

* Doctor en Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota y Toma de Decisiones Ambientales por el Instituto de Geografía de la UNAM. Especialista en Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota aplicados a la Agricultura por el Instituto Tecnológico de Kanazawa, Japón. Es investigador en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias desde 1981. Ha escrito artículos sobre las temáticas mencionadas en revistas nacionales y extranjeras. Correo-e: cebalex@hotmail.com

** Doctor en Geografía por la UNAM. Investigador en el Instituto de Geografía de la misma institución. Ha realizado estudios postdoctorales en la University of Washington (EUA) y en el Instituto de Geografía. Correo - e: jlblanco@servidor.unam.mx

TOMA DE DECISIONES EN PLANEACIÓN TERRITORIAL: EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS ADECUADAS PARA CULTIVOS EN EL DDR TOLUCA

DR. ALEJANDRO CEBALLOS SILVA*

DR. JORGE LÓPEZ BLANCO**

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de cualquier sociedad, ya sea a nivel de comunidades civiles o corporaciones privadas, requiere de decisiones individuales o colectivas dentro de un conjunto de parámetros, objetivos y restricciones. La toma de decisiones pueden ser descrita como el proceso de elección de uno o más cursos de acción, basada en múltiples criterios, de modo tal que sean consistentes con metas y objetivos implícitos o explícitos [Thill, 1999].

En este contexto, la planeación del uso del suelo se ha vuelto un proceso muy complejo, ya que el principio del desarrollo sustentable exige enfrentarse a la paradoja de cumplir con dos objetivos aparentemente contradictorios: la conservación de los recursos naturales y el desarrollo económico. Entonces, hay que diseñar proyectos y planes que mantengan aceptablemente el equilibrio ecológico, pero que contribuyan al desarrollo económico y además satisfagan las necesidades de diversos grupos sociales [Van Lier, 1998].

Los progresos en diferentes disciplinas como las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), pueden ayudar, a quien toma decisiones en planeación, a manejar la problemática antes planteada [Joerin, *et al.*, 2001].

In this work, it is considered that the natural system evaluation for agricultural activities can be carried out by selecting only those relevant variables of the biophysical environment, using the expert knowledge to delineate suitable areas for crop production. In this way, MultiCriteria Evaluation (MCE) was used to identify suitable areas for maize, potato and prickly pear in The Rural Development District (RDD) of Toluca, Mexico. It was found that MCE approach was useful in the delineation of suitable areas for crops using only relevant variables of the biophysical environment. These variables were considered as criteria set in this evaluation. In the maize case we found a 93,676 ha area with a Very Good and Good suitability level and with an actual agricultural use. However this area is lesser than the current sowed area with this crop. Regarding to the potato crop it was found that 13,823 ha of present agricultural area, has a Very Good suitability level, although the area sowed with this crop is greatly minor. As for the prickly pear crop we found that 3,031 ha of actual degraded soils were located with a Very Good and Good suitability level. This area is not suitable for other crops, so this represents an opportunity for that crop. In this work, we obtained valuable information to decision makers in order to improve land use planning in the RDD of Toluca.

Key words: Optimal areas for agricultural activities, Multicriteria Evaluation (MCE), soil use planning.

La toma de decisiones multicriterio se puede entender como un conjunto de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos para auxiliar a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas, con base en una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) [Barredo, 1996]. El fin básico de las técnicas de EMC es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto [Voodg, 1983]. Para hacer esto posible es necesario generar alternativas y calificarlas de acuerdo a su importancia [Janssen and Rietveld, 1990]. Un aspecto crítico del análisis multicriterio espacial es que involucra la evaluación de eventos geo-

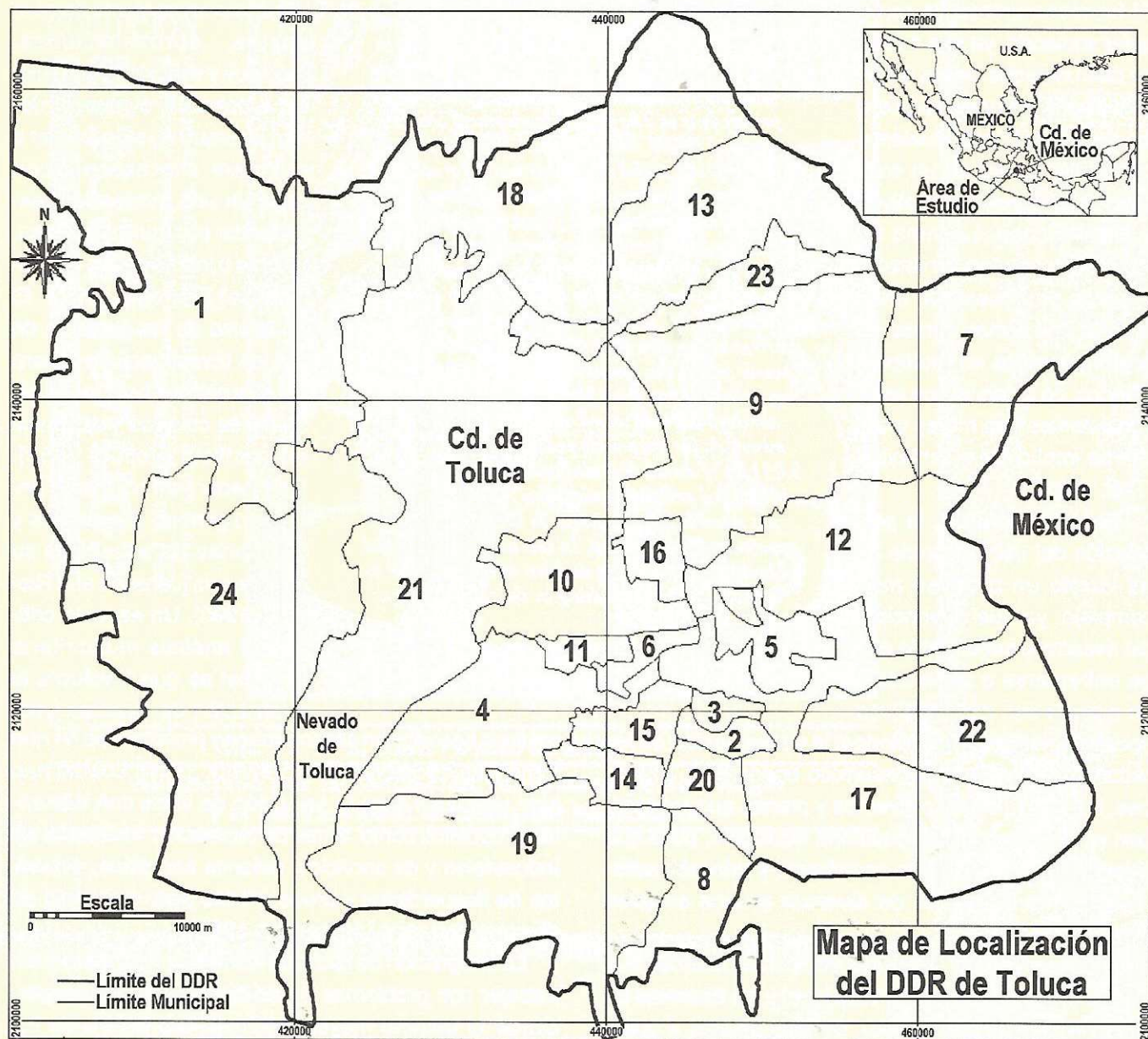
gráficos basados en calificaciones y preferencias de que toman las decisiones [Malczewsky, 1999]. Los SIG han sido utilizados para la selección de sitios con diferentes propósitos como: áreas de recreación, instalaciones industriales y de servicios, rellenos sanitarios, depósitos de desperdicios y áreas críticas para el manejo de diversos recursos [Jankowski, 1995].

La integración de técnicas analíticas diseñadas para trabajar con problemas de multicriterio puede proporcionar al usuario mayor funcionalidad dentro de las herramientas de los SIG [Carver, 1991]. Los SIG son muy útiles para el almacenamiento, proceso y manejo de

base de datos espaciales [Aronnof, 1989], de tal manera que la integración de la EMC-SIG puede ayudar a los usuarios a mejorar el proceso de toma de decisiones [Carver, 1991]. Además, esta integración puede ser útil para resolver situaciones de conflictos para individuos o grupos interesados [Malczewsky 1996] sobre todo en el contexto espacial [Janssen y Rietved, 1990].

Por otra parte, la estimación del uso potencial del suelo con fines agrícolas está determinada por la evaluación del clima, suelo, relieve y la identificación de las limitantes del medio físico. Dicha estimación está siendo cada vez más reconocida como parte esencial de la planeación del uso del suelo y del desarrollo de la agricultura [Ngowi y Stocking, 1989]. Además,

FIGURA 1
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DDR TOLUCA, MÉXICO.



La lista de municipios es : 1=Almoloya de Juárez, 2=Almoloya del Río, 3=Atizapan, 4=Calimaya, 5=Capulhuac, 6=Chapultepec, 7=Huixquilucan, 8=Joquicingo, 9=Lerma, 10=Metepec, 11=Mexicalcingo, 12=Ocoyoacac, 13=Otzolotepec, 14=Rayón, 15=San Antonio la Isla, 16=San Mateo Atenco, 17=Santiago Tianguistenco, 18=Temoaya, 19=Tenango del Valle, 20=Texcalyacac, 21=Toluca, 23=Xonacatlan, 24=Zinacantepec.

la identificación y la caracterización precisa de las áreas de producción actuales y potenciales, son vitales para la investigación y el desarrollo agrícola, debido a su enorme efecto en la transferencia de las innovaciones agro-tecnológicas [Corbett, 1996].

En muchos países, incluyendo México, las áreas agrícolas están siendo usadas con una intensidad creciente para cumplir con las necesidades de alimentos de la población que está en constante crecimiento. Las altas demandas de alimento requieren de la optimización en el uso de los recursos naturales disponibles [Kutter, et al., 1997]. La agricultura es una de las actividades de explotación del sistema natural más importantes; y debe ajustarse a las áreas aptas para esta actividad [García, et al., 2000].

