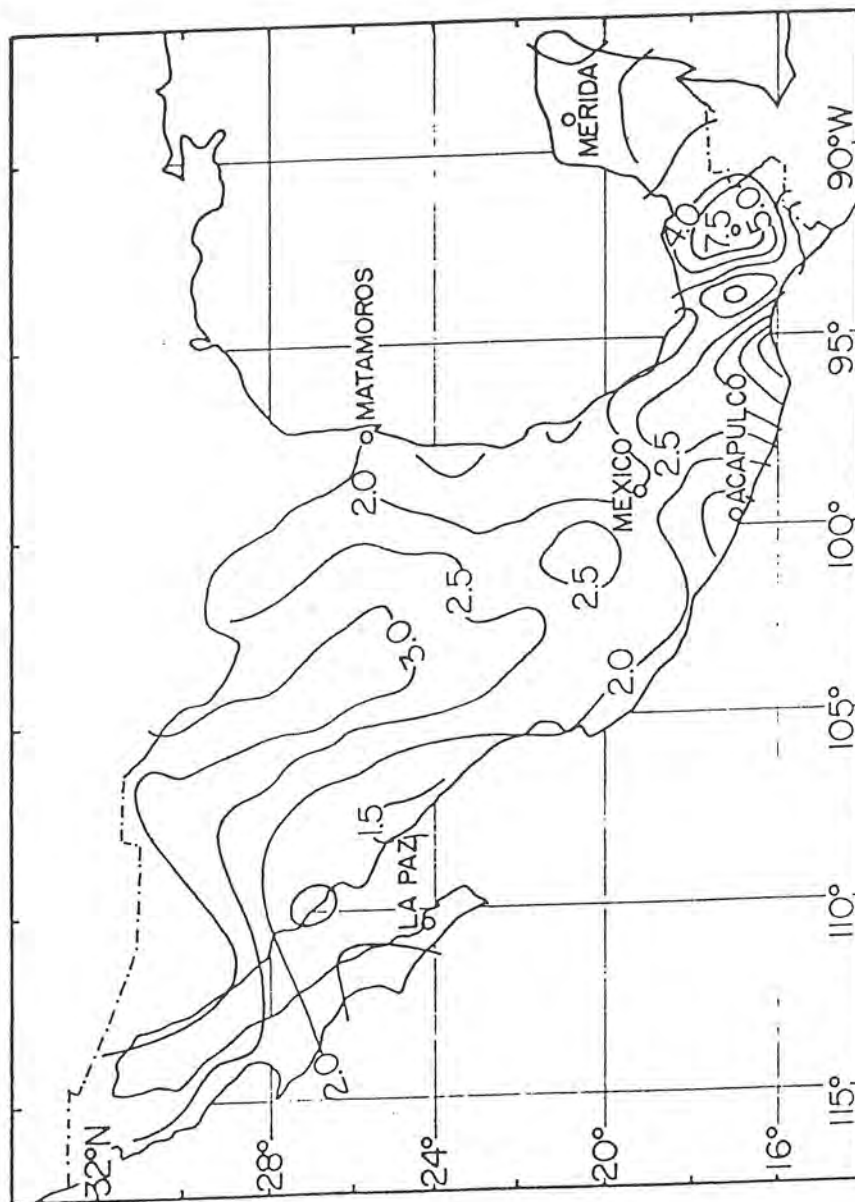


FIG. 15. INCREASES OF EFFECTIVE TEMPERATURE WITH DOUBLING OF CO₂ (2CO₂ - AVERAGE 1951-1980). FOR JULY.