Este trabajo se inició con la premisa de que la valoración del sistema natural para las actividades agrícolas puede hacerse seleccionando sólo aquellas variables relevantes del medio biológico, utilizando, para ello, el conocimiento experto en la definición de las áreas adecuadas para la producción de cultivos.

Para lograr lo anterior se utilizó la EMC pues permite jerarquizar las variables consideradas de acuerdo a su importancia en la evaluación realizada; la identificación de las áreas adecuadas para maíz, papa y nopal en el ámbito del Distrito de Desarrollo Rural (DDR), Toluca, México (Figura 1).

En este trabajo se pretende obtener información útil para los que toman decisiones en la planeación del uso de suelo y para los propios productores, de tal manera que la actividad agrícola se lleve a cabo en los lugares adecuados, ayudando con esto a reducir, en lo posible, el deterioro del sistema natural y cumplir con la producción de alimentos para la sociedad, lo cual es el propósito fundamental de la agricultura como actividad económica.

En el DDR Toluca, el cultivo de maíz es el más importante, ya que para el año 2000, se sembraron 118,305 ha, en la modalidad de temporal, que representa el 38.9% de la superficie total del DDR, con una producción de 406,883 ton [SAGARPA, 2000], esto es el 23.7% de la producción estatal.

Este cultivo forma parte importante en la dieta de gran parte de la población, no sólo del Estado de México, sino del resto del país.

Otro cultivo de gran importancia y tradición en el DDR Toluca es el de la papa, cuya superficie sembrada en el ciclo Primavera-Verano de 2000, fue de 2,092 ha, de las cuales 1,950 ha fueron sembradas en temporal y 142 ha en condiciones de riego. El total de la producción fue 42,917.6 ton, con un rendimiento *medio* de 20.5 ton/ha y un valor de la producción de \$98,710,480 [SAGARPA, 2000]. Esto habla de la importancia económica de este cultivo en el área de estudio.

De acuerdo con SAGAR [1998], en el DDR Toluca existen más de 8,000 ha con problemas de erosión, las cuales representan más de cuatro veces la superficie actual sembrada de papa y son áreas que pudieran incorporarse a la actividad productiva, aunque seguramente no aplicando una estrategia de explotación intensiva y de alta tecnología. Por lo anterior, en este trabajo se va a explorar el potencial de adaptación del nopal como un cultivo de alternativa, sobre todo en aquellas áreas con condiciones extremas o limitantes para otros cultivos. En el DDR Toluca no se han reportado oficialmente plantaciones de este cultivo por parte de la SAGARPA, sin embargo en esta área existen plantaciones con esta cactácea en condiciones de traspatio, como límites parcelarios o a las orillas de caminos.

1. ÁREA DE ESTUDIO

Dentro del ámbito del Estado de México una de las zonas con mayor importancia dentro de la actividad agrícola es el DDR Toluca. De acuerdo con SAGAR [1998] tiene una extensión de: 302,603 ha, de las cuales 153,167 ha (50.6%) son de agricultura de temporal (incluyendo las áreas de producción de forraje), 81,124 ha (26.8%) son de uso forestal, 8,530 ha (2.8%) corresponden a áreas erosionadas y 15,268 ha (5.0%) de zonas urbanas (incluyendo uso industrial).

El área de estudio se localiza entre los paralelos geográficos 19°01' N y 19°31' N y entre los meridianos 99°15' O y 99°57' O. Desde

el punto de vista geomorfológico el área es una depresión tectónica alargada (en dirección Norte-Sur), cubierta con sedimentos lacustres y aluviales. Esta depresión está limitada por una serie de fallas tectónicas regionales que están expresadas como eventos volcánicos masivos del Pleistoceno temprano. El área es una planicie lacustre-aluvial con pendientes suaves, localizada en la parte alta de la cuenca del Río Lerma. En la porción Sur del área de estudio se localiza el Volcán Nevado de Toluca, el cual es uno de los estratovolcanes más prominentes (4,640 msnm) de la Faja Volcánica Transmexicana en el centro de México.

El DDR Toluca está dominado por tres tipos climáticos: 1) templado sub-húmedo, 2) templado semi-frío y sub-húmedo y 3) frío (con temperatura media anual entre -2 y 5°C) [IIIGEC, 1993]. El rango de altitud varía entre 1800 y 4,640 msnm. La vegetación natural es predominantemente de bosque de pino, bosques mixtos (pino-encino) y bosque de *Abies*. Los bosques están mezclados con áreas de pastizal inducido y chaparral [IIIGEC, 1993].

2. METODOLOGÍA

El procedimiento general seguido en este trabajo fue:

A. La obtención y verificación de la base de datos de clima, suelo y relieve incluyendo una etapa de eliminación de errores e inconsistencias.

B. La preparación y el procesamiento de las bases de datos, incluyendo una imagen de Landsat TM para obtener el mapa de uso/coertura del suelo para 1996. Después se realizó la interpolación de las bases de datos de clima y suelo para la obtención de los mapas respectivos; además, los mapas de temperatura (mínima y máxima) fueron ajustados de acuerdo con el gradiente altotérmico obtenido.

C. La realización de la EMC usando las variables relevantes de clima, suelo y relieve como criterios, para definir las áreas adecuadas para los cultivos de maíz, papa y nopal.

2.1 BASE DE DATOS DE CLIMA

La información del clima se obtuvo de 35 estaciones climatológicas ubicadas tanto dentro, como en el entorno cercano al área de estudio. El número de años de observación para cada estación fue variable, teniendo un período mínimo de 24 y máximo de 42 años. La información fue revisada para eliminar inconsistencias, datos no útiles y estimar valores faltantes. La información fue actualizada hasta los registros más recientes. Las variables consideradas en este estudio fueron: temperatura máxima y mínima, precipitación y evaporación. Posteriormente se procesó la información para obtener los promedios de cada diez días, utilizando un programa computacional para cada variable, de esta forma se generaron valores medios decenales para cada estación.

La interpolación se realizó en IDRISI [Eastman, 1992], utilizando la técnica de la distancia ponderada promedio [Yue-Hong, 1997]. Se obtuvieron 36 mapas, uno para cada decena, para cada variable climática considerada. Los mapas de temperatura (mínima y máxima) fueron ajustados mediante un gradiente altotérmico, derivado de un modelo de regresión que tomó en cuenta la altitud y la temperatura de 72 estaciones climatológicas ubicadas en diferentes condiciones de altitud dentro del Estado de México. El propósito de realizar este procedimiento fue ajustar los resultados de la interpolación de datos puntuales de variables climáticas, con respecto a la variación de altitud [García, 1989].

2.2 BASE DE DATOS DE SUELO, RELIEVE Y PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN LANDSAT

La información de los suelos se obtuvo de las siguientes fuentes: la profundidad del suelo de la digitización de la cartografía edafológica a escala 1:50,000 del INEGI [varias fechas]; la información de algunas características físicas y químicas del suelo se obtuvo de un muestreo de suelos realizado para el área de uso agrícola (150,000 ha aproximadamente) del área de estudio [INIFAP, 1994].

La profundidad del suelo fue derivada de las fases físicas señaladas en INEGI [varias fechas]. El muestreo de suelos fue realizado siguiendo una retícula de 1 km por 1 km. La interpolación se llevó a cabo utilizando un método estándar implementado en el SIG IDRISI. Las variables utilizadas en este proceso fueron: pH, arena, limo y arcilla. Los puntos disponibles del muestreo por variable fueron 1070 para pH, y 1076 para arena, limo y arcilla. Utilizando esta última información del muestreo de suelo, se generó un mapa de clasificación textural a partir de un método geométrico propuesto por Ceballos-Silva y López-Blanco (En preparación).

La información de pendiente (en porcentaje) y de altitud (en msnm) fue obtenida del Modelo de Elevación Digital (MED) disponible, el cual tiene una resolución espacial de 3 segundos de arco, en coordenadas geográficas. Esto corresponde a un tamaño de pixel cercano a los 90 m, la resolución espacial de todas las bases de datos fueron ajustadas a ese tamaño de pixel.

Para obtener la información del uso/cobertura del suelo en el área de estudio, se procesó una imagen Landsat TM de marzo de 1996, dentro de la cual se seleccionó una ventana de 2318 x 2410 pixeles para ser analizada dentro del área de interés. La resolución espacial utilizada fue de 30 m y se tomaron en cuenta las bandas de 1 a 5 y 7 (6 en total). La imagen fue georreferenciada, considerando el sistema de coordenadas UTM. Posteriormente se llevó a cabo una clasificación supervisada, apoyada en varios compuestos en color 4/3/1 y 5/3/1 y probando varios algoritmos de clasificación y diferentes valores umbrales de agrupamiento estadístico.

2.3 EVALUACIÓN MULTI-CRITERIO (EMC)

Primero se identificaron las variables más relevantes del medio físico (suelo, clima y relieve), las cuales se convirtieron en los criterios utilizados para la delimitación de las áreas adecuadas de los cultivos en cuestión, de acuerdo

con el conocimiento agronómico y los expertos locales de diferentes Campos Experimentales del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias). Antes de construir la *matriz de comparación pareada*, hubo que responder a la pregunta: ¿cuáles son las variables relevantes que deben ser consideradas en la evaluación que se pretende realizar, en este caso, identificar las áreas adecuadas para los cultivos de maíz, papa y nopal? La pregunta anterior fue contestada, por un lado, con el análisis objetivo de la revisión bibliográfica y por otro lado se tomó en cuenta la opinión experta de los investigadores del INIFAP, lo anterior fue muy importante ya que el conocimiento experto local tuvo un aporte significativo en esta etapa del trabajo.