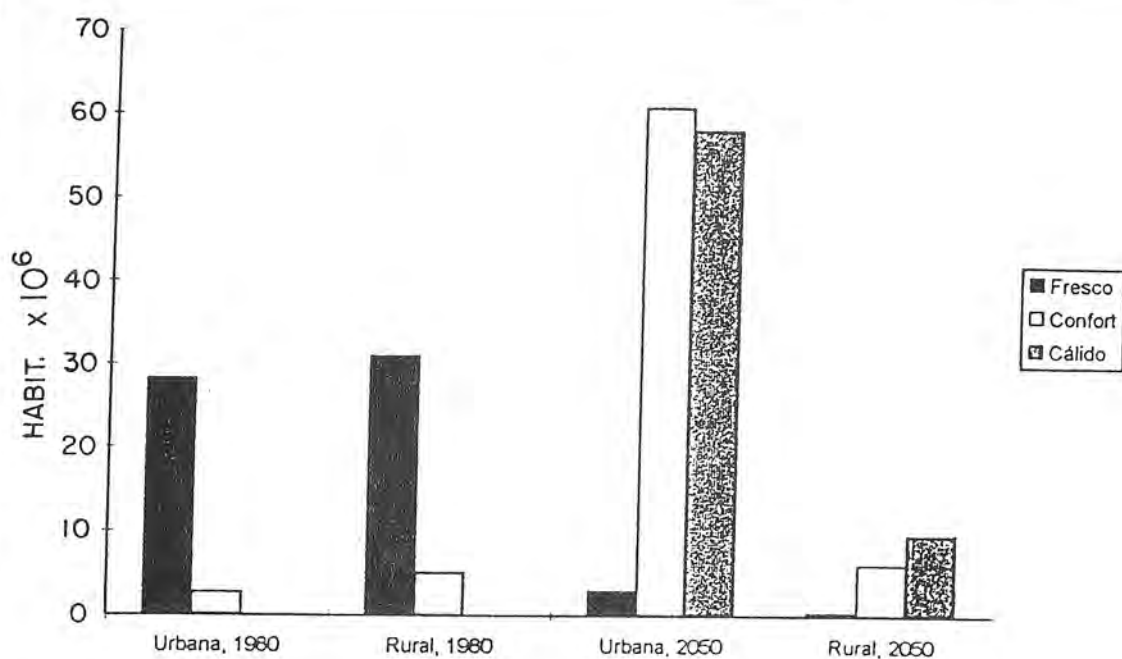


FIG. 16. POBLACION AFECTADA POR DISTINTOS GRADOS DE CONFORT EN MEXICO, ENERO

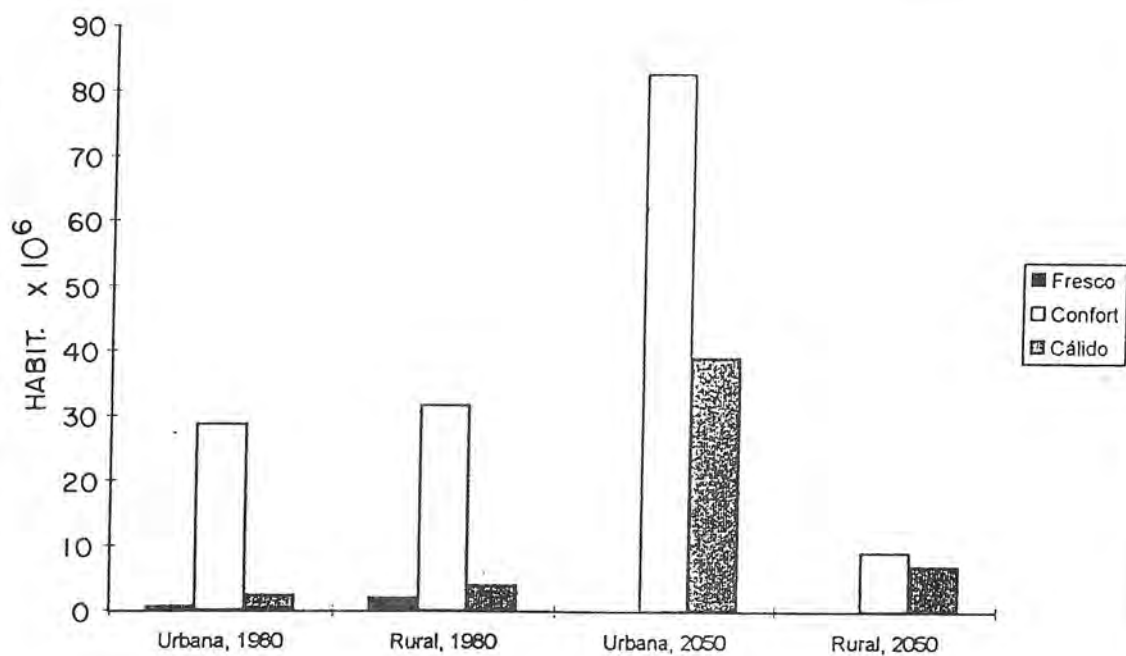


FIG. 17. POBLACION AFECTADA POR DISTINTOS GRADOS DE CONFORT EN MEXICO, ABRIL

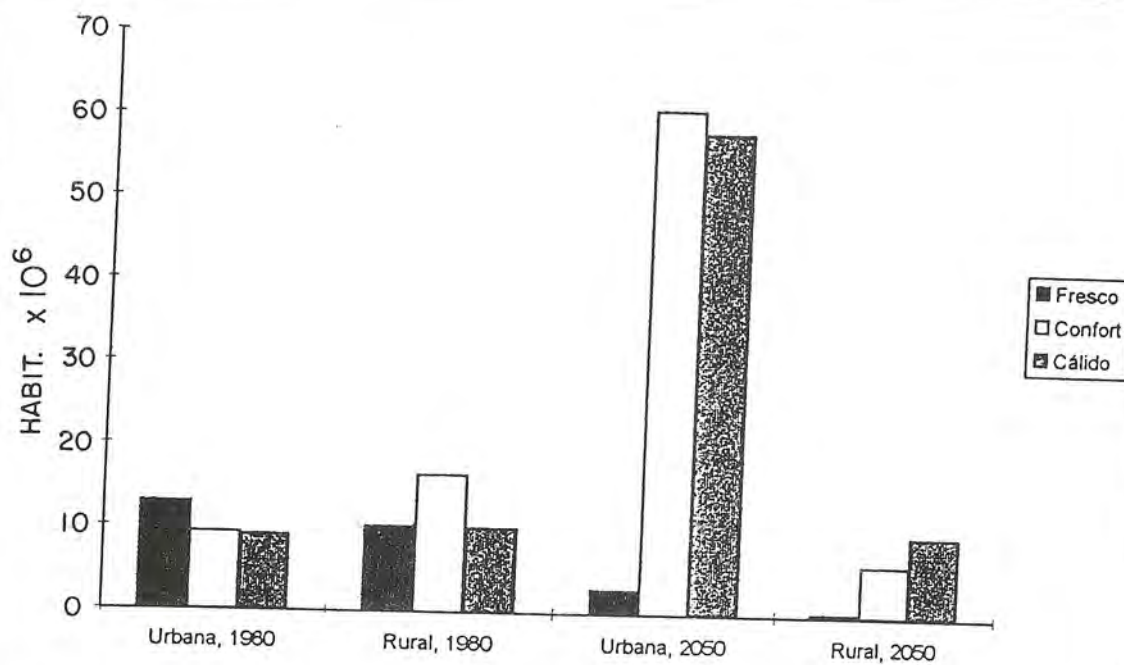


FIG. 18. POBLACION AFECTADA POR DISTINTOS GRADOS DE CONFORT EN MEXICO, JULIO

Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humanos en México

Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático

ADRIAN GUILLERMO AGUILAR

Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior CU, 04510, México, D. F., México

RESUMEN

En el evento de un cambio climático global, la vulnerabilidad de los asentamientos humanos estará en función de factores climáticos y no-climáticos. Estos últimos es posible que lleguen a dominar los efectos climáticos que se presenten.

En este trabajo se propone que las condiciones más importantes de vulnerabilidad de los asentamientos humanos, son los siguientes: (i) una alta concentración demográfica; (ii) un marcado proceso de industrialización; (iii) un rápido crecimiento del transporte vehicular; (iv) y una alta densidad de población en niveles de pobreza.

ABSTRACT

Climate change will occur against a background of other non-climate environmental factors and socioeconomic factors that could either exacerbate or mitigate the effects of climate change. Those non-climate factors may, in many cases, dominate climate change.

This paper proposes that the main conditions of vulnerability in human settlements are the following. (i) a high demographic concentration; (ii) an important industrialization process; (iii) a rapid growth of motor transport; (iv) and a high density of population in poverty levels.

Los asentamientos humanos y el cambio climático global

Los factores climáticos y no-climáticos

La vulnerabilidad de los asentamientos humanos, durante una fase de cambio climático global, estará en función de factores climáticos y no-climáticos. La combinación de estos dos tipos de factores pueden incrementar o mitigar los efectos de un cambio climático global sobre los centros de población.

Varios de los llamados factores no-climáticos es muy posible que sean los suficientemente importantes como para dominar los efectos climáticos que se puedan desencadenar; de cualquier manera, lo más probable es que ayuden a exacerbar los efectos climáticos. Los factores no-climáticos más importantes son: crecimiento demográfico, urbanización, industrialización, pobreza, cambio tecnológico y políticas gubernamentales (ver cuadro 1).

Por su parte, los factores climáticos que se registrarán si se cumplen las predicciones de los modelos del cambio climático, se refieren a aumentos en el nivel del mar, mayor precipitación, y clima más cálido en ciertas regiones continentales. Estos factores darán lugar a una serie de efectos tales como inundaciones en zonas costeras, más frecuentes islas de calor en asentamientos humanos y periodos de sequía (ver cuadro 1).

De manera indirecta los efectos climáticos pueden afectar seriamente a centros de población. Por ejemplo, es posible que existan cambios en el abastecimiento de agua; o que varíe la productividad agrícola por la alteración de las variables climáticas, lo que en consecuencia puede desencadenar movimientos migratorios de la población.

La enorme variedad de asentamientos humanos que existe en el país, y la complejidad de sus condiciones ambientales particulares, prácticamente nos señala que cualquier estimación de vulnerabilidad tendrá una aplicación muy local. Es decir, la importancia absoluta y relativa de todos los factores señalados, los no-climáticos y los climáticos, será muy diferente para las circunstancias particulares de cada asentamiento.

Aún así, es posible tratar de establecer algunas generalizaciones que nos conduzcan a inden-

CUADRO 1. EL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL Y LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS.
La influencia de factores climáticos y no-climáticos

FACTORES	EFFECTOS
<u>I. FACTORES NO CLIMATICOS</u>	
- Crecimiento de población y migración	Concentración social
- Urbanización	Concentración social
- Industrialización	Concentración económica
- Pobreza	Mayor población vulnerable
- Transporte	Expansión urbana y más emisiones
- Cambio tecnológico	Reducción de emisiones
- Política gubernamental	Controles contra el deterioro
<u>II. FACTORES CLIMÁTICOS</u>	
A. Cambios Climáticos Directos	
- Aumentos del nivel del mar	Inundaciones
- Mayor precipitación	Inundaciones
- Clima más caluroso	Islas de calor
B. Cambios Climáticos Indirectos	
	Cambios en abastecimiento de agua
	Variación en la productividad agrícola
	Migración de población
C. Eventos Extremos	
	Sequías
	Inundaciones extraordinarias
	Deslizamientos de tierra
	Ondas cálidas
	Episodios de contaminación atmosférica

tificar grandes áreas o regiones con características de vulnerabilidad. Es posible predecir de manera bastante confiable cuales regiones dentro de México son ya extremadamente vulnerables a cambios climáticos, básicamente porque estos espacios son sensibles a cualquier cambio o se ubican cerca de los límites de su capacidad para adaptarse a eventos climáticos extremos. Por ejemplo, estas zonas se pueden referir a: poblaciones en zonas costeras y en islas; poblaciones con agricultura de subsistencia; poblaciones en zonas semi-áridas; y población pobre en zonas urbanas

En esta misma línea de discusión, la premisa más importante es que: los asentamientos humanos más vulnerables al cambio climático se localizan en zonas que ya se encuentran bajo un fuerte presión ambiental, debido a un alto crecimiento demográfico, una rápida urbanización, o una marcada degradación del medio ambiente. Es decir, se trata de concentraciones sociales y/o económicas muy importantes, como las grandes zonas metropolitanas del país, y todos aquellos asentamientos urbanos ilegales, en zonas no aptas para la urbanización como llanuras de inundación o laderas montañosas.

II. Tendencias regionales en el crecimiento demográfico y la urbanización

Los asentamientos humanos los podemos definir como ciudades, pueblos, villas, o cualquier asentamiento o grupos de asentamientos rurales dispersos. Desde la perspectiva del cambio climático nos interesarán fundamentalmente las emisiones que se originan de actividades que se desarrollan dentro de los límites de estos asentamientos. Estas actividades tienen que ver con la habitación, el comercio, la manufactura, las acciones de gobierno, etc. A partir de las principales actividades que se desarrollan en los asentamientos humanos, es posible clasificar los principales tipos de emisiones a la atmósfera según las fuentes de emisión que las origina, con lo que resultan los siguientes grupos:

1. El sistema de transporte
2. Las unidades industriales
3. Producción y distribución de combustibles fósiles y electricidad
4. Disposición de desechos sólidos

El análisis de las tendencias en el crecimiento demográfico, la urbanización y el proceso de industrialización dan un panorama bastante preciso de donde se localizan las principales concentraciones sociales y económicas, por lo tanto, nos indican cual es la ubicación de la mayor parte de las fuentes emisoras; y en consecuencia, es posible determinar las zonas o regiones con mayor vulnerabilidad al cambio climático.