Así, las variables que se identificaron como relevantes para la evaluación que se realizó se convirtieron en los criterios que se usaron en la construcción de la matriz de comparación pareada y cuya importancia fue valorada mediante la obtención de sus pesos específicos (Figura 2). Posteriormente se llevó a cabo la construcción de la matriz de comparación pareada de los criterios antes identificados, utilizando la escala de valoración continua de Saaty [1980], la cual ha sido implementada en el contexto de los SIG por Eastman, *et al.* [1995]. Después se definieron los niveles de potencialidad: *muy bueno* (5), *bueno* (4), *medio* (3), *malo* (2), *muy malo* (1). Para cada nivel se definieron los rangos de las variables identificadas como relevantes, es decir los criterios.

Asimismo se revisaron las referencias bibliográficas disponibles, acerca de los requerimientos óptimos de clima, suelo y relieve para el crecimiento y desarrollo de cada cultivo. El objetivo fue fortalecer la decisión de tomar algunos elementos ambientales como relevantes en la definición de las áreas adecuadas de los cultivos, y analizar que los rangos definidos para cada criterio en el paso anterior fueran consistentes con los niveles generales reportados por la bibliografía consultada.

Para la obtención del mapa de áreas adecuadas se construyeron los mapas criterio, uti-

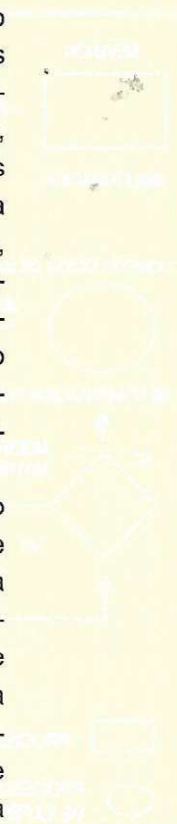
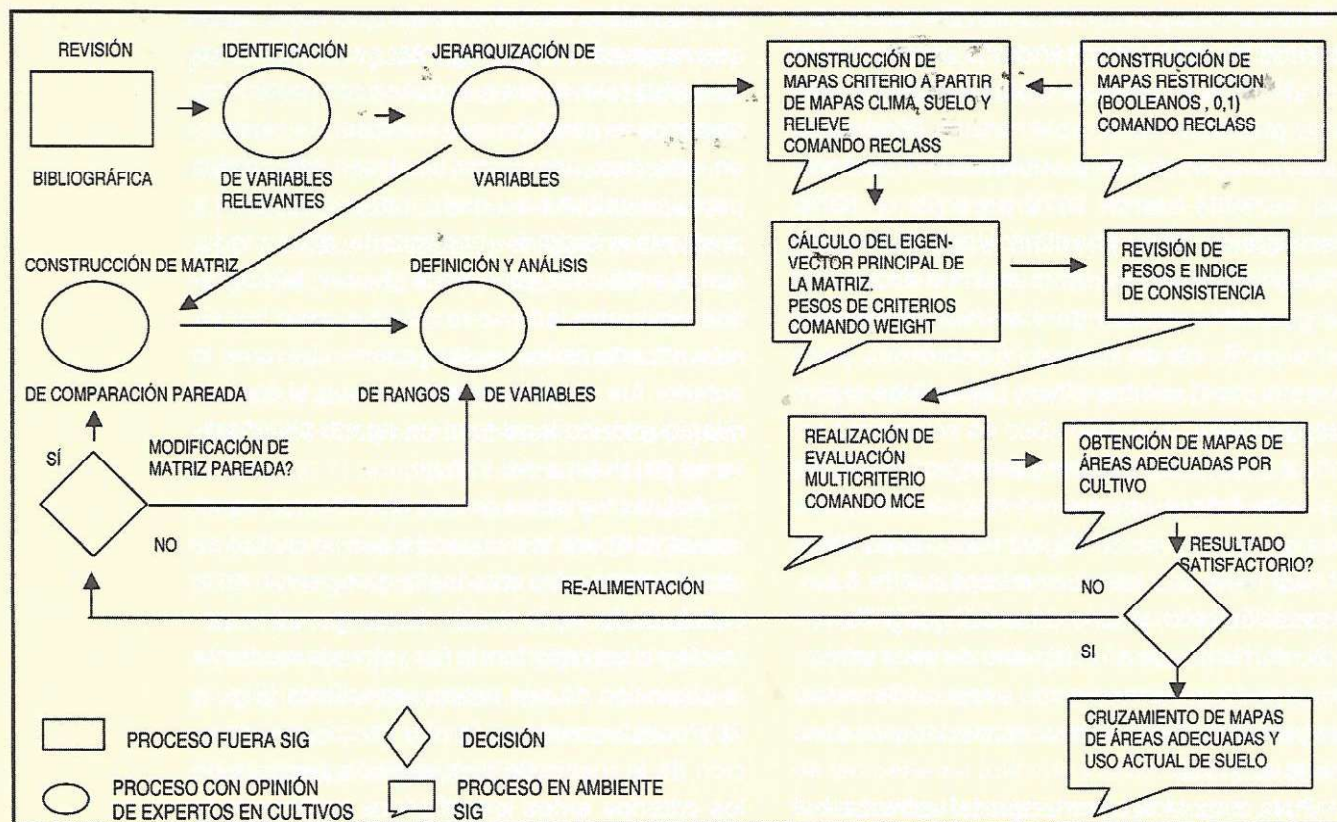


FIGURA 2.
ESQUEMA METODOLÓGICO DE LA EMC REALIZADA EN ESTE ESTUDIO.



lizando las posibilidades que ofrece IDRISI. Estos mapas fueron elaborados tomando en cuenta sólo el ciclo del cultivo. Además se construyó un mapa restricción, en el cual se consideraron como no aptas para la evaluación en cuestión las siguientes clases de información: cuerpos de agua, cumbrones volcánicos, ciudades, y áreas inundadas.

Se obtuvieron los pesos para cada uno de los mapas criterio mediante el uso del SIG IDRISI. Estos pesos se revisaron, para analizar la consistencia en cuanto a las valoraciones otorgadas en la construcción de la matriz pareada. Una vez que se obtuvieron los mapas criterio, así como sus pesos y el mapa restricción, se realizó la Evaluación Multicriterio, para obtener el mapa de áreas adecuadas. Después se llevó a cabo la realimentación de la EMC, validando los resultados obtenidos de acuerdo al

conocimiento experto local y, finalmente, el cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo (proveniente del procesamiento de una imagen Landsat) y áreas adecuadas para los diferentes cultivos.

3. RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CLIMA

Una vez que se llevó a cabo la estimación de datos faltantes y la actualización de la información se obtuvieron, para cada una de las estaciones climatológicas consideradas, las medias decenales por variable. De acuerdo a la información anterior y para la variable precipitación, se observó la mayor cantidad de lluvia en la

estación de la localidad de Desierto de los Leones, D.F., con 1327.1 mm de lluvia anual; por otra parte, la estación con menor lluvia estuvo localizada en Almoloya del Río del DDR de Toluca, con 725.8 mm anual. La media de todas las estaciones consideradas fue de 943.5 mm, la cual es mayor a la media nacional, que es de 771.9 mm anual [CNA, 2000]. Los meses con mayor lluvia fueron: Julio, Agosto Septiembre y Octubre.

Con respecto al comportamiento de la temperatura mínima, se observó el valor inferior de la media anual (2.9°C) en la estación La Marquesa, del DDR de Toluca. Además, el promedio anual de esta variable, para todas las estaciones, fue de 5.8°C, los meses más fríos correspondieron a Diciembre, Enero y Febrero. En cuanto al comportamiento de la temperatura máxima, se observó que el promedio anual más alto se presentó en la localidad de Malinalco, en el DDR de Coatepec Harinas, con 27°C; la media anual de esta variable para todas las estaciones fue de 21.5°C.

La estación con mayor altitud sobre el nivel del mar, fue la del Desierto de los Leones, D.F., con 3,200m y la estación con menor altura fue la de Malinalco, en el DDR de Coatepec Harinas con 1,823m. La altitud promedio de todas las estaciones consideradas fue de 2,552m.

Con los valores medios decenales anteriormente mencionados se llevó a cabo la interpolación, de ese modo se obtuvieron 36 mapas, uno para cada decena, para cada una de las variables de clima utilizadas en este estudio, de tal manera que se obtuvieron en total 144 mapas. Los mapas fueron revisados para analizar el resultado de la interpolación y cuidar que no se presentaran resultados contradictorios o inconsistentes de acuerdo con la base de datos utilizada y el conocimiento del área de estudio.

Después se obtuvo el gradiente altotérmico específico para el área de estudio. Su resultado se muestra a continuación. Los coeficientes del modelo de regresión fueron: $R^2 = 0.9$, coeficiente $a = 30.476$ y coeficiente $b = -0.007$. Con estos valores se calculó dicho gradiente, el cual fue igual a 0.7. Esto es, por cada 100 metros de incremento en la altitud, hay un decremento

de 0.7°C. Esto coincide con lo reportado en la bibliografía [García, 1989; Corbett, 1996], en el sentido de que algunas variables climáticas, tales como la temperatura dependen de la elevación, por lo que para la caracterización de ambientes adecuados para cultivos, dicha dependencia debe de ser tomada en cuenta. Con los resultados anteriores los mapas de temperatura, máxima y mínima fueron ajustados dentro del SIG.

3.2 RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE SUELO, RELIEVE E IMAGEN LANDSAT

Como se mencionó en la sección de Metodología, la información de profundidad de suelos fue obtenida de la digitización de las cartas edafológicas disponibles, después se rasterizo para obtener el mapa que fue la base para la construcción del mapa criterio que se utilizó para todos los cultivos. En el área de estudio se observó que el nivel de potencialidad 5 cubre 163,879 ha, las cuales representan el 61.9%, el nivel 4, 67,380 ha (25.5%); el nivel 3, 17,625 ha (6.7%); el nivel 2, 8,026 ha (3.0%), y el nivel 1, 7,666 ha (2.9%). Lo anterior indica que en más del 87% del área actualmente destinada a la agricultura y bosques, el suelo presenta una profundidad mayor de 0.50 m, lo cual es conveniente para el desarrollo de muchos cultivos. El resto de la superficie (33,317 ha) se puede considerar con restricciones para la actividad agrícola, al menos desde el punto de vista de la profundidad de los suelos.

A partir de la información proveniente del muestreo de suelos y utilizando el método geométrico propuesto, se obtuvo el mapa de clasificación textural, el cual fue útil ya que los requerimientos del medio físico, textura del suelo en este caso, reportados en la bibliografía para el óptimo desarrollo de los cultivos están definidos en términos del triángulo de texturas. Se encontró que gran porcentaje (más del 94.5%) del área de estudio tiene textura franca y franco arenoso, adecuadas para la mayoría de los cultivos. El área con suelos de texturas arcillosas o arenosas, apenas fue de 284 ha, que representa un porcentaje insignificante del área total del DDR Toluca.

A partir del MED se generó un mapa de altitud y un mapa de pendiente (%), mediante los cuales, como en los casos anteriores, se construyeron mapas criterios de acuerdo a los niveles específicos; para estas variables que sirvieron de entrada para la EMC de los diferentes cultivos estudiados.

La información generada, en términos de los mapas interpolados de clima y suelo, se convirtió en una parte fundamental, Corbett [1996] la llama el corazón de cualquier base de datos orientada a la agricultura, con esto se caracterizó la dimensión biofísica del terreno con relación a cada cultivo considerado. Hay que resaltar la importancia que tuvo el hecho de contar con la información del muestreo de suelos, ya que es poco frecuente tener disponible este tipo de información, sobre todo por los costos y el tiempo que implica su obtención, depuración y procesamiento.

En cuanto al procesamiento de la imagen Landsat TM, y después de realizar varias pruebas, se encontró que el mejor mapa de uso/cobertura de suelo se obtuvo mediante una clasificación supervisada, utilizando el algoritmo de máxima-verosimilitud. Asimismo, se realizaron varias pruebas estadísticas para determinar la exactitud de la clasificación supervisada y evaluar la certidumbre de los resultados obtenidos.

De este modo se obtuvo un mapa de uso de suelo con la información actualizada, el cual fue cruzado con los mapas de áreas adecuadas para cada cultivo.

3.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

A continuación se van a describir los resultados de la Evaluación Multicriterio por cultivo, iniciando con la revisión de los requerimientos ambientales y los niveles generales por variable definidas a partir de la bibliografía especializada y el conocimiento experto.

Lo anterior sirvió, por un lado, para fortalecer la decisión de considerar sólo las variables relevantes, que se convirtieron en criterios en

la EMC, y por otro, lado para ayudar a la definición precisa de los niveles por variable, que fueron la base para la construcción de los mapas criterio utilizados en la EMC. Posteriormente se van a describir los resultados de la construcción de la matriz de comparación pareada, así como la ponderación de cada criterio, que sirvió de entrada para llevar a cabo la EMC y obtener así el mapa de áreas adecuadas para cada cultivo. Después se describen los resultados del proceso de realimentación y cuando se alcanzaron resultados satisfactorios se realizó el cruzamiento del mapa de áreas adecuadas por cultivo, con el mapa de uso/cobertura de suelo.

3.3.1 Maíz

Las variables ambientales más importantes para el crecimiento y desarrollo óptimo del cultivo son: la temperatura media, la precipitación total y la humedad almacenada en el suelo disponible para las plantas, puesto que la falta de lluvia y las altas temperaturas constituyen las variables más importantes que limitan el cultivo y el rendimiento del maíz [Llanos, 1984]. Estas dos últimas variables influyen de manera determinante el rendimiento final.

En general, se puede comentar que en algunos de los trabajos revisados [Shaw, 1988; Shrader y Pierre 1967] se reporta la dificultad de definir con precisión los límites extremos de las variables que determinan el óptimo crecimiento y la producción de este cultivo debido, principalmente, al amplio rango de condiciones climáticas en las que crece el maíz.

Por otra parte, resultado del procesamiento de la matriz de comparación pareada (Tabla 1), se obtuvo que los criterios que fueron mejor valorados, es decir, aquellos que de acuerdo a la opinión de los expertos tienen mayor importancia en la definición de las áreas adecuadas para el cultivo de maíz, fueron: temperatura mínima, índice precipitación/evaporación, textura del suelo y profundidad del suelo (Tabla 2). Los criterios que fueron menos valorados y por consecuencia tuvieron menos importancia en la evaluación llevada a cabo fueron: pH del suelo y pendien-

TABLA 1
MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA DE CRITERIOS PARA MAÍZ

	Indice P/E	Temp. mínima	Textura suelo	pH suelo	Prof. suelo	Temp. máxima	Altitud	Pendiente
Indice P/E	1	1/3	3	5	3	9	9	5
Temp. mínima	3	1	3	7	5	9	9	7
Textura suelo	1/3	1/3	1	3	1	9	9	3
pH suelo	1/5	1/7	1/3	1	1/3	7	3	1
Prof. suelo	1/3	1/5	1	3	1	9	5	3
Temp. máxima	1/9	1/9	1/9	1/7	1/9	1	1/3	1/5
Altitud	1/9	1/9	1/9	1/3	1/5	3	1	1/3
Pendiente	1/5	1/7	1/3	1	1/3	5	3	1

te con la misma valoración y temperatura máxima y altitud también con la misma valoración.

Lo anterior concuerda con lo reportado en la revisión bibliográfica, en el sentido de que dos de los factores más importantes para este cultivo están relacionados con la temperatura y la disponibilidad de humedad [Llanos, 1984].

Una vez analizados los niveles generales reportados en la bibliografía para los requerimientos ambientales del cultivo y usando el conocimiento experto local fueron definidos los niveles específicos de cada criterio por nivel de potencialidad. En este estudio (tal como se mencionó en la sección de metodología), se usaron cinco niveles de potencialidad.

De acuerdo con los niveles específicos contruidos para cada criterio, se puede resumir que las áreas con condiciones adecuadas para el maíz están caracterizadas por temperaturas mínimas, no extremas, con condiciones de hu-

medad favorables durante el periodo de Junio a Septiembre, con suelos profundos y de textura franca, terrenos prácticamente planos, con pH neutros, con temperaturas máximas entre 20 y 27°C y altitudes entre 2500 y 2800 msnm. En nuestra área de estudio, casi la totalidad de las características antes descritas, se encuentran en el Valle de Toluca.

Por otra parte, las áreas con condiciones menos favorables para el cultivo están asociadas a temperaturas mínimas extremas, con deficiencia de humedad, con suelos poco profundos y texturas no francas (arcillosas o arenosas), pendientes de terreno elevadas, pH del suelo muy ácidos o muy alcalinos, con temperaturas máximas extremas y altitudes menores a 2500 o mayores a 3000 msnm. Las condiciones antes descritas se ubican en zonas de lomeríos y partes altas tanto de la Sierra de las Cruces, como en el Volcán Nevado de Toluca.

TABLA 2
EIGENVECTOR DE PESOS DE LOS CRITERIOS DE MAÍZ

Criterio	Peso
Temperatura mínima	0.3775
Indice P/E	0.2390
Textura suelo	0.1275
Profundidad suelo	0.1106
Pendiente	0.0501
pH suelo	0.0501
Temperatura máxima	0.0225
Altitud	0.0225

Indice de constancia = 0.03

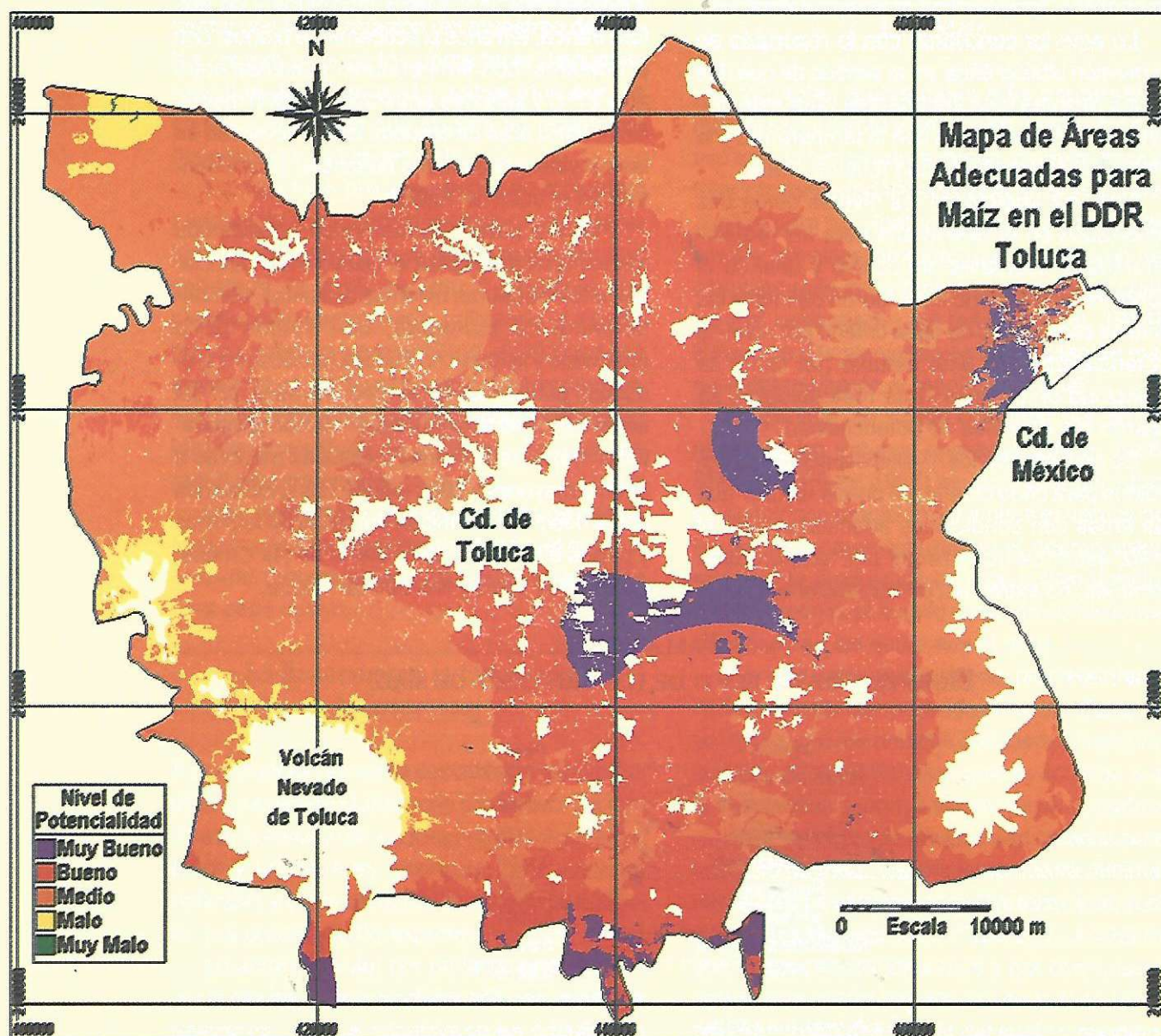
Tomando como base los niveles específicos anteriores fueron contruidos los mapas criterio, uno por cada criterio utilizado en este estudio. Los mapas criterio fueron indispensables para realizar la EMC mediante el uso del SIG IDRISI.