En este trabajo se presenta un análisis general de las más recientes tendencias en el crecimiento y distribución territorial de la población, por regiones dentro del espacio nacional. Se hace particular énfasis en las más importantes tendencias del proceso urbano, para tratar de enfatizar la localización de las mayores concentraciones sociales en México. En principio, se lleva a cabo un tratamiento de grandes regiones para el análisis de los datos; en una fase posterior se llevará a cabo un examen más puntual para determinar dentro de cada región donde se ubican las mayores concentraciones urbanas, de acuerdo a los enfoques que utilicen otras áreas de trabajo dentro del Estudio de País.

1. Tendencias regionales en el crecimiento de la población total, urbana y rural

En este apartado se presentan la principales tendencias en el crecimiento y distribución de la población, por regiones para el periodo 1970 y 1990. Se establecen las diferencias entre la población total, la población rural y la población urbana; y en los casos más sobresalientes, se destaca el comportamiento de la población metropolitana, o sea, aquella que se localiza en las

CUADRO 2. MÉXICO: CRECIMIENTO DE LA POBLACION TOTAL, URBANA Y RURAL POR REGIONES, 1970-1990.

REGIONES	1970		1990		diferencia porcentual 1970-1990	tasa de crecimiento
	POBLACION TOTAL	%	POBLACION TOTAL	%		
NACIONAL	48,225,238	100.0	81,249,645	100.0		2.6
POBLACION URBANA	24,070,473	49.9	49,366,131	60.8	10.8	3.7
POBLACION RURAL	24,154,765	50.1	31,883,514	39.2	-10.8	1.4
POBLACION METROPOLITANA	17,678,559	36.7	31,917,586	39.3	2.6	3.0
POBLACION NO METROPOLITANA	6,391,914	13.3	17,448,545	21.5	8.2	5.1
REGION NOROESTE	3,363,688	100.0	6,006,279	100.0		2.9
		7.0		7.4	0.4	
POBLACION URBANA	1,715,048	51.0	3,888,935	64.7	13.8	4.2
POBLACION RURAL	1,648,640	49.0	2,117,344	35.3	-13.8	1.3
POBLACION METROPOLITANA	120,944	3.6	175,109	2.9	-0.7	1.9
POBLACION NO METROPOLITANA	1,594,104	47.4	3,713,826	61.8	14.4	4.3
REGION NORTE	3,666,689	100.0	5,763,591	100.0		2.3
		7.6		7.1	-0.5	
POBLACION URBANA	2,009,420	54.8	4,071,188	70.6	15.8	3.6
POBLACION RURAL	1,657,269	45.2	1,692,403	29.4	-15.8	0.1
POBLACION METROPOLITANA	900,574	24.6	1,694,616	29.4	4.8	3.2
POBLACION NO METROPOLITANA	1,108,846	30.2	2,376,572	41.2	11.0	3.9
REGION NORESTE	3,151,547	100.0	5,348,317	100.0		2.7
		6.5		6.6	0.0	
POBLACION URBANA	2,253,913	71.5	4,465,551	83.5	12.0	3.5
POBLACION RURAL	897,634	28.5	882,766	16.5	-12.0	-0.1
POBLACION METROPOLITANA	1,575,937	50.0	3,121,253	58.4	8.4	3.5
POBLACION NO METROPOLITANA	677,976	21.5	1,344,298	25.1	3.6	3.5
REGION CENTRO-NORTE	5,327,493	100.0	9,032,997	100.0		2.7
		11.0		11.1	0.1	
POBLACION URBANA	2,178,535	40.9	5,055,457	56.0	15.1	4.3
POBLACION RURAL	3,148,958	59.1	3,977,540	44.0	-15.1	1.2
POBLACION METROPOLITANA	1,559,518	29.3	3,158,740	35.0	5.7	3.6
POBLACION NO METROPOLITANA	619,017	11.6	1,896,717	21.0	9.4	5.8
REGION OCCIDENTE	6,405,996	100.0	10,104,041	100.0		2.3
		13.3		12.4	-0.8	
POBLACION URBANA	2,662,849	41.6	5,764,889	57.1	15.5	3.9
POBLACION RURAL	3,743,147	58.4	4,339,152	42.9	-15.5	0.7
POBLACION METROPOLITANA	1,685,953	26.3	3,248,490	32.2	5.8	3.3
POBLACION NO METROPOLITANA	976,896	15.2	2,516,399	24.9	9.7	4.8
REGION CENTRO	15,446,178	100.0	26,022,342	100.0		2.6
		32.0		32.0	-0.0	
POBLACION URBANA	10,680,257	69.1	19,259,993	74.0	4.9	3.0
POBLACION RURAL	4,765,921	30.9	6,762,349	26.0	-4.9	1.8
POBLACION METROPOLITANA	10,339,295	66.9	17,698,868	68.0	1.1	2.7
POBLACION NO METROPOLITANA	340,962	2.2	1,561,125	6.0	3.8	7.9
REGION GOLFO	4,583,749	100.0	7,729,983	100.0		2.6
		9.5		9.5	0.0	
POBLACION URBANA	1,449,498	31.6	3,201,235	41.4	9.8	4.0
POBLACION RURAL	3,134,251	68.4	4,528,748	58.6	-9.8	1.9
POBLACION METROPOLITANA	1,112,263	24.3	1,980,132	25.6	1.4	2.9
POBLACION NO METROPOLITANA	337,235	7.4	1,221,103	15.8	8.4	6.6
REGION PACIFICO SUR	5,181,837	100.0	8,850,693	100.0		2.7
		13.7		25.9	12.2	6.0
POBLACION URBANA	711,447	13.7	2,294,620	25.9	12.2	6.0
POBLACION RURAL	4,470,390	86.3	6,556,073	74.1	-12.2	1.9
POBLACION METROPOLITANA	120,759	2.3	245,753	2.8	0.4	3.6
POBLACION NO METROPOLITANA	590,688	11.4	2,048,867	23.1	11.8	6.4
REGION PENINSULA DE YUCATAN	1,098,061	100.0	2,391,402	100.0		4.0
		2.3		2.9	0.7	
POBLACION URBANA	409,506	37.3	1,364,263	57.0	19.8	6.2
POBLACION RURAL	688,555	62.7	1,027,139	43.0	-19.8	2.0
POBLACION METROPOLITANA	263,316	24.0	594,625	24.9	0.9	4.2
POBLACION NO METROPOLITANA	146,190	13.3	769,638	32.2	18.9	8.7