Se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de maíz en el DDR Toluca (Figura 3). De acuerdo con ese mapa el número de hectáreas por nivel de potencialidad fue el siguiente: nivel *muy bueno* 10,529, *bueno* 118,558, *me-*

dio 110,541, *malo* 7,193 y *muy malo* 29. En general, las áreas de los niveles *muy bueno* y *bueno* estuvieron localizadas en el Valle de Toluca, abarcando parte de los municipios de Metepec, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Santiago Tlanguistenco, Chapultepec, Mexicalcingo, Calimaya, Toluca, Tenango del Valle, Joquicingo y Huixquilucan (Figura 1).

En el proceso de realimentación se analizaron, junto con los expertos en cultivos, los re-

FIGURA 3
MAPA DE ÁREAS ADECUADAS PARA MAÍZ EN EL DDR TOLUCA.



sultados obtenidos en la definición de áreas adecuadas para maíz. Primero se revisaron los resultados para cada uno de los criterios en la construcción de la matriz de comparación pareada otorgadas por ellos, y se concluyó que los pesos obtenidos de los criterios eran consistentes con su experiencia en cuanto a la definición de áreas adecuadas para el cultivo.

Asimismo, se revisó el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de maíz y se concluyó que esas áreas estaban bien definidas en ubicación y cantidad. De este modo, mediante el proceso de realimentación, se hizo la validación de los resultados obtenidos para este cultivo.

Una vez hecho lo anterior, se llevó a cabo el cruzamiento del mapa de áreas adecuadas para maíz y el mapa de uso/cobertura de suelo, se observó que las áreas con potencial *muy bueno* y *bueno* representan 93,676 ha de suelos actualmente destinados a la agricultura de temporal, esto es interesante en términos de la conversión productiva del DDR Toluca, ya que de acuerdo con la SAGARPA, para el ciclo Primavera-Verano 2000 se sembraron 118,305 ha de maíz cuando, de acuerdo en los resultados de este trabajo, el número de ha con niveles de potencial *muy bueno* y *bueno* es mucho menor.

Con respecto a la superficie actual de agricultura de riego, la mayor superficie actual se ubicó en un nivel de potencial *bueno* (448 ha), aunque el nivel *muy bueno* de potencial es bastante reducido pues sólo tiene 191 ha. Por lo anterior se puede decir que el potencial de este cultivo en el DDR es más bien en las áreas con agricultura de temporal.

Los resultados anteriores pueden servir de pauta para dirigir de manera más precisa los esfuerzos destinados a la producción de este cultivo, a la asignación de recursos mediante programas especiales, a la investigación y transferencia de tecnología y, en general, para tomar decisiones a nivel regional sobre la mejor planeación del uso del suelo.

3.3.2 PAPA

Se puede decir que algunos de los requerimientos del cultivo de papa están asociados a la humedad disponible y temperatura tanto máxima como mínima [Ora, 1977], dichas variables afectan de diferente manera, dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo, como el periodo de formación de tubérculos, que es una de las etapas más críticas en cuanto al desarrollo y producción del cultivo. Otros requerimientos están asociados al tipo de suelo que necesita el cultivo para desarrollarse, se pone especial énfasis en la aireación y el contenido de materia orgánica para permitir la brotación de las yemas, la formación del sistema radicular y la eventual formación de tubérculos, los cuales son el principal producto.

Al igual que para el cultivo de maíz y el nopal, para el caso de la papa la construcción de la matriz de comparación pareada se llevó a cabo tomando en cuenta sólo aquellas variables relevantes del medio físico que se convirtieron en criterios que intervinieron en la evaluación realizada, en este caso, identificar las áreas adecuadas para el cultivo de papa.

TABLA 3
MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA DE CRITERIOS PARA PAPA

	Prof. suelo	Textura suelo	Precipitación	Temp. mínima	Pendiente	Temp. máxima	Altitud
Prof. suelo	1	3	3	7	7	9	5
Textura suelo	1/3	1	3	5	7	7	5
Precipitación	1/3	1/3	1	5	7	5	5
Temp. mínima	1/7	1/5	1/5	1	5	3	3
Pendiente	1/7	1/7	1/7	1/5	1	1/3	1/3
Temp. máxima	1/9	1/7	1/5	1/3	3	1	1
Altitud	1/5	1/5	1/5	1/3	3	1	1

TABLA 4
EIGENVECTOR DE PESOS DE LOS CRITERIOS DE PAPA

Criterio	Peso
Profundidad suelo	0.3847
Textura suelo	0.2549
Precipitación	0.1767
Temperatura mínima	0.0765
Altitud	0.0448
Temperatura máxima	0.0384
Pendiente	0.0239

Índice de constancia = 0.09

Como resultado del procesamiento de la matriz de comparación pareada (Tabla 3), se puede decir que los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas para papa fueron: la profundidad del suelo, la textura del suelo, seguidos de la precipitación y la temperatura mínima (Tabla 4). Además, los criterios con menor importancia fueron: la altitud, la temperatura máxima y, finalmente, la pendiente del terreno.

En general se observó que las condiciones ambientales asociadas a los niveles *muy bueno* y *bueno* en cuanto a potencialidad para el cultivo, están caracterizadas por suelos profundos (>0.5m), suelos con textura franca, con niveles altos de precipitación, con temperaturas que no bajen de 3°C y que no excedan los 22°C, en un rango altitudinal de 2700 a 3200 msnm y con pendientes de terreno de menos de 25%.

Por otra parte las condiciones ambientales asociadas a los niveles bajos en cuanto a potencialidad para el cultivo, están caracterizadas por suelos delgados (menos de 0.5 m), texturas o muy arenosas o muy arcillosas, con temperaturas mínimas extremas (<0°C), altitudes menores a 2500 o mayores a 3200 msnm, temperaturas máximas menores a 14 o mayores a 22 °C y con pendientes mayores al 40%.

Tomando como base los niveles específicos anteriores y usando el SIG IDRISI fueron construidos los mapas criterio que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de papa en el DDR Toluca (Figura 4). De acuerdo con el mapa anterior, el número de hectáreas por nivel de

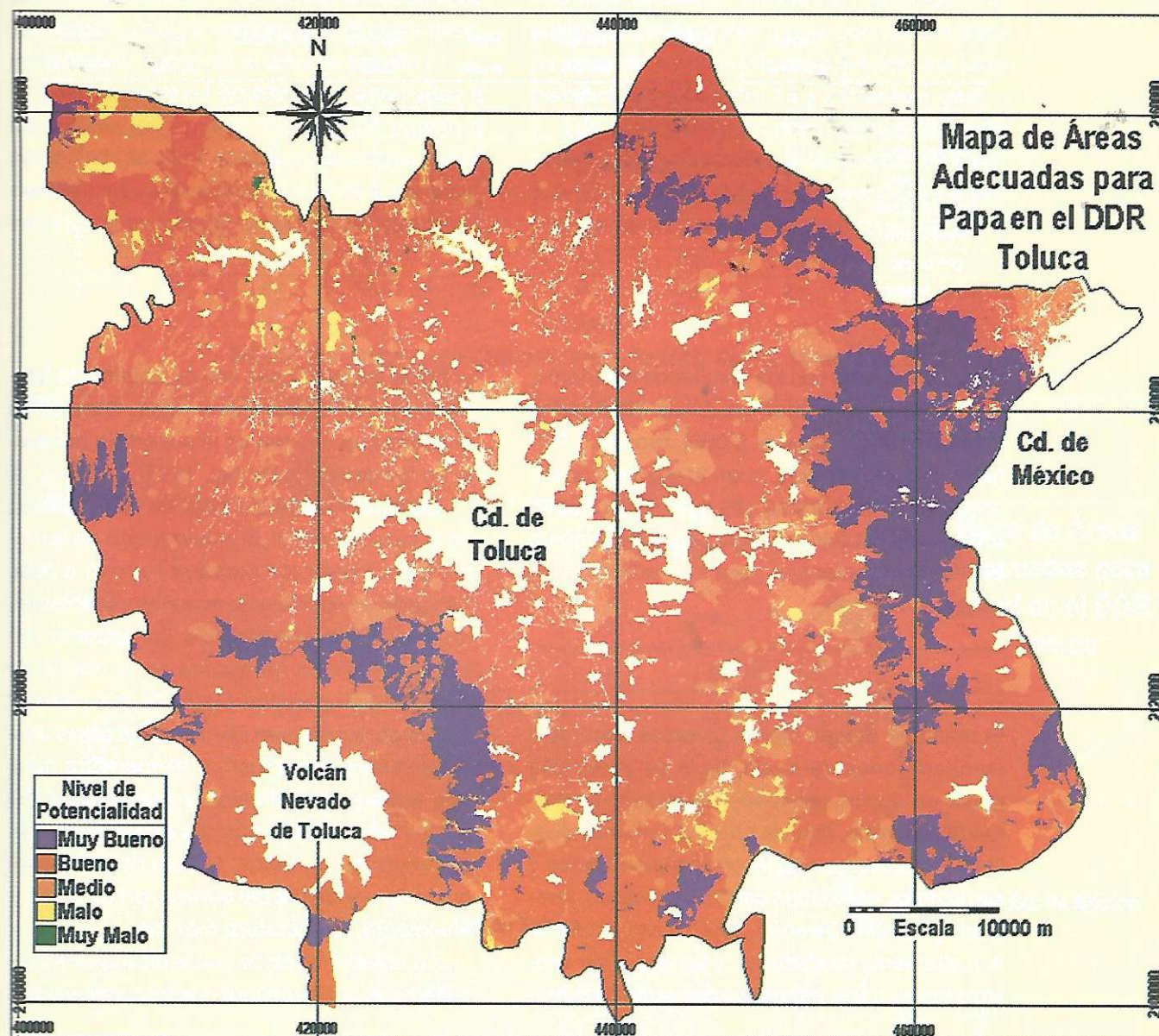
potencialidad fue el siguiente: *muy bueno* 36,584 ha (14 %), *bueno* 180,292 ha (69.4%), *medio* 38,933 ha (15.0), *malo* 3,936 ha (1.6%) y *muy malo* 84 ha (0.03%). En general, los niveles de potencial *muy bueno* (Figura 4) se ubicaron dentro de los límites (si bien no cubriendo la totalidad) de los municipios de: Zinacantepec, Toluca, Calimaya, Tenango del Valle, Joquicingo, Santiago Tianguistenco, Xalatlaco, Ocoyoacac, Texcalyacac, Huixquilucan, Lerma, Xonacatlan, Otzolotepec y Temoaya (Figura 1). Dentro de esos municipios las áreas se ubicaron en las laderas de las partes altas del Volcán Nevado de Toluca, Sierra las Cruces y Cerro San Antonio.

En el proceso de realimentación se analizaron, junto con los expertos de cultivos, los resultados obtenidos en la definición de áreas adecuadas para papa. Como resultado se concluyó que los pesos obtenidos de los criterios fueron consistentes con el conocimiento experto en cuanto a la importancia que tuvieron los criterios, en la definición de áreas adecuadas para el cultivo.

Se analizaron también los niveles específicos de cada criterio por nivel de potencialidad y se concluyó que eran consistentes tanto con los requerimientos ambientales óptimos para el desarrollo del cultivo reportados por la bibliografía como con el propio conocimiento y experiencia local de este cultivo en el DDR Toluca.

Además se revisó el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de papa y se concluyó que esas áreas estaban bien definidas en su ubica-

FIGURA 4
 MAPA DE ÁREAS ADECUADAS PARA PAPA EN EL DDR TOLUCA.



ción y en su cantidad. De esta manera, los resultados obtenidos para este cultivo fueron validados por los expertos del cultivo.

Una vez hecho lo anterior, se llevó a cabo el cruzamiento del mapa de áreas adecuadas para papa y el mapa de uso/cobertura de suelo. En general se encontró que las áreas ocupadas actualmente con bosques, se identificaron como áreas con niveles de potencialidad *muy bueno* y *bueno*. Esto no implica que se esté sugiriendo el cambio de uso de suelo,

sustituyendo los bosques de pino, oyamel y pinoencino principalmente con el cultivo de papa, aunque esto es un hecho que forma parte de la realidad del manejo parcelario por parte de los productores en esas áreas montañosas, sobre todo dentro del Nevado de Toluca.

En cuanto a las áreas usadas actualmente para agricultura de temporal, en 13,823 ha se encontró un nivel de potencial *muy bueno*, esto refleja el potencial del medio biofísico en esas áreas para la producción de este cultivo, es

TABLA 5
MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA DE CRITERIOS PARA PAPA

	Temp. mínima	Altitud	Precipitación	Prof. suelo	Textura suelo	Pendiente	pH suelo	Temp. máxima
Temp. mínima	1	3	5	7	7	7	9	9
Altitud	1/3	1	1	3	5	7	7	9
Precipitación	1/5	1	1	3	3	5	7	9
Prof. suelo	1/7	1/3	1/3	1	1	3	5	7
Textura suelo	1/7	1/5	1/3	1	1	1	3	5
Pendiente	1/7	1/7	1/5	1/3	1	1	1	3
pH suelo	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1	1	7
Temp. máxima	1/9	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1/7	1

decir, de acuerdo con los resultados anteriores, se podría incrementar las áreas destinadas actualmente. La SAGARPA [2000], reportó 1,950 ha en ese año agrícola, cuando el potencial encontrado en este trabajo es mayor. En cuanto a las áreas actuales de agricultura de riego no se identificó potencial para la producción en esas condiciones.

3.3.3 NOPAL

El nopal se adapta bien a diversas texturas y composiciones de suelo, pero se desarrolla mejor en suelos calcáreos, arenosos, de profundidad media, con pH preferentemente alcalino. El cultivo es viable en regiones áridas y semiáridas, con climas cálido, semicálido, templado y semifrío [Aragón, 1995]. Las cactáceas son altamente productivas, y tienden a ser sensibles a las bajas temperaturas; aunque la ma-

yoría de las cactáceas son relativamente tolerantes a las temperaturas altas, tales como aquellas que ocurren en la superficie del suelo en los desiertos [Nobel, 1995].

De igual manera que para los otros cultivos, en el caso del nopal, la construcción de la matriz de comparación pareada se llevó a cabo tomando en cuenta sólo aquellas variables relevantes del medio biofísico. De acuerdo con las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada (Tabla 5), los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas para nopal fueron: temperatura mínima, altitud, precipitación y profundidad del suelo (Tabla 6). Además, los criterios con menor importancia fueron: textura del suelo, seguido de pendiente del terreno, pH de suelo y, finalmente, temperatura máxima.

Lo anterior coincide con la bibliografía consultada, ya que se conoce que las cactáceas son

TABLA 6
EIGENVECTOR DE PESOS DE LOS CRITERIOS PARA NOPAL

Variable	Peso
Temperatura mínima	0.4056
Altitud	0.1947
Precipitación	0.1672
Profundidad suelo	0.0841
Textura suelo	0.0563
Pendiente	0.0376
pH suelo	0.0373
Temperatura máxima	0.0172

Índice de constancia = 0.08

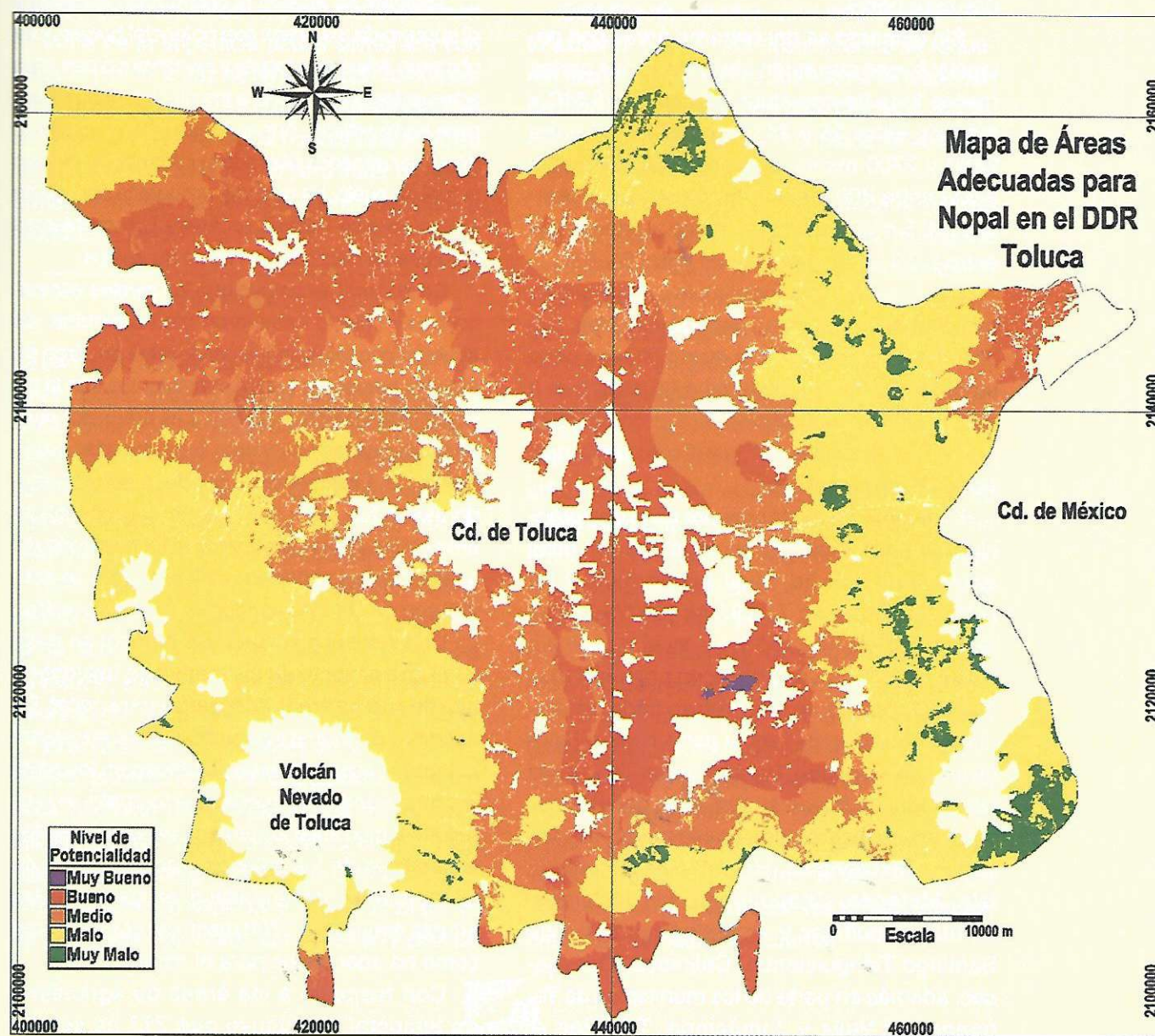
sensibles a las bajas temperaturas [Nóbel, 1995; Borrego y Burgos, 1986], por lo que, es de especial importancia definir los niveles adecuados de temperatura mínima que permitan el mejor desarrollo de este cultivo en el área de estudio.