Fuente: Cálculos propios con datos de los censos de población correspondientes.

ciudades grandes denominadas zonas metropolitanas.

1.1 Población Total

En el período bajo análisis la población total del país paso de 48 millones de personas a 81 millones de habitantes. Este crecimiento se dio a una tasa promedio anual de 2.6 por ciento, y significó un incremento porcentual de cerca del 70%.

En términos regionales este crecimiento se comportó de la siguiente manera. Prácticamente todas las regiones crecieron al mismo ritmo que la población total del país, entre 2.6 y 2.9%; a excepción de la región Península de Yucatán que incrementó su población a un ritmo mucho mayor, con una tasa del 4.0%. En lo que toca, al porcentaje de población que cada región contiene respecto del total nacional, tampoco hubo un cambio significativo; ninguna de ellas modificó en más de un punto porcentual su participación de dicha población. Por ejemplo, el más alto incremento se dió en la región de la Península de Yucatán al pasar de 2.3% en 1970 a 2.9% en 1990.

Si examinamos únicamente los números absolutos de población, se destaca que, las regiones más pobladas son: la región Centro con el 32% de la población nacional; la región Occidente con el 12%; y la región Centro-Norte con el 11%. En el otro extremo, la zona menos poblada es la región Península de Yucatán con sólo el 3% de la población total.

En resumen, la población presenta una marcada tendencia al incremento, que es más notoria en toda la franja central del país donde se ubica la mayor concentración social del país. A pesar de que, regiones con bajas concentraciones registran muy altos crecimientos como la Península de Yucatán.

1.2. Población Rural

Los datos muestran que en las últimas dos décadas la población rural ha mantenido una tendencia hacia su disminución. Mientras que en 1970 esta población representaba el 50% del total, para 1990 su porcentaje bajó al 39%. En dicho período su crecimiento fue muy lento, a una tasa del uno por ciento. Esto significa que el país adquiere cada vez más un perfil urbano.

De hecho, en todas las regiones del país la población rural perdió peso relativo al disminuir su participación en varios puntos porcentuales. Por ejemplo, en las regiones Norte, Centro-Norte y Occidente, esta población disminuyó en mas de 15 puntos porcentuales, y en la Península de Yucatán lo hizo en 20 puntos.

Las mayores concentraciones de población rural se localizan en las regiones Centro-Norte, Occidente, Centro, Golfo y Pacífico Sur. En estas regiones esta población representa de 4.0 a 6.5 millones de habitantes en cada región y en las últimas dos regiones tiene un predominio con porcentajes arriba del 60%.

Una vez más, estos datos nos señalan mayores concentraciones y densidades de esta población en la franja central del país; a pesar de que muestra una clara tendencia a la disminución.

1.3 Población Urbana

Esta categoría de población fue la que registró los más altos incrementos en el período 1970-1990. En estas dos décadas, la población urbana se duplicó en números absolutos e incrementó su porcentaje del 50% en 1970, al 61% veinte años después, creciendo a una tasa de casi el 4%.

En todas las regiones la población urbana creció de manera acelerada de acuerdo al promedio nacional; particularmente las regiones Pacífico Sur y Península de Yucatán se destacan porque crecieron por arriba de la media nacional, con tasas del 6%; sin embargo, son las regiones

CUADRO 3. DISTRIBUCION DE MUNICIPIOS POR REGION, SEGUN GRADO DE MARGINACION, 1993.

REGIONES	MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA	TOTAL
TOTAL	132	656	462	812	341	2403
%	5.5	27.3	19.2	33.8	14.2	100.0
NOROESTE	21	63	9	3	0	96
	21.9	65.6	9.4	3.1	0	100.0
NORTE	19	73	27	18	7	144
	13.2	50.7	18.8	12.5	4.9	100.0
NORESTE	20	43	15	16	0	94
	21.3	45.7	16.0	17.0	0.0	100.0
CENTRO NORTE	6	56	57	58	8	185
	3.2	30.3	30.8	31.4	4.3	100.0
OCCIDENTE	12	153	64	35	3	267
	4.5	57.3	24.0	13.1	1.1	100.0
CENTRO	40	152	106	169	48	515
	7.8	29.5	20.6	32.8	9.3	100.0
GOLFO	8	35	50	90	41	224
	3.6	15.6	22.3	40.2	18.3	100.0
PACIFICO SUR	4	65	103	352	232	756
	0.5	8.6	13.6	46.6	30.7	100.0
PENINSULA DE YUCATAN	2	16	31	71	2	122
	1.6	13.1	25.4	58.2	1.6	100.0

FUENTE: Elaborado con datos de: Consejo Nacional de Población y Comisión Nacional del Agua, (1993).

que concentran la más baja proporción de población urbana, 2.3 y 1.3 millones de habitantes respectivamente.

La mayor concentración de población se encuentra precisamente en la región Centro donde se localiza la Ciudad de México, y varias otras ciudades grandes, como Puebla. En esta región los habitantes urbanos eran casi 20 millones de personas en 1990, representando el 74 por ciento de la población al interior de la región. Es importante enfatizar, que de esa población urbana, 17.7 millones de personas vivían en zonas metropolitanas, de aquí la importancia de las grandes ciudades en esta porción de territorio.

En segundo término, sobresalen las concentraciones urbanas de las regiones Occidente y Centro-Norte con 5.7 y 5 millones de habitantes respectivamente. En ambas regiones la población urbana es mayoritaria con respecto al total, con aproximadamente el 57% de toda la población.

En todas las regiones del norte del país, aunque en números absolutos la población urbana es menor a la de las regiones antes señaladas, la población urbana representa porcentajes mayores al interior de cada región. Es decir, se trata de regiones "más urbanas" que las del resto del país.

En esencia, las regiones Centro, Occidente y Centro-Norte, concentran el 61% de toda la población urbana del país; y el 76% de la población de zonas metropolitanas existentes en México.

1.4 Niveles de Pobreza por Regiones

Para tener un indicador de niveles de pobreza, en el cuadro 3 se utiliza el grado de marginación de los municipios del país, a nivel región (ver Consejo Nacional de Población y Comisión Nacional del Agua, 1993). Si consideramos en primer término aquellos municipios con un grado alto y muy alto de marginación, la mayor concentración de pobreza está en la Región Pacífico Sur con el 77% de todos los municipios que representan un total de 584 unidades político-administrativas (ver cuadro 3)

En segundo término sobresalen una alta y muy alta marginación en la Región Golfo con el 59% de los municipios que representan un total de 131 unidades municipales; y en tercer lugar la Región Centro con un 42% de municipios con altos niveles de pobreza, que incluye a 217 unidades municipales. Es decir, en estas tres regiones que abarcan las porciones centrales y sur del territorio nacional, los niveles de pobreza seguramente incrementarán la vulnerabilidad de los asentamientos a cualquier modificación climática.

En el otro extremo, los mayores porcentajes de municipios con muy bajo y bajo grado de marginación se localizan en toda la porción Norte del País. Por ejemplo, la región Noroeste tiene el 88% de los municipios en estos niveles, lo cual corresponde a 84 municipios dentro de este espacio regional. Sobresale también por el número absoluto de los municipios, un total de 165, que representa el 62 por ciento del total de unidades municipales.

III. Condiciones de vulnerabilidad de los asentamientos humanos

Indudablemente que la tarea más importante es la de definir cuales asentamientos humanos, o cuales grupos de ellos, en términos de regiones son más vulnerables a un cambio climático global. Para avanzar en esta tarea es necesario hacer varias consideraciones que ayudarán a definir una metodología.

Comó podemos definir ¿cuál es un medio social vulnerable?. Ante todo, probablemente la condición más clara es la que implica una alta concentración demográfica la cual generalmente está asociada a una marcada concentración económica, y por lo tanto la encontramos en las ciudades más grandes del país. El ejemplo más claro es el de las ciudades mayores a 500 mil

habitantes, la mayoría de las cuales tienen altas tasas de crecimiento, reciben gruesos contingentes de migrantes, y tienden a concentrar un mayor número de población pobre en sus áreas urbanas centrales y periféricas. Asimismo la región Centro del país es un ejemplo claro de una alta concentración demográfica.

Adicionalmente se puede señalar que, las grandes concentraciones urbanas experimentarán mayores dificultades de carácter ambiental por su magnitud y la demanda que generan: de continuar su crecimiento registrarán mayores niveles de contaminación atmosférica por su mayor número de industrias y unidades de transporte vehicular; asimismo requerirá de mayor abastecimiento de agua y de productos alimenticios.

De acuerdo a lo que se señalaba al inicio de este trabajo existen otros factores no-climáticos que representan condiciones de vulnerabilidad. Uno de ellos es la industrialización, este proceso esta fuertemente vinculado al desarrollo urbano y su localización debe tener una amplia coincidencia con la localización de las grandes ciudades. De cualquier manera, este tema está tratado en otra área del Estudio de País, por lo que, aquí no se examina.

También podemos señalar a la evolución del transporte vehicular urbano como otro factor que contribuye a la vulnerabilidad. También en este caso, es lógico esperar que, el incremento de vehículos y su mayor número se encontrará en los grandes asentamientos urbanos. Estos cálculos estadísticos si es posible llevarlos a cabo, y se dejan para una etapa posterior de comprobación.

Finalmente, una última condición de vulnerabilidad a la que es necesario referirse es el nivel de pobreza, presente en los diferentes asentamientos de población. Ante todo hay que diferenciar dos grandes categorías de población pobre: aquella que radica en las principales ciudades; y la que se localiza en asentamientos rurales y regiones con bajas densidades de población. Los de la primera categoría seguramente representan una mayor cantidad en números absolutos, y evidentemente son los habitantes más vulnerables dentro de los centros urbanos pues se asocian a los asentamientos urbanos en condiciones más precarias. Los de la segunda categoría, están vinculados a zonas de agricultura de subsistencia, en áreas de temporal y semi-áridas, y también nos señalan poblaciones altamente vulnerables. Tal es el caso de la región Pacífico Sur.

En ambos casos se deberán elaborar cálculos más precisos de la población total en condiciones de pobreza, junto a otras medidas de densidad de población para delimitar más claramente la vulnerabilidad de estas áreas.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, A. G., 1995. El Cambio Climático Global y la Vulnerabilidad de Asentamientos Humanos, *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México "México Ante el Cambio Climático"*, pp 203-211.
- Aguilar, A. G. y F. Rodríguez, 1994/95. The Dispersal of Urban Growth in Mexico, 1970-1990, *Regional Development Studies*, Journal of the United Nations Center for Regional Development, Vol. 1, pp 1-26.
- Consejo Nacional de Población y Comisión Nacional del Agua (1993) *Indicadores Socioeconómicos e Índices de Marginación Municipal 1990*, CONAPO y Comisión Nacional del Agua, México.
- Járegui, E., 1995. El Cambio Global del Clima y Posibles Efectos en las Necesidades de Enfriamiento de Locales en México, *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México "México Ante el Cambio Climático"*, pp 61-67.

México ante el cambio
climático (Memorias II)

se terminó de imprimir
en enero de 1996
en los talleres de

impretei

Almería 17, Col. Postal
C.P. 03410, México, D.F.

Se imprimieron 300 ejemplares
más sobrantes para reposición.