Las condiciones ambientales asociadas a los niveles *muy bueno* y *bueno* en cuanto a potencialidad para el cultivo de nopal, están caracterizadas por temperaturas mínimas anuales (ya que se trata de un cultivo perenne) ma-

yores de 5.5°C, con un rango altitudinal de menos de 2,700 msnm, precipitación de 800-900 mm (anuales), pendiente menor del 8%, suelos de profundidad media con textura franca y con pH neutros y finalmente con una temperatura máxima entre 16 y 24°C.

Los niveles bajos en potencialidad para este cultivo están asociados a temperaturas mínimas menores de 3.5°C y temperaturas máximas extremas, pendientes menores de 2% o

FIGURA 5
MAPA DE ÁREAS ADECUADAS PARA NOPAL EN EL DDR TOLUCA.



mayores de 14%, suelos poco profundos y texturas muy arenosas o muy arcillosas, precipitaciones muy bajas o muy abundantes.

Con base en los niveles anteriores fueron contruidos los mapas criterios utilizados para la EMC, se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de nopal en el DDR Toluca (Figura 5). Se puede observar en la figura, que existen pocas áreas con potencial *muy bueno*, esto es razonable debido a las condiciones de altitud, en el área de estudio se pueden presentar niveles extremos de temperatura mínima, este criterio fue el más importante en la evaluación de identificación de áreas adecuadas para nopal.

Sin embargo se encontraron áreas con potencial *bueno* que están ubicadas en las partes menos frías (temperatura mínima de $>5.5^{\circ}\text{C}$ y máxima entre 16 y 24°C) a una altitud entre 2650 y 2700 msnm, con precipitación media anual entre 800 y 850 mm, en suelos profundos (>0.5 m) con texturas franco arenoso y pH entre 6.2-7.0, con pendientes entre 5 y 8%.

Las áreas con potencial *malo* y *muy malo* se caracterizaron por ser en general más frías, con altitudes mayores a 2800 msnm, suelos poco profundos (<0.1 m), texturas muy arcillosas o muy arenosas, pendientes muy pronunciadas ($>14\%$) o muy planas ($<2\%$) y pH de suelos muy ácidos o muy alcalinos.

El número de hectáreas por nivel de potencialidad para el cultivo de nopal fueron: nivel *muy bueno* 216 ha, nivel *bueno* 59,382 ha (24%), nivel *medio* 75,197 ha (30.5%), nivel *malo* 105,859 ha (42.9%) y nivel *muy malo* 6,197 ha (2.6%). Las áreas con potencial *muy bueno* (Figura 5), se ubicaron en parte del municipio de Atizapan y en la parte baja del municipio de Santiago Tianguistenco, las áreas con potencial *bueno* se ubicaron parcialmente en los municipios de: Almoloya del Río, Atizapan, Texcalyacac, Rayón, San Antonio la Isla, Metepec, Chapultepec, Mexicalcingo, Lerma, Capulhuac y en las partes bajas de Santiago Tianguistenco, Calimaya, Ocoyoacac, además en parte de los municipios de Tenango del Valle y Joquicingo. También el

potencial *bueno* se ubicó en Xonacatlan, Otzolotepec, Huixquilucan, Temoaya y parte norte de Toluca y noroeste de Almoloya de Juárez (Figura 1). Estas áreas se ubicaron principalmente en la porción noroeste, central del área de estudio, así como en lo que se conoce genéricamente como el Valle de Toluca.

En el proceso de realimentación con el experto de este cultivo, se analizaron varios aspectos, el hecho de que se encontraron áreas pequeñas con potencial *muy bueno*, lo cual es razonable debido a que las cactáceas son plantas sensibles a las bajas temperaturas [Nobel, 1995; Borrego y Burgos, 1986].

También se analizó la distribución espacial y el número de las áreas con potencial *bueno*, y se ubicaron adecuadamente y se concluyó que eran adecuadas de acuerdo a los niveles específicos para cada criterio. Aunque este último resultado debía ser afinado utilizando la información del uso actual de suelo, ya que una propuesta del uso de este cultivo es hacerlo en áreas con problemas actuales de degradación física de suelos.

En general se obtuvo que los niveles específicos por criterio estuvieron bien definidos, de acuerdo con las condiciones locales del área de estudio, y además fueron consistentes con la revisión bibliográfica realizada. Las áreas por nivel de potencialidad estuvieron bien ubicadas espacialmente. Finalmente se concluyó que el método usado fue útil y consistente para identificar áreas adecuadas para este cultivo, partiendo del análisis de las variables relevantes que se convirtieron en criterios usados en esta evaluación.

Una vez hecho el proceso anterior se realizó el cruzamiento de los mapas de uso/coertura de suelo y áreas adecuadas para nopal. Se encontró de manera general que las áreas con cobertura actual forestal se ubican en los niveles de potencial de *medio* a *muy malo*, lo cual resulta lógico si se toman en cuenta los niveles específicos de los criterios, sobre todo los de temperatura mínima y altitud, en los cuales las alturas mayores a 2700 msnm se consideraron como no adecuados para el nopal.

Con respecto a las áreas de agricultura de temporal, se obtuvo que 213 ha se ubi-

caron con potencial *muy bueno* y una gran cantidad de ha (51,154 ha) se ubicaron como de buen potencial para el nopal, lo cual es promisorio, si es que se piensa en un cultivo de alternativa al uso actual de suelo. En cuanto a las áreas con agricultura de riego, el mayor porcentaje se ubicó en el nivel de potencial *bueno* con 561 ha.

Finalmente, un resultado interesante, es que 3,031 ha de suelos degradados actualmente se ubicaron dentro de los niveles de potencial *muy bueno* y *bueno*, esto plantea la posibilidad de usar este cultivo en áreas con fuertes limitantes (erosión) para la producción de otros cultivos. La cantidad de hectáreas antes señalada representa casi el 145% de la superficie actual sembrada con papa. Además, 4,262 ha de áreas con suelos degradados se ubicaron en el nivel de potencial *medio*, esto también plantea la posible utilización de estas áreas con este cultivo para tratar de sacar el mejor provecho de áreas con limitantes para la producción de cultivos anuales.

4. CONSIDERACIONES FINALES

La EMC realizada de las variables del medio biofísico; clima, suelo y relieve mostró ser útil en la identificación de las áreas adecuadas para cultivos, usando sólo las variables identificadas como relevantes a partir del conocimiento agronómico experto local, que se convirtieron en los criterios utilizados en esta evaluación.

El enfoque anterior permitió obtener información valiosa acerca de la importancia relativa específica de dichos criterios de evaluación para el área de estudio, esto puede ser útil como antecedente para trabajos posteriores en estos y otros cultivos.

El análisis de las variables de clima, suelo y relieve, permitió construir una plataforma "dinámica" [Corbett, 1996], a partir de la cual diferentes beneficios fueron obtenidos como: 1) la posibilidad de integrar bases de datos con diferentes resolución espacial y temporal, 2) generar diferentes coberturas temáticas en forma de

mapas, con adaptabilidad a las características de los diferentes cultivos como: ciclos de cultivo, fases fenológicas importantes y requerimientos ambientales específicos, 3) usando las bases de datos y los criterios de evaluación adecuados, así como la información bibliográfica respectiva, se puede llevar a cabo la evaluación para identificar áreas adecuadas para otros cultivos.

El análisis conjunto del conocimiento agronómico del cultivo reportado en la bibliografía revisada y la experiencia local fue muy importante porque permitió fortalecer la decisión sobre las variables del medio biofísico que debían entrar al proceso de EMC.

Este tipo de estudios, usando el conocimiento experto, pueden ser útiles cuando se requieren resultados rápidos o cuando no se disponen de datos suficientes para usar modelos cuantitativos más complejos en términos de tiempo y costo [Byderkerke, 1998].

El proceso de realimentación de la EMC fue muy útil, pues permitió, por un lado, ajustar los resultados de acuerdo al conocimiento experto local y, por otro, validar los resultados obtenidos; en ambos casos este proceso sirvió para mejorar los resultados.

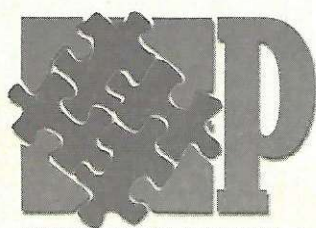
En este trabajo se ha obtenido información útil para los que toman decisiones sobre la planeación del uso del suelo, con el fin de que se utilice de la mejor manera posible el recurso suelo disponible en el área de estudio. Sin embargo, lo anterior implica un proceso cuidadoso de planeación de la producción que tome en cuenta factores tales como: comercialización, apoyo crediticio y técnico, acopio de insumos, almacenamiento, entre otros; ya que es común que los productores tomen en cuenta factores que no son considerados en un enfoque técnico de la planeación y, por lo tanto, es muy importante que estos factores sean investigados así como su impacto dentro del proceso de planeación; [Kutter, *et al.*, 1997], las preferencias de los productores locales también deben ser tomadas en cuenta.



BIBLIOGRAFÍA

- Aragón, P. L. H. *Factibilidades agrícolas y forestales en la República Mexicana*. Editorial Trillas, México, 1995.
- Aronoff, S. *Geographic information systems: A management perspective*. WDL Publications, Canada, 1989.
- Barredo, C. J. I. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial RA-MA, Madrid, 1996.
- Borrego, E. F. y Burgos, V. N. 1986. *El Nopal*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buena Vista, Saltillo, México, 1986.
- Bydekerke, L., Van Ranst, E., Vanmechelen, L., and Groenemans, R. 1998. *Land suitability assessment for cherimoya in southern Ecuador using expert knowledge and GIS. Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1998.
- Carver, S. J. 1991. *Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems*. International Journal of Geographical Information System 5, 1991.
- CNA. *El agua en México: retos y avances*. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAP, México, 2000.
- Corbett, J. H. "Dynamic crop environment classification using interpolated climate surfaces", in Goodchild, M. F., Steyaert, L. T., Parks, B. O. (Eds.). *GIS and environmental modelling: progress research issues*. GIS World Book, Fort Collins, 1996.
- Eastman, R. J. *IDRISI Versión 4.0. User's Guide*. Clark University, Worcester Massachusetts, 1992.
- Eastman, R. J., Jin, W., Kyem, A. K. P., and Toledano, J. *Raster procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective decisions*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1995.
- García, E. *Apuntes de climatología*. 6ta, ed., México, 1989.
- García, N. H., López, B. J., Moreno, S. R., Villers, R. M. L., y García, D. R. *Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el Distrito de Desarrollo Rural 004, Celaya, Guanajuato*. Terra 18, Guanajuato, 2000.
- IIIGEC. *Atlas general del Estado de México*. Instituto de Información e Investigación Geografía Estadística y Catastro, Secretaría de Finanzas, Gobierno del Estado de México, México, 1993.
- INEGI. *Mapas de edafología. Escala 1:50,000. Claves E14A27, E14A38, E14A49, E14A37, E14A58, E14A47, E14A48, E14A28, E14A39*. INEGI, México, varias fechas.
- INIFAP. *Informe anual de actividades. Programa potencial productivo. Campo experimental Toluca, Estado de México*. INIFAP, México, 1994.
- Jankowsky, P. 1995. *Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods*. International Journal of Geographical Information System 9, 1995.
- Janssen, R. and Rietved, P. "Multicriteria analysis and GIS: An application to agriculture landuse in The Netherlands" in Scholten, H., Stilwell, J. (Eds.). *Geographical information systems for urban and regional planning*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 1990.
- Jorein, E., Thériault, M. and Musy, A., 2001. *Using GIS and outranking multicriteria analysis for land use suitability assessment*. International Journal of Geographical Information System, 2001.
- Kutter, A., Nachtergaele, F. O. and Verheye, W. H. *The new FAO approach to land use planning and management, and its application in Sierra Leone*. ITC Journal 3-4, 1997.
- Llanos, C. M. *El maíz. Su cultivo y aprovechamiento*. Ediciones Mundi-Prensa, España, 1984.
- Malczewsky, J. A. *GIS-based approach to multiple criteria group decision-making*. International Journal of Geographical Information Systems, 10, 1996.
- Malczewsky, J. A. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons, USA, 1999.
- Ngowi, J., and Stocking, M. *Assessing land suitability and yield potential for coconuts in Tanzania*. Applied Geography, 9, 1989.
- Nobel, P. S., 1995. "Avances recientes en la ecofisiología de *Opuntia ficus-indica* y otras cactáceas", en Pimienta Barrios, Eulogio; Neri Luna, Cecilia; Muñoz Urias, Alejandro; y Huerta Martínez, Francisco (Comp.). *Conocimiento y aprovechamiento del Nopal*. 6to Congreso Nacional y 4to Congreso Internacional, Jalisco, 6-10 Noviembre de 1995, México.
- Ora, S. *Potatoes: Production, storing, processing*. The Avi Publishing Company, Connecticut, 1977.
- Saaty, T. L. *The analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw Hill, 1980.
- SAGAR. *Uso del suelo en el Estado de México. Delegación en el Estado de México. Subdelegación de agricultura. Programa de fomento agrícola*. SAGAR, México, 1998.

- SAGARPA. *Programa agrícola definitivo del ciclo primavera verano. Subdelegación de planeación y desarrollo rural. Distrito de desarrollo rural No. 1 Toluca, México.* SAGARPA, México, 2000.
- Shaw, R. H., 1988. "Climate requirement". in Sprague, G. F. and Dudley, J. W. (eds.). *Corn and corn improvement*. Third Edition, Number 18. In the series Agronomy, American Society of Agronomy, Inc, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc, Publisher, USA, 1988.
- Shrader, W. D. and Pierre, J. J. 1967. *Soil suitability and cropping systems. Advances in corn production. Principles and practices.* The Iowa State University Press, Building Ames, USA, 1967.
- Thill, J. C. *Spatial multicriteria decision making and analysis, A geographic information sciences approach.* Ashgate, Great Britain, 1999.
- VanLier, H. *The role of land-use planning in sustainable rural systems. Landscape and Urban planning.* 1998.
- Voogd, H. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning.* Pion, Ltd, London, 1983.
- Yue-Hong, C. *Exploring spatial analysis in geographic information systems.* Onword Press, USA, 1997.



Planeación

Boletín de la Facultad de Planeación Urbana y Regional



Paradoja de la Planeación Urbana y Regional en el Estado de México

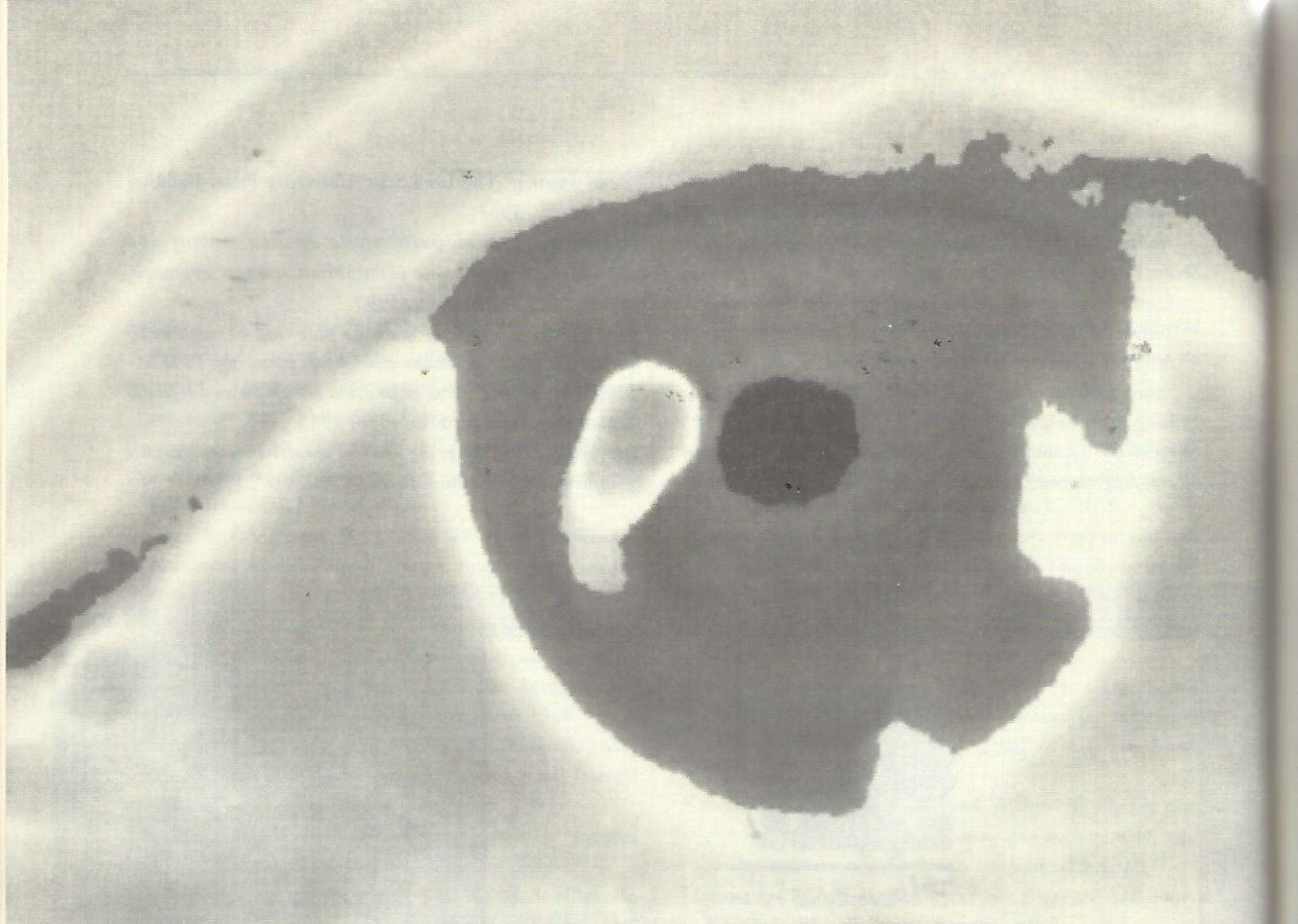
Tercer Encuentro Internacional de Urbanismo y Medio Ambiente

Limpieza y Políticas de Difusión para el Mejoramiento Ambiental en el Zoológico de Zacango

El Nuevo Paradigma Ambiental: Crecimiento Urbano Ecológico

Un Análisis de la Región Nor-Oriental de Polonia

Planeación en México Región y Ambiente



**El Instituto Nacional de Estadística,
Geografía e Informática invita a toda la
comunidad universitaria a participar en las
Visitas Guiadas que ofrece con el propósito
de apoyar el desarrollo académico a través del
conocimiento de la Estadística y la Geografía**

Mayores informes

Tels. 226 13 55 y 226 88 62

C.I. Toluca
Av. Sebastián Lerdo de Tejada Núm. 824
Colonia Reforma y Ferrocarriles Nacionales
e-mail. citoluca@lerdo.inegi.gob.mx



INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA
GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA