



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

03095
2

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

IDENTIFICACION DE AREAS ADECUADAS PARA CULTIVOS CON EL
ENFOQUE DE EVALUACION MULTICRITERIO Y SIG: EL CASO DEL DDR
TOLUCA, MEXICO

TESIS

que para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS *de la tierra*

presenta:

M.C. ALEJANDRO PASCUAL CEBALLOS SILVA

Director de Tesis:
DR. JORGE LOPEZ BLANCO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F. Octubre 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del Comité Tutorial indicado. Ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Comité Tutorial:

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

ASESORA: DRA. LOURDES VILLERS RUIZ

ASESOR: DR. JOSÉ LUIS PALACIO PRIETO

Miembros del Jurado de Examen:

DRA. TERESA REYNA TRUJILLO

DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA

DR. HILARIO GARCÍA NIETO

DR. ROLANDO RENÉ GARCÍA DAGUER

México, D.F. Octubre 2002

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge López Blanco, por su extraordinaria dirección de este trabajo, por su amistad y sobre todo por su excelente calidad humana.

A la Dra. Lourdes Villers Ruiz, por sus objetivas y siempre valiosas sugerencias y recomendaciones, que permitieron sin duda alguna, mejorar la presente investigación.

Al Dr. José Luis Palacio Prieto, por sus atinadas observaciones y el apoyo para hacer posible la realización de esta tesis.

A todos ellos mis respetos y mi sincero reconocimiento.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la oportunidad brindada y el soporte económico, para la realización de mis estudios de doctorado

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en especial al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Instituto de Geografía, por brindarme la oportunidad de ser parte de su comunidad estudiantil y realizar mi investigación doctoral

A la Dra. Teresa Reyna Trujillo, al Dr. José López García, al Dr. Hilario García Nieto y al Dr. Rolando René García Daguer por aceptar participar como miembros del jurado de examen de grado y sobre todo por sus valiosos y acertados comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo.

Especial agradecimiento a los siguientes expertos del INIFAP, por su desinteresada y valiosa ayuda: M.C. Julián Victor Magallanes González, M.C. Carlos Díaz Hernández, M.C. Alfredo Josué Gámez Vázquez, M.C. Miguel Angel Ávila Perches, Dr. Eduardo Espitia Rangel, y M.C. José Concepción Martínez González.

Al personal técnico de la CNA y del Distrito de Desarrollo Rural Toluca, México, por su buena disposición para proporcionar la información disponible.

A mis amigos y compañeros de cubículo, en especial a Rodolfo Ruiz López, por su valiosa ayuda.

DEDICATORIA

A la memoria del mejor hombre que jamas haya conocido, mi Papá.

A mi Mamá, fuente inagotable de amor, comprensión y paciencia.

A mi esposa, Carmen, por su amor, por su comprensión y sobre todo, por su apoyo en toda mi carrera.

A mis hijos, Ana Laura y Alejandro, porque son mi fuente de motivación.

A mis hermanos, por todo su apoyo.

A mis amigos, gracias a todos ellos.

RESUMEN

En esta investigación se aplicó el enfoque de Evaluación Multicriterio (EMC) bajo un ambiente de Sistema de Información Geográfica (SIG) para identificar áreas adecuadas de cultivos, considerando variables relevantes de clima, suelo y relieve, en el ámbito del Distrito de Desarrollo Rural de Toluca (DDR), Estado de México. Los cultivos considerados en este estudio fueron: maíz, papa, avena, haba, amaranto y nopal. Los parámetros físicos considerados para estos cultivos fueron clima, suelo y relieve. Del procesamiento de la base de datos de clima se produjeron mapas decenales interpolados que tomaron en cuenta características específicas de cada cultivo.

Para el caso de temperatura mínima y máxima se tomó en cuenta el efecto de la altitud, mediante el gradiente altotérmico específico para el área de estudio. Con respecto a la base de datos de suelo, se produjeron mapas de profundidad y pH del suelo. Además, mediante un método desarrollado en esta investigación se obtuvo un mapa de clases de textura de suelo. Mediante el procesamiento del Modelo Digital del Terreno (MDT) se obtuvo el mapa de pendientes en %.

Asimismo, se procesó una imagen Landsat TM 1996 para producir el mapa de uso/cobertura actual del suelo. La resolución espacial fue homogeneizada a un tamaño de pixel de 90 x 90 m. Para llevar a cabo la EMC todos los mapas factor fueron estandarizados mediante la metodología fuzzy. Los resultados indicaron que los cultivos considerados en esta investigación presentaron diferentes niveles de aptitud, de acuerdo a la valoración realizada del medio físico.

Para el caso del maíz se encontraron 55,303 ha con el nivel más alto de potencial en áreas dedicadas actualmente a la agricultura de temporal. En cuanto al cultivo de papa, en 8,568 ha se ubicó el nivel más alto de potencialidad, lo cual refleja la capacidad del medio físico en el área de estudio, para la producción de este cultivo. Asimismo, para el cultivo de avena las áreas con potencial más alto y que se destinan actualmente a la agricultura de temporal fueron 6,663 ha, dichas áreas representan más del 57% de la superficie actualmente sembrada con este cultivo. Para el cultivo de haba se ubicaron 17,550 ha del nivel de potencial muy bueno, además de acuerdo con los resultados se confirma que las posibilidades de este cultivo, se encuentran en las áreas de temporal.

En relación al cultivo del amaranto, se encontró que en áreas dedicadas actualmente a la agricultura de temporal se presentó el nivel de potencialidad muy bueno en 959 ha, lo cual es promisorio tratándose de un cultivo de alternativa. Con respecto al cultivo de nopal en las áreas con agricultura de temporal se obtuvo que 4,282 ha se ubicaron en el nivel de potencialidad muy bueno, lo cual es significativo si se piensa en un cultivo de alternativa al uso agrícola actual de suelo.

Se encontraron divergencias en cuanto a la superficie actual sembrada y la superficie con aptitud por cultivo. Para el caso de amaranto y el nopal se obtuvieron resultados promisorios en cuanto al número de hectáreas con aptitud para estos cultivos alternativos. Esta investigación produjo información de carácter regional, en forma de mapas de áreas adecuadas por cultivo, que puede ser útil a diferentes usuarios. Además los resultados obtenidos pueden ser usados en el establecimiento de programas de apoyo a la producción de cultivos y a la generación de tecnología agrícola.

La combinación de EMC y SIG fue útil para evaluar múltiples criterios y conocimiento experto en una forma consistente con el propósito de obtener mapas de áreas adecuadas para cultivos y bases de datos tabulares con información precisa sobre la importancia relativa de los criterios bajo consideración. Por lo tanto se ha mostrado que tal combinación tiene potencial para proporcionar un enfoque racional, objetivo y confiable para la toma de decisiones en valoraciones del medio físico para aplicaciones agrícolas en México.

INDICE GENERAL

	Pág.
CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1.1 Aspectos Generales	1
1.2 Marco general de la investigación y objetivos	4
1.2.1 Evaluación de tierras	6
1.2.2 Zonificación agroclimática	9
1.2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección	10
1.2.4 Evaluación Multicriterio (EMC) y su integración con los SIG	14
1.3 Descripción del área de estudio	20
1.3.1 Generalidades	20
1.3.2 Cultivos considerados	20
1.3.3 Clima	25
1.3.4 Vegetación	26
1.3.5 Suelos	29
1.3.6 Hidrología	31
CAPITULO 2. METODOLOGIA	33
2.1 Base de datos de clima	33
2.1.1 Estimación de datos faltantes y cálculo de medias decenales	35
2.1.2 Interpolación de información	37
2.1.3 Generación del ajuste altotérmico	38
2.2 Base de datos de suelo	39
2.2.1 Profundidad del suelo	39
2.2.2 Muestreo de suelos	39
2.2.2.1 Conversión de coordenadas	41
2.2.2.2 Revisión y depuración de la información	41
2.2.2.3 Interpolación de información	42
2.2.2.4 Construcción de un mapa de clasificación textural	42
2.2.2.4.1 Definición de un sistema de coordenadas	43
2.2.2.4.2 Cálculo de los vértices de los polígonos (sobre eje X)	43
2.2.2.4.3 Construcción del archivo de polígonos, rasterización y vectorización	47
2.2.2.4.4 Preparación de los datos de arena, limo y arcilla del muestreo de suelo	47
2.2.2.4.5 Obtención del mapa de clasificación textural	47
2.3 Base de datos del relieve	48
2.4 Uso de suelo y procesamiento de imagen Landsat	49
2.4.1 Corrección del "bandeado" de la imagen	49
2.4.2 Georeferencia de la imagen	50
2.4.3 Corrección geométrica y Análisis de Componentes Principales (ACP)	50
2.4.4 Clasificación supervisada	50
2.2.2.4 Matriz de error espectral y real de la clasificación	50
2.4.5 Utilización de reglas de decisión para la obtención del mapa de uso/cobertura de suelo	52
2.4.6 Comparación entre la información 1996 y 2000 de Landsat TM	53
2.5 Evaluación Multicriterio (EMC)	54

2.5.1	Requerimientos ambientales de los cultivos	55
2.5.2	Entrevista con los expertos de cultivo. Construcción de la matriz de comparación pareada	57
2.5.3	Construcción de mapas factor, cálculo de pesos y obtención de mapas de áreas adecuadas por cultivo	59
2.5.4	Realimentación de la EMC	62
2.5.5	Cruzamiento de los mapas de uso de suelo y áreas adecuadas	63
CAPITULO 3. EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA INFORMACION Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS BASES DE DATOS		64
3.1	Procedimiento para la evaluación del MDT	65
3.2	Procedimiento para el Análisis Geoestadístico	65
3.3	Resultados de la evaluación de la calidad y variabilidad espacial de las Bases de Datos	67
3.3.1	Análisis de regresión de datos de altitud	67
3.3.2	Análisis Geoestadístico de las variables de clima y suelo	68
3.4	Consideraciones generales	74
CAPITULO 4. RESULTADOS		77
4.1	Base de datos de clima	77
4.2	Base de datos de suelo y relieve	79
4.3	Uso de Suelo Procesamiento de la imagen Landsat TM	81
4.3.1	Clasificación supervisada	81
4.3.2	Estimación de la exactitud de la clasificación	84
4.3.3	Aplicación de reglas de decisión y obtención del mapa de uso/cobertura de suelo	90
4.3.4	Comparación entre imagen 1996 y 2000	94
4.4	Evaluación Multicriterio (EMC)	99
4.4.1	Maíz	101
4.4.1.1	Requerimientos ambientales del cultivo	101
4.4.1.2	Identificación de las variables relevantes y prueba de no redundancia	104
4.4.1.3	Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos	104
4.4.1.4	Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor	107
4.4.1.5	Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo	109
4.4.2	Papa	112
4.4.2.1	Requerimientos ambientales del cultivo	112
4.4.2.2	Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos	114
4.4.2.3	Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor	116
4.4.2.4	Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo	117
4.4.3	Avena	121
4.4.3.1	Requerimientos ambientales del cultivo	121
4.4.3.2	Identificación de las variables relevantes y prueba de no redundancia	122
4.4.3.3	Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos	122
4.4.3.4	Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor	126
4.4.3.5	Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura	

de suelo.....	126
4.4.4 Haba.....	131
4.4.4.1 Requerimientos ambientales del cultivo.....	131
4.4.4.2 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos.....	131
4.4.4.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor.....	135
4.4.4.4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo.....	135
4.4.5 Amaranto.....	139
4.4.5.1 Requerimientos ambientales del cultivo.....	139
4.4.5.2 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos.....	140
4.4.5.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor.....	145
4.4.5.4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo.....	145
4.4.6 Nopal.....	149
4.4.6.1 Requerimientos ambientales del cultivo.....	149
4.4.6.2 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos.....	149
4.4.6.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor.....	154
4.4.6.4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo.....	154
CAPITULO 5. DISCUSION Y CONCLUSIONES.....	159
5.1 Base de datos de clima, suelo y relieve.....	159
5.2 Procesamiento de la imagen Landsat.....	163
5.3 Evaluación Multicriterio.....	167
5.3.1 Requerimientos ambientales relevantes.....	167
5.3.2 Pruebas de no redundancia y criterios relevantes.....	167
5.3.3 Divergencias entre áreas actuales y potenciales de cultivos.....	172
5.3.4 Estandarización fuzzy, estimación de pesos de criterios y el procedimiento de EMC.....	174
5.4 Conclusiones Generales.....	178
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	181
ANEXOS.....	191
1. Glosario de términos.....	191
2. Estaciones meteorológicas utilizadas.....	195
3. Medias decenales de variables climáticas por estación.....	197
4. Histogramas de los mapas de áreas adecuadas por cultivo.....	201
5. Artículo y cartas de aceptación de publicaciones producto de la investigación.....	208

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación entre los valores de temperatura máxima decenal (en°C) y los valores interpolados para varias estaciones meteorológicas	37
Tabla 2.2. Profundidad de suelo asociada a fases físicas.....	41
Tabla 2.3. Número de datos por variable utilizados en la interpolación	42
Tabla 2.4. Escala de valoración usada para la comparación pareada entre factores.....	57
Tabla 3.1. Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas teóricos para las variables de clima.....	68
Tabla 3.2. Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas teóricos para las variables de suelo	72
Tabla 4.1. Fases físicas y profundidad de suelo asociados a nivel de potencialidad.....	80
Tabla 4.2. Superficie (ha) y porcentaje por clase de textura de suelo.....	80
Tabla 4.3. Varianza por Componente Principal (CP) en las bandas de la imagen Landsat 1996.....	80
Tabla 4.4. Estructura interna de los Componentes Principales (CP) 1 y 2 según sus eigenvalores.....	82
Tabla 4.5. Número de píxeles muestrados por clase espectral para la clasificación supervisada.....	82
Tabla 4.6. Matriz de error espectral de la clasificación supervisada.....	85
Tabla 4.7. Matriz de error real de la clasificación supervisada de la imagen Landsat.....	89
Tabla 4.8. Superficie por clase de información del mapa de uso/cobertura de suelo en el DDR Toluca, México.....	93
Tabla 4.9. Comparación de superficie entre dos fechas para tres áreas inundables en el DDR Toluca, México.....	95
Tabla 4.10. Comparación de superficie entre dos fechas para cuatro ciudades en el DDR Toluca, México.....	95
Tabla 4.11. Comparación de superficie entre dos fechas en cinco sitios con áreas quemadas en el DDR, Toluca, México.....	95
Tabla 4.12. Requerimientos ambientales para el cultivo de Maíz.....	102
Tabla 4.13. Niveles generales por variable para el cultivo de Maíz.....	103
Tabla 4.14. Matriz de correlaciones de los criterios (factores) de Maíz. Valores de correlación (r).....	105
Tabla 4.15. Matriz de comparación pareada de criterios para Maíz.....	105
Tabla 4.16. Eigenvector de pesos de los criterios de Maíz.....	105
Tabla 4.17. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Maíz.....	107
Tabla 4.18. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Maíz.....	112
Tabla 4.19. Requerimientos ambientales para el cultivo de Papa.....	113
Tabla 4.20. Niveles generales por variable para el cultivo de Papa.....	115
Tabla 4.21. Matriz de comparación pareada de criterios para Papa.....	115
Tabla 4.22. Eigenvector de pesos de los criterios de Papa.....	117
Tabla 4.23. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Papa.....	118
Tabla 4.24. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Papa.....	121
Tabla 4.25. Requerimientos ambientales para el cultivo de Avena.....	123
Tabla 4.26. Niveles generales por variable para el cultivo de Avena.....	124
Tabla 4.27. Matriz de correlaciones de los criterios (factores) de Avena. Valores de correlación (r).....	124
Tabla 4.28. Matriz de comparación pareada de criterios de Avena.....	124
Tabla 4.29. Eigenvector de pesos de los criterios de Avena.....	127
Tabla 4.30. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Avena.....	127
Tabla 4.31. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Avena.....	130
Tabla 4.32. Requerimientos ambientales para el cultivo de Haba.....	132
Tabla 4.33. Niveles generales por variable para el cultivo de Haba.....	133

Tabla 4.34 Matriz de comparación pareada de criterios de Haba	133
Tabla 4.35. Eigenvector de pesos de los criterios de Haba	136
Tabla 4.36. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Haba.....	136
Tabla 4.37. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Haba	139
Tabla 4.38 Requerimientos ambientales para el Amaranto	141
Tabla 4.39. Niveles generales por variable para el Amaranto	142
Tabla 4.40. Matriz de comparación pareada de criterios de Amaranto.....	144
Tabla 4.41. Eigenvector de pesos de los criterios de Amaranto.....	144
Tabla 4.42 Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Amaranto	144
Tabla 4.43. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Amaranto.	148
Tabla 4.44. Requerimientos ambientales para el cultivo de Nopal	150
Tabla 4.45. Niveles generales por variable para el Nopal	151
Tabla 4.46 Matriz de comparación pareada de criterios para Nopal.....	153
Tabla 4.47. Eigenvector de pesos de los criterios para Nopal.....	153
Tabla 4.48. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Nopal.....	153
Tabla 4.49. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Nopal	158

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización del área de estudio. DDR Toluca, México	21
Figura 2.1. Diagrama metodológico general para la obtención de áreas adecuadas por cultivo	34
Figura 2.2. Diagrama empleado para procesar la base de datos de clima.....	36
Figura 2.3 Diagrama empleado para procesar la base de datos de suelo	40
Figura 2.4 Triángulo equilátero usado en el método geométrico para la construcción del mapa de clases texturales de suelos.....	44
Figura 2.5 Triángulo usado como base para calcular los valores de los vértices de los polígonos de las clases de textura	45
Figura 2.6. Diagrama del proceso empleado para realizar la Evaluación Multicriterio	56
Figura 3.1. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la precipitación	70
Figura 3.2. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la temperatura mínima	70
Figura 3.3. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la temperatura máxima	71
Figura 3.4. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la evaporación	71
Figura 3.5 Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del valor de pH del suelo.....	73
Figura 3.6 Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de arena del suelo.....	73
Figura 3.7. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de limo del suelo	75
Figura 3.8. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de arcilla del suelo.....	75
Figura 4.1. Mapa de uso/cobertura de suelo proveniente de Landsat TM en el DDR Toluca, México.....	92
Figura 4.2. Área inundable cercana a San Pedro Tultepec, México	96
Figura 4.3 Área inundable cercana a Almoloya del Río, México.....	96
Figura 4.4 Vista de tres áreas inundables en dos fechas diferentes (1996 y 2000).....	97
Figura 4.5 Vista de tres ciudades en dos fechas diferentes (1996 y 2000)	98
Figura 4.6. Vista de tres sitios con áreas quemadas en dos fechas diferentes (1996 y 2000)	100
Figura 4.7. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de maíz	108
Figura 4.8. Mapa de áreas adecuadas para maíz en el DDR Toluca, México	110

Figura 4.9. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de papa	119
Figura 4.10. Mapa de áreas adecuadas para papa en el DDR Toluca, México.....	120
Figura 4.11. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de avena.....	128
Figura 4.12. Mapa de áreas adecuadas para avena en el DDR Toluca, México	129
Figura 4.13. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de haba	137
Figura 4.14. Mapa de áreas adecuadas haba en el DDR Toluca, México	138
Figura 4.15. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de amaranto	146
Figura 4.16. Mapa de áreas adecuadas para amaranto en el DDR Toluca, México.....	147
Figura 4.17. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de nopal	155
Figura 4.18. Mapa de áreas adecuadas para nopal en el DDR Toluca, México	156

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1 Aspectos Generales

La agricultura es un sector muy importante en la economía de México, tanto en términos de producción como de empleo. Este sector representa alrededor de un 7% del Producto Interno Bruto (PIB) y una cuarta parte del empleo total (OCDE 1997). Es además la principal actividad generadora de empleos y de ingresos en las zonas rurales. La situación geográfica de México permite la producción de una gran diversidad de cultivos, desde los cultivos en zonas templadas hasta los cultivos tropicales. El maíz es el principal producto agrícola, tanto en valor como en términos de superficie cultivada, seguido por el azúcar, el frijol, el trigo y el sorgo. La papa, el amaranto y el nopal forman parte de los alimentos básicos en México. El café, los cítricos y otras frutas y hortalizas también son productos importantes sobre todo para exportación (OCDE 1997).

La situación actual del sector agrícola, puede ser caracterizada como una estructura compuesta por explotaciones comerciales, tradicionales (pobres pero con potencial comercial) y de subsistencia (muy pobres con casi ningún potencial comercial). Un pequeño número de explotaciones agrícolas comerciales (de más de 50 ha) proporciona una parte importante de la producción agrícola, mientras que un gran número de pequeñas explotaciones produce justo lo necesario para asegurar su propio consumo (OCDE 1997).

En este contexto, la agricultura mexicana ha enfrentado diversos obstáculos de índole físico, socioeconómico y político, que explican en gran medida el deterioro actual, que se manifiesta en bajos rendimientos por unidad de superficie, baja o nula rentabilidad y carencia de sustentabilidad productiva y ambiental. En estas condiciones el país se enfrenta a la apertura comercial ante Estados Unidos y Canadá, que en materia de producción agrícola superan con mucho a la agricultura mexicana (Tapia 1994).

El creciente rezago en el cumplimiento de la agricultura de ciertas funciones básicas para el desarrollo, el estancamiento en los volúmenes de producción y de la superficie cultivada, el insuficiente aumento en los rendimientos, la falta de competitividad que se expresa en la recesión de casi todos los productos agrícolas que fueron liberados, son rasgos del desempeño de la agricultura mexicana en los últimos años y que caracterizan la crisis del sector (Zermeño 1995).

Uno de los problemas de la agricultura, relacionado con los factores físicos de la producción, es el recurso de la tierra. La tierra como recurso básico para la agricultura ha disminuido paulatinamente no sólo en cantidad sino también en calidad. Este decremento en la cantidad de tierra como recurso básico se

explica por el aumento de usos alternativos, como la construcción de aeropuertos, urbanización, parques recreativos y parques industriales (Tapia 1994).

Además, durante las últimas décadas, la erosión y la salinización de los suelos, el agotamiento de los recursos en agua y la pérdida de la biodiversidad, han sido los principales efectos de la agricultura sobre el ambiente. En México, se estima que aproximadamente 80% de la tierra cultivable es sensible a la erosión del suelo, de la cual cerca de un 20% es extremadamente erosionable y no apta para el cultivo (OCDE 1997).

Por otra parte, se estima que en los próximos años la población aumentará hasta alcanzar los 125 millones en el año 2010 (Turrent y Aveldaño 1997). En este entorno la necesidad de producir una mayor cantidad de alimentos sigue vigente, es decir se mantiene el reto de producir más alimentos con recursos cada vez más limitados en cantidad y calidad

Para superar la crisis agrícola se deben de revertir todos los factores que la causaron: la relación de precios para garantizar una rentabilidad razonable; crédito suficiente, oportuno y barato; fomento de la producción de insumos productivos; ampliación y mejoramiento de la infraestructura hidráulica, caminera, energética y de almacenamiento; fomento a la investigación, difusión y enseñanza científico-tecnológica (OCDE 1997); racionalización de la apertura comercial para garantizar el desarrollo del sector agrícola nacional; apoyo a la comercialización interna, entre otros (Zermeño 1995)

Así, la agricultura está llamada a desempeñar un papel importante en la reactivación de la economía, por lo menos en tres vías: a) garantizar la seguridad alimentaria con la mayor autosuficiencia posible; b) conseguir su integración con los demás sectores de la economía; y c) generar divisas mediante la exportación de productos comerciales. En la transformación de la actividad agrícola, la tecnología tendrá que desempeñar un papel importante propiciando que el sector se constituya en una actividad eficiente, con mayor diversificación y más integrado con los sectores productivos (Del Valle y Solleiro 1994; Del Valle 1995)

En este contexto y en materia científica-tecnológica, el gobierno federal a través del INIFAP, inició una serie de estudios en todo el país para determinar el potencial productivo de las tierras de labor, para ubicar con precisión el nivel de potencial, de tal manera que se pueda buscar un reordenamiento del uso del suelo en función de las ventajas de producción de cada cultivo. Para que con la información generada en los estudios antes mencionados, se puedan determinar las zonas de alto, mediano y bajo potencial productivo por cultivo.

Asimismo, por parte del INIFAP, se han estudiado las posibilidades de aumentar los niveles de producción de diversos cultivos sin cambiar el uso actual de la tierra, estos estudios han incluido entre otros la estimación del potencial productivo actual de las tierras agrícolas (Turrent y Aveldaño 1997)

Dentro del ámbito previamente planteado, se llevó a cabo la presente investigación sobre la identificación de las áreas adecuadas para la agricultura, tomando el caso de los cultivos de maíz, papa, avena, haba, amaranto y nopal, en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) de Toluca, México. En esta investigación, un aporte metodológico importante es el uso de la Evaluación Multicriterio de los componentes relevantes del medio físico tales como: clima, suelo y relieve, además del procesamiento y uso de información satelital del tipo Landsat TM. Todo lo anterior en el ambiente de Sistemas de Información Geográfica

De este modo, en el resto de este Capítulo 1, se describe el marco general en el cual se desarrolló esta investigación, se establecen el objetivo general y los objetivos específicos y se hace una revisión de las disciplinas relacionadas con el presente trabajo como: Evaluación de tierras, Zonificación agrícola, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio (EMC)

En el Capítulo 2, se detalla la metodología seguida en esta investigación, iniciando con el procesamiento de las bases de datos de clima, suelo y relieve, incluyendo la generación del gradiente altotérmico y la obtención del mapa de clasificación textural, mediante un método geométrico propuesto en esta investigación. Asimismo se describe el procesamiento de la imagen Landsat TM, incluyendo la construcción de la matriz de error espectral y la matriz de error real, así como la comparación entre la información satelital de 1996 y 2000. Posteriormente, se describe la metodología seguida para realizar la EMC incluyendo la revisión bibliográfica de las variables ambientales más relevantes para los cultivos bajo estudio, la construcción de la matriz de comparación *pareada* y la estimación de pesos por criterio.

Después se describe el procedimiento seguido para la estandarización fuzzy y la obtención de los mapas criterio, mediante los cuales se obtuvieron los mapas de áreas adecuadas. Asimismo se detalla el proceso de realimentación de la EMC y finalmente el cruzamiento de los mapas de áreas adecuadas con el mapa de uso/cobertura de suelo proveniente del procesamiento de la información Landsat

Con relación al Capítulo 3, se incluye la evaluación de la calidad de la información de altitud, comparando dos fuentes de información, por un lado el MDT y por otro, los datos obtenidos de las cartas topográficas a escala 1:50,000 del área de estudio. En este capítulo también se incluye el análisis geoestadístico de las bases de datos de clima y suelo, para evaluar la variabilidad espacial de la información anterior.

El Capítulo 4 contiene los resultados obtenidos en esta investigación, en cuanto a las bases de datos de clima, suelo y relieve, así como del procesamiento de la información de Landsat, incluyendo el resultado de la exactitud obtenida en la clasificación supervisada. Posteriormente se describen los resultados de la EMC por cultivo, incluyendo la estimación de pesos de criterios mediante la matriz de comparación pareada, construcción de los mapas criterios mediante la estandarización fuzzy y la obtención del mapa de áreas adecuadas, así como el cruzamiento de este último mapa con el mapa de uso/cobertura actual de suelo.

La discusión de los resultados y conclusiones del presente trabajo, conforman el Capítulo 5, en el cual se discuten los resultados por cada sección y eventualmente se establecen algunas conclusiones específicas para cada apartado. Al final de ese capítulo, se incluyen las conclusiones generales de esta investigación.

Después se listan las referencias bibliográficas consultadas, las cuales abarcaron principalmente; libros, revistas técnicas especializadas, resúmenes de congresos nacionales y extranjeros y comunicaciones personales. También se considera una sección de Anexos, el primero de los cuales es un glosario de los términos más comúnmente usados, sobre todo en el área de la EMC. Otros anexos contienen información de las estaciones utilizadas en este estudio, así como los datos decenales promedio de precipitación, temperatura mínima y máxima para todas las estaciones. Además se detalla la información del número de píxeles y su porcentaje relativo y acumulado por valor de aptitud para cultivos, para cada uno de los mapas de áreas adecuadas obtenidos.

Al final del documento se incluye como anexo, la fotocopia de uno y las cartas de aceptación de dos artículos, que fueron ya aceptados para su publicación en diversas revistas de reconocido prestigio internacional y nacional.

1.2 Marco general de la investigación y objetivos

La agricultura es una de las actividades más importantes de explotación del sistema natural, explotación que debe ajustarse a las áreas aptas para esta actividad (García et al 2000). En este sentido es necesario evaluar la potencialidad del suelo, clima y relieve, para determinar la factibilidad agronómica de llevar a cabo, en zonas específicas, la actividad agrícola. Es decir, que la agricultura se realice en áreas con aptitud y potencial para ello, ya que por ejemplo, se estima que de las casi 8 millones de hectáreas que se siembran de maíz, menos de la mitad realmente tiene potencial productivo adecuado para una producción eficiente (Torres y Morales 1997). Además, la regionalización de las zonas agrícolas en base a

su potencial productivo, es básica porque permite definir las áreas en las cuales por su productividad, deben reforzarse las acciones de la generación y transferencia de tecnología (SARH 1994)

En esta investigación se partió de la premisa de que la identificación de áreas adecuadas para la actividad agrícola está determinada por la evaluación del clima, suelo y relieve, además de la identificación de las restricciones físicas locales. En este tipo de evaluaciones, están involucradas muchas variables y cada una de ellas debe de ser jerarquizada de acuerdo a su importancia relativa para el crecimiento óptimo de los cultivos. En esta investigación el tópico anterior fue expresado como un problema de decisión Mult-Criterio, ya que varios criterios con diferentes importancias relativas, deben de ser identificados y evaluados. Además a través de la combinación de EMC y SIG eventualmente un mapa o conjunto de mapas de aptitud puede ser generado (Joerin et al 2001). De tal manera que tal combinación parece útil para ayudar a la identificación de áreas adecuadas para cultivos

En el caso particular de México, la EMC ha recibido poca atención y no ha sido utilizada en aplicaciones agrícolas como valoración del medio físico para ubicar sitios de producción de cultivos, de este modo y en el contexto anteriormente planteado el objetivo general de la presente investigación es: Aplicar el enfoque de Evaluación Multicriterio bajo un ambiente de Sistema de Información Geográfica para identificar áreas adecuadas de cultivos, considerando variables relevantes de clima, suelo y relieve, con diferente resolución espacial y temporal, en el ámbito del Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, Estado de México. Para cumplir con el objetivo general anterior, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Preparar adecuadamente las bases de datos de clima, suelo y relieve mediante la revisión, depuración y estimación de la información faltante.
- Obtener los mapas de clima, suelo y relieve mediante el procesamiento de las bases de datos respectivas.
- Obtener el mapa de uso/cobertura actual del suelo, mediante el procesamiento de la imagen Landsat, usando algún procedimiento de clasificación supervisada. Evaluar la exactitud de dicha clasificación mediante la construcción de las matrices de error espectral y real.
- Identificar de acuerdo a la revisión bibliográfica exhaustiva y al conocimiento agronómico local, las variables relevantes del medio físico en la definición de áreas adecuadas para cultivos.
- Construir el conjunto adecuado de criterios, en términos de naturaleza y número, para realizar la EMC
- Estimar la importancia relativa de cada criterio, a través de la construcción de la matriz de comparación pareada para cada evaluación.
- Construir tanto los mapas criterio, como los mapas restricción, necesarios para llevar a cabo la EMC.

- Obtener los mapas criterio estandarizados mediante algún método que permita la estandarización tanto de mapas continuos como categóricos
- Mediante el uso del software idóneo, llevar a cabo la EMC para obtener los mapas de áreas adecuadas para cada cultivo. Realizar la realimentación correspondiente para verificar y validar los resultados obtenidos de acuerdo con los expertos locales.
- Obtener los datos de áreas adecuadas para cada cultivo, diferenciadas por nivel de aptitud.

Adicionalmente, es oportuno mencionar que la presente investigación no es un estudio convencional de evaluación de tierras o de zonificación agroclimática, ya que este tipo de estudios poseen metodologías particulares para su realización. Sin embargo, dado que dichas áreas del conocimiento, están relacionadas con esta investigación, a continuación se hace una revisión del marco conceptual de dichas disciplinas. Además se hace una revisión actualizada de las principales definiciones y conceptos de los SIG y la EMC, que dan soporte teórico a la presente investigación.

1.2.1 Evaluación de tierras

En muchos países, las áreas agrícolas están siendo usadas con una intensidad creciente para cumplir con las necesidades de alimento, de la población en constante crecimiento. Las altas demandas de alimento requieren de la optimización en el uso de los recursos naturales disponibles, los dos aspectos más importantes en este asunto son, la tierra y la población y la relación entre ambas tiene un impacto no solo en la producción de alimentos y desnutrición, sino también en la disputa por la tierra, degradación ambiental, migración y conflictos políticos (Kutter et al. 1997), de tal modo que la tierra también se está convirtiendo en un recurso escaso (Bronsveld et al. 1994).

La utilización óptima de la tierra es hoy más necesaria que nunca, puesto que el rápido crecimiento de la población y la expansión urbana ocasionan que se disponga de cada vez menos tierras para la agricultura. De este modo se demanda de una mayor intensificación en la producción de cultivos sin perjuicio para el ambiente, lo cual sólo puede satisfacerse si la tierra se usa de conformidad con su aptitud para diferentes tipos de utilización (FAO 1985).

La utilización de los recursos naturales, a la vez que constituye una de las formas de producción social, implícitamente también conlleva a la modificación de las condiciones ambientales originales (Duch et al. 1981). Así, la estimación del potencial del suelo con fines agrícolas está determinada por la evaluación del clima, suelo y relieve (Baca et al. 1992; Kutter et al. 1997), lo cual incluye también el suministro de agua para los cultivos y la disponibilidad de las tierras (Hallet et al. 1996). Además también

deben de identificarse las limitantes del medio físico para los procesos agrícolas (Duch et al. 1981; Baca et al. 1992)

Esa estimación del potencial de la tierra involucra también el análisis e interpretación de las variables del medio físico (vegetación, topografía, clima, etc), para que se cumplan adecuadamente con los requerimientos de los cultivos (Ahamed et al. 2000). Sobre todo, se ha reconocido la relevancia de los factores climáticos, cuyo conocimiento y caracterización para la producción de cultivos, resulta crítico especialmente para la agricultura de temporal (Díaz et al. 2000). Esa estimación del medio natural 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).

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).

Para realizar la estimación de la potencialidad de las tierras, se han utilizado diversos enfoques como: evaluación de tierras de acuerdo a los estándares de FAO (Ortíz 1984; De Zuviría y Valenzuela 1994; Kutter et al. 1997; Bydekerke et al. 1998), la estimación de la capacidad productiva de los suelos (Merolla et al. 1994), evaluación de tierras usando el sistema de clasificación de capacidades de la tierra (enfoque norteamericano) (Duch et al. 1981), clasificación de capacidad de uso de suelo (enfoque británico), sistema numérico francés y otros (Ngowi y Stocking 1989)

La evaluación de tierras es la valoración de la explotación de la tierra cuando se utiliza con propósitos específicos. En este sentido, ofrece una base racional para tomar decisiones relativas al uso de la tierra basadas en el análisis de las relaciones entre la utilización de la tierra y la tierra misma (FAO 1985)

Asimismo, el sistema de evaluación de tierras se concibe como el conjunto de conceptos y procedimientos de trabajo que permiten: a) recabar, analizar y ordenar la información relativa a las condiciones ambientales que conforman una determinada superficie territorial, b) interpretarla en términos de las alternativas de uso agrícola, pecuario y forestal que permite, c) representarla mediante la elaboración de documentos cartográficos que muestren los resultados (Duch et al. 1981)

La evaluación de tierras con el método FAO, establece que el potencial de las tierras depende de las condiciones tanto bio-físicas, como de las socio-económicas. Sin embargo la dificultad de estimar simultáneamente ambas condiciones, ha derivado en la recomendación de un enfoque en dos etapas, primero cubriendo la evaluación física y después el análisis socio-económico en el cual se incluyan las

aspectos institucionales y legales (Kutter et al. 1997), ya que la información disponible es escasa sobre todo para el análisis socio-económico (Merolla et al. 1994)

Uno de los principios en que se basa el esquema de evaluación de tierras es que se necesita un método multidisciplinario, además de los especialistas en la propia evaluación de tierras. Las disciplinas que se necesitan en un estudio de evaluación son: estudio de suelos, agroclimatología, geomorfología, conservación de suelos, agronomía, uso de tierras, sistemas de explotación, economía y sociología (FAO 1985)

El proceso de evaluación de tierras no determina por sí mismo los cambios en el uso de la tierra que deberían adoptarse, pero facilita los datos que permitan tomar esas decisiones, ya que el objetivo principal de la evaluación de tierras es poner a disposición del usuario, se trate del agricultor, el planificador, el funcionario del gobierno o cualquier otro, la información adecuada referente a los recursos de las tierras y su uso más adecuado. Dicha información es necesaria para adoptar decisiones de planificación, desarrollo y ordenación (FAO 1985).

La planeación del uso del suelo es una herramienta de ayuda a los tomadores de decisiones gobiernos o productores, a usar la tierra de modo tal que los problemas del uso actual de la tierra sean reducidos y los objetivos específicos sociales, económicos y ambientales sean satisfechos (por ejemplo sustentabilidad, autosuficiencia alimentaria, generación de ingreso y conservación del ambiente) (Bronsveld et al 1994).

Una de las ventajas de los estudios de evaluación de tierras con los métodos descritos es que pueden producir resultados muy precisos, de acuerdo a la escala que se realicen, dada la gran cantidad de datos de suelo y ambiente que utilizan, sin embargo presentan algunas posibles desventajas como: a) la dificultad de participación e integración de todas las disciplinas involucradas o relacionadas con el uso del suelo (Bronsveld et al. 1994; Kutter et al. 1997), b) la dificultad que implica en tiempo y dinero, la obtención, el análisis e integración de diferentes conjuntos de datos, c) algunas de esas metodologías han sido desarrolladas para resolver problemas muy distintos a los que se presentan en las diferentes regiones de nuestro país (Duch et al. 1981).

Muchos nuevos métodos y herramientas han sido desarrollados recientemente y pueden contribuir a mejorar la calidad de las evaluaciones de las tierras, estos métodos cubren: 1) la participación de usuarios locales, 2) posibilidades para integrar mejor diferentes conjuntos de datos, 3) procesamiento de datos más rápido y eficiente y nuevos métodos de presentación de resultados. Lo anterior puede ser hecho mediante la modelación, manejo de bases de datos, programación lineal, percepción remota y

procesamiento de datos en SIG. Aunque "confiar" en los SIG puede ser peligroso, ya que los SIG pueden producir resultados muy atractivos, basados en datos de entrada de "pobre" calidad o confianza (Bronsveld et al. 1994)

Estudios más elaborados incluyen un análisis económico. Recientemente los modelos de simulación de crecimiento de cultivos y los SIG han sido también usados con el propósito de realizar evaluaciones más cuantitativas (Kutter et al. 1997). En algunos de esos estudios se han utilizado las herramientas convencionales de los SIG, tales como la reclasificación y sobreposición de coberturas digitales (De Zuviría y Valenzuela 1994), aunque asumiendo que todas las variables en estudio tienen la misma importancia relativa, lo cual en la realidad puede no ser cierto.

1.2.2 Zonificación agroclimática

Por lo que respecta a los estudios de zonificación agroclimáticos, las metodologías y enfoques utilizados han sido múltiples (Duch et al. 1981; Salcedo y Larios 1987; Baca et al. 1992; Ritter et al. 1999; Díaz et al. 2000; Caldiz et al. 2001)

Según Salcedo y Larios (1987), el método de una regionalización agrícola consta de varias fases: a) estudio de las condiciones geográfico-naturales, b) estudio y análisis del uso de la tierra, c) regionalización agrícola preliminar, d) análisis de la técnica en las unidades productivas, e) sistematización y análisis de la información y f) regionalización agrícola definitiva.

Por otra parte Baca et al. (1992), señalan que una etapa dentro de una regionalización agrícola implica el análisis de los elementos naturales que intervienen como condiciones para la producción, a saber: la fisiografía, el clima, y el tipo de suelo. Este análisis debe hacerse en relación a la agricultura, de tal manera que se permita ubicar a los factores naturales favorables y los limitantes para los procesos agrícolas.

Una característica de este tipo de estudios, es el hecho de que no consideran una jerarquización de las variables en estudio y suponen que todas ellas tienen la misma importancia relativa en la definición de las áreas potenciales de los cultivos, lo cual en la realidad, no es necesariamente cierto. Aún en las implementaciones de los estudios anteriores hechas con Sistemas de Información Geográfica (SIG) (De Zuviría y Valenzuela 1994; Kutter et al. 1997; Bydekerke et al. 1998; Caldiz et al. 2001), no se ha tomado en cuenta, esa importancia relativa de las variables bajo evaluación.

1.2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección

La historia del uso de las computadoras para el mapeo y análisis espacial muestra que ha habido desarrollos paralelos en varios aspectos como: captura automatizada de datos, análisis de datos y presentación de los mismos, en varios campos de aplicación, tales como: catastro y mapeo topográfico, cartografía temática, ingeniería civil, geología, geografía, hidrología, estadística espacial, ciencia del suelo, fotogrametría, planeación rural y urbana, redes de servicios e infraestructura, sensores remotos y análisis de imágenes.

Consecuentemente ha habido duplicidad de esfuerzos en disciplinas diferentes, lo cual ha traído como consecuencia el surgimiento de los SIG (Burrough y McDonell 1998) Además sin duda, el desarrollo en la tecnología computacional ha sido el factor más importante para el rápido desarrollo de los SIG (Longley et al 1999). Existe una gran cantidad de definiciones de los SIG, sin embargo mostramos a continuación las más representativas:

Walsh (1985): Sistemas que integran coberturas o capas de información orientadas espacialmente, ya sea manual o automáticamente.

Smith et al. 1986 (citado en López Blanco 1998): Un sistema de base de datos en el cual la mayoría de ellos están indexados espacialmente y sobre los cuales un conjunto de procedimientos son aplicados con el fin de responder a las consultas acerca de las entidades espaciales en dicha base.

Cowen 1988 (citado en Maguire et al. 1991): Un sistema de apoyo para la toma de decisiones, el cual involucra la integración de datos referenciados espacialmente en la solución de problemas del medio ambiente.

Parker (1988): Una tecnología de la información la cual almacena, analiza y despliega datos espaciales y no espaciales.

Aronoff (1989): Cualquier conjunto de procedimientos manuales o basados en computadora, usados para almacenar y manejar datos geográficamente referenciados.

Bosque (1992): Tecnología informática para gestionar y analizar información espacial

Davis (1996): Se refiere a un conjunto de tres aspectos: relaciones espaciales del mundo real, uso y manejo de datos e información y la tecnología computacional.

DeMers (1997): Son herramientas que permiten el procesamiento de datos espaciales en información, la cual es usada para tomar decisiones acerca de una porción de la Tierra

Burrough y McDonnell (1998): Es un poderoso conjunto de herramientas para coleccionar, almacenar, recuperar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para un particular conjunto de propósitos

Fotheringham (2000): Son sistemas que proporcionan herramientas muy poderosas para el análisis espacial. Tales sistemas proporcionan una forma para almacenar, manejar y mapear grandes volúmenes de datos espaciales

Brown (2001): Es un sistema diseñado para almacenar, analizar, desplegar y manejar datos e información espacial acerca de sitios específicos

Jankowski y Nyerges (2001): Es una tecnología de la información que puede ser potencialmente explotada, para la toma de decisiones espaciales basada en computadora

Como se puede observar a partir de las definiciones previas, el concepto de SIG ha cambiado desde sus inicios, desde lo que se consideraba como sistemas que integraban coberturas de información ya sea de forma manual o automática, hasta considerarlos como poderosas herramientas con varias funciones, incluyendo la transformación y análisis de datos para un conjunto diverso de propósitos

En general las definiciones se enfocan en dos aspectos básicos del sistema: la tecnología y la resolución de problemas (Malczewski 1999)

Actualmente se considera que los SIG tienen tres componentes fundamentales: el hardware, el conjunto de módulos de aplicación (software) y un adecuado contexto organizacional, incluyendo personal capacitado. Estos tres componentes deben estar en balance, si se quiere que el sistema funcione adecuadamente (Burrough y McDonnell 1998). En este contexto, el SIG es una interacción entre el hardware y software, que se vuelve útil solo cuando es adecuadamente ubicado en una organización y es apoyado por usuarios expertos, estructura de datos adecuadas y por cambios organizacionales efectivos (Bernhardsen 1999)

El vertiginoso ritmo de desarrollo de la tecnología computacional ocasiona que se vuelvan obsoletas en corto tiempo las consideraciones acerca del hardware, sin embargo hoy en día, cuando se habla de este componente del SIG, se menciona que los principales dispositivos de que se dispone son: digitizador y escáner (para la entrada digital de información), graficador e impresora (para la salida o impresión de resultados), dispositivos de almacenamiento como disco duro, drive de CD-ROM y la unidad central de proceso, la cual puede estar conectada a redes locales o externas

Además, el software de un SIG, puede ser dividido en cinco grupos funcionales: a) entrada y verificación de datos, b) almacenamiento de datos y manejo de la base de datos, c) presentación y salida de datos, d) transformación de datos y e) interacción con el usuario (Burrough y McDonnell 1998).

En cuanto a los datos que utilizan, existen varias tendencias de hacia donde se dirigen los SIG, una de ellas establece que, los SIG deben de ser aquellos que integren datos provenientes de sensores remotos con otros tipos de datos o procesos de datos que ya hayan sido depurados y transformados. Otra tendencia es que los SIG van a estar fuertemente asociados con trabajos y aplicaciones que integren la multidisciplinaria (Longley et al. 1999)

Además las tendencias en la tecnología del hardware indican que no solo se va a mantener el ritmo de las innovaciones que permiten tener hardware más poderoso (más rápido) y más barato, con menor tamaño, sino que se esperan cambios sorprendentes en la tecnología para la construcción de los procesadores, lo cual va permitir aumentar considerablemente la velocidad de proceso, lo que se conoce como "flash technology", además de las mejoras en las interfaces gráficas con el usuario

Otra tendencia, es el uso de las herramientas de Internet como el WEB, que permite el intercambio de información multimedia, lo que puede conducir a los software de SIG en convertirse en módulos "reusables" ensamblados y compartidos via Internet por diferentes usuarios ubicados en diferentes lugares. También se están dirigiendo esfuerzos para el desarrollo de módulos de software y datos en lo que se ha llamado SIG de "desktop", en general se observa que lo anterior es solo una fase de transición hacia el uso de Internet como la principal plataforma de los SIG (Longley et al. 1999).

Asimismo, los SIG han sido utilizados para múltiples aplicaciones en diversas disciplinas 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).

Como una tecnología, los SIG pueden ser vistos a través de tres etapas importantes. La primera, es el uso de los SIG como una base de datos de información, un medio de coordinación y acceso de datos geográficos. La segunda y más reciente, es el uso de los SIG como una herramienta analítica, una forma de especificar relaciones lógicas y matemáticas entre mapas de coberturas, es decir modelación y la tercera es el uso de los SIG como un sistema para el apoyo en la toma de decisiones, una forma de decidir como hay que actuar, una vez que el análisis ha sido hecho (Eastman et al. 1995)

Por otra parte, el termino teledetección se deriva de la traducción francesa "teledetection" al término anglosajón "remote sensing". Se entiende por teledetección "la adquisición de información sobre

un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador (López y Caselles 1991). Un ejemplo de sensor remoto es el ojo, pues permite obtener información de nuestro entorno sin necesidad de tocarlo. La teledetección parte del principio físico de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, ondas de presión, campos gravitacionales) que el sistema observado produce en el medio, la cual se transmite al sistema receptor para ser registrada, almacenada y posteriormente interpretada.

En un sentido amplio, la teledetección puede incluir el registro de diversas formas energéticas, sin embargo, la radiación electromagnética es el medio más usado en ella. Existen muchas otras definiciones, sin embargo la mayoría de las definiciones incluye los siguientes aspectos: a) la adquisición de información sin entrar en contacto material con el objeto, b) a través de sensores localizados en plataformas de observación, c) centrada en las regiones del espectro electromagnético, d) incluyen la transformación de los datos obtenidos en información útil por medio de técnicas de interpretación y reconocimiento de las superficies. Así, el principal reto con que se enfrenta la teledetección es la transformación de los datos de magnitudes físicas registrados por el sistema receptor en información útil para los diferentes usuarios (López y Caselles 1991).

Las aplicaciones de la teledetección en la agricultura están caracterizadas por varios elementos como: las etapas fenológicas de los cultivos, el manejo del suelo, aspectos económicos y otros que reunidos aseguran que la teledetección aún más refinada que la actual, tiene y va a continuar teniendo un papel muy importante en el monitoreo de las actividades agrícolas (Allan 1990).

Además, ha medida que crece la demanda de información espacial, crece también la complementariedad que existe entre la teledetección y los SIG, hay principalmente tres formas en las que esas dos tecnologías son complementarias: a) la teledetección puede ser usada como una herramienta para coleccionar los conjuntos de datos a usar en el SIG, b) los conjuntos de datos provenientes de SIG, pueden ser usados como información de campo para mejorar los productos derivados de la teledetección y c) la teledetección y los datos de SIG, pueden ser usados juntos en el análisis y modelamiento ambiental (Wilkinson 1996).

En la presente investigación la teledetección sirvió como una herramienta para procesar información que fue posteriormente usada en la EMC bajo el ambiente de SIG.

1.2.4 Evaluación Multicriterio (EMC) y su integración con los SIG

La toma de decisiones es la más importante actividad humana, intrínseca en nuestro comportamiento y hecha tanto consciente como inconscientemente. Tomar una decisión es no solo una cuestión de seleccionar la mejor alternativa. Ha menudo en la asignación de los recursos es necesario priorizar todas las alternativas con las que se cuenta. Partir un problema en sus componentes, en una plataforma de jerarquías y estableciendo la importancia o prioridad para jerarquizar alternativas es una forma entendible y general para ver un problema desde el punto de vista matemático. Este tópico ha sido llamado genéricamente como la toma de decisiones multicriterio (Saaty 1996).

Las nociones de la toma de decisiones multicriterio aparece junto con los avances de la investigación de operaciones después de la Segunda Guerra Mundial (Starr y Zeleny 1977). En este sentido la toma de decisiones multicriterio se puede entender como un conjunto de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los tomadores de decisiones a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios (Barredo 1996).

Las técnicas de análisis multicriterio convencionales, en las que se basan las decisiones multicriterio, han sido no espaciales (debido a su origen y aplicación en disciplinas como la administración y economía entre otras) y asumen que hay una homogeneidad espacial, lo cual es claramente irreal (Malczewsky 1999).

Por otra parte, el análisis multicriterio espacial, involucra la evaluación de eventos geográficos basados en calificaciones y preferencias de los tomadores de decisiones con respecto a un conjunto de criterios de evaluación (Malczewsky 1999). Dada la naturaleza de la presente investigación, el interés principal del análisis multicriterio estará referido siempre a su carácter espacial.

Asimismo, existe una amplia divergencia en la terminología existente en las ciencias de la administración/decisión y en el campo de la investigación de operaciones (Eastman et al. 1995) de donde provienen muchos de los conceptos utilizados en el análisis multicriterio. En la presente investigación se utilizan los conceptos definidos por Eastman et al. (1995).

La EMC basa su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas y de criterios. Un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas a partir de los criterios que hayamos considerado pertinentes en una evaluación (Barredo 1996). El fin básico de las técnicas de EMC es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos contrapuestos (Voodg 1983). El objetivo de usar modelos de EMC es ayudar a

encontrar soluciones a problemas de decisión que se caracterizan por alternativas de elección múltiples, las cuales pueden ser evaluadas mediante el desempeño de características llamadas criterios de decisión (Jankowski et al. 2001)

La EMC es tanto una plataforma conceptual, como un conjunto de técnicas de distinta complejidad, diseñadas para guiar una elección de una forma consistente con las preferencias de los usuarios. La EMC es un enfoque útil que puede incorporar una mezcla de información cuantitativa y cualitativa, tomando en cuenta las preferencias de las personas o grupos interesados (Qureshi et al. 1999)

El punto de partida de cualquier toma de decisiones en una EMC es la generación de un conjunto de alternativas discretas y la formulación de un conjunto de criterios que conforman una matriz de evaluación (Easton 1973; Starr y Zeleny 1977; Jankowski 1995; Fulong 1998)

Podemos pensar que la mejor forma de organización para representar la relación de criterios y alternativas que define la EMC es una matriz. En esta matriz, los criterios (j) pueden ocupar la columna principal y las alternativas (i), la fila principal. Dicha matriz recibe varios nombres: matriz de puntuaciones, matriz de efectividad, matriz de proyecto-efecto, o bien matriz de evaluación (Voogd 1983)

Los valores internos de esta matriz son llamados puntuaciones de criterios (ij) y representan el valor o nivel de deseabilidad que ha obtenido cada alternativa en cada criterio. Siendo a partir de ahí que los distintos métodos de EMC basan todo su funcionamiento intrínseco para lograr la evaluación de las alternativas (Barredo 1996)

Además, la regla general para la selección de los criterios a evaluar, es que estos deben ser definidos en relación al problema específico por resolver. De este modo los criterios deben de ser identificados y definidos de tal manera que describan el problema lo más cercano posible, sin embargo lo anterior puede llevar a considerar una gran cantidad de criterios. Por otra parte, el problema puede ser descrito por un pequeño número de criterios, aunque esto puede llevar a una sobre simplificación del problema, esta situación es común cuando no hay datos disponibles o su calidad no es la adecuada, en todo caso un balance entre los extremos antes descritos es lo deseable.

Asimismo el conjunto de criterios debe de poseer algunas propiedades que representen adecuadamente la naturaleza multicriterio del problema a evaluar. Entre algunas otras como: entendible, medible, completo, operacional, mínimo, el conjunto de criterios deben de cumplir con el requisito de noredundancia (independencia) entre ellos, para evitar el problema de la doble evaluación (Malczewsky 1999). Dependiendo de la técnica de análisis multicriterio usada, los niveles de los criterios pueden ser

agregados en un formato no-estandarizado (niveles en bruto) o en formatos estandarizados (niveles estandarizados) (Jankowski 1995).

Aunque en muchos análisis, especialmente en aquellos con datos cuantitativos y cualitativos, es necesaria alguna forma de estandarización, para poder hacer comparaciones que tengan algún significado, sobre la base de criterios medidos en diferentes escalas de origen (Carver 1991).

Por otra parte, una vez constituida la matriz de evaluación, otro aspecto a tomar en cuenta es la importancia relativa de cada criterio frente al tipo de evaluación que se pretenda realizar. Se requiere asignar un valor específico a cada criterio, de acuerdo a su nivel de importancia relativa, este valor recibe el nombre de peso o ponderación (w_j) (Voogd 1983), los cuales pueden ser expresadas en un vector normalizado de pesos (Jankowski 1995).

En cualquier EMC, los pesos relativos de los criterios juegan un papel muy importante, de hecho, el establecimiento de pesos a los criterios, es un problema crucial en los métodos multicriterio (Malczewski 1996). Los pesos son asignados de acuerdo a la importancia relativa de los criterios incluidos en la evaluación (Malczewski 1999; Tiwari et al. 1999) y es una práctica usual considerar que la suma de todos los pesos sea igual a la unidad (Massam 1980). Los pesos pueden ser estimados a través de entrevistas, análisis comparativos o análisis estadísticos de experimentos (Starr y Zeleny 1977).

Es menester decir que, existen varios métodos para la asignación de los pesos de los criterios, uno de los más comúnmente usados e incluso implementados en el software de SIG, es el método de comparación par con par, desarrollado por Saaty (1980), para sus estudios de Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ). El PAJ ayuda a estructurar un problema de una manera jerárquica, a la vez que permite la valoración de las preferencias entre diferentes usuarios para obtener varios posibles resultados con respecto a una evaluación en particular (Peterson et al. 1994; Qureshi et al. 1999; Schmoldt et al. 2001).

Indudablemente en muchas aplicaciones de EMC del mundo real, es incierta la validez de los esquemas de jerarquización (estimación de pesos) usados, por lo que es necesaria alguna prueba de análisis de sensibilidad para tomar en cuenta la incertidumbre en la definición de los pesos a los criterios (Carver 1991; Jankowski 1995).

Una vez establecida la matriz de evaluación, es posible acceder a algunos de los procedimientos de EMC ya sea del tipo compensatorio (sumatoria lineal jerarquizada, índice de concordancia generalizada, análisis de punto ideal, etc.) o no compensatorio para la asignación de valores a cada alternativa (Jankowski 1995).

Dos aspectos básicos de la EMC en el entorno de los SIG son: decisión y alternativa. Una decisión es una selección entre alternativas (o posibilidades de elección), las cuales pueden representar diferentes cursos de acción, hipótesis, localizaciones u otros conjuntos de elementos (Eastman et al. 1995).

En el entorno de los SIG, las alternativas están representadas por objetos o unidades espaciales, celdas en el modelo raster (píxeles), o polígonos, líneas o puntos en el modelo vectorial. Es decir, representan un sitio individual, constituyendo así la capa temática de objetos espaciales.

Cabe destacar la enorme cantidad de alternativas que pueden darse a partir de una capa temática. En el caso de una capa en un modelo raster de 150 filas y 150 columnas, se tendrían 22,500 alternativas (ya que la información de cada píxel, ha sido evaluada y ponderada, esta consiste en sí misma, una alternativa de acción).

Este aspecto puede ser determinante en el uso de algunos métodos de EMC, específicamente en los basados en la comparación de pares de alternativas. Eso plantea un problema de implementación de los procedimientos en los actuales sistemas de cómputo, ya que son rebasados con creces en cuanto a su capacidad operativa para resolver problemas de este tipo.

La selección de un método de EMC, en particular tiene que ver con la naturaleza de los datos, el número de alternativas a evaluar, la complejidad del procedimiento, la experiencia en EMC, el conocimiento del objeto de estudio, el software disponible, entre otras consideraciones.

Un método puede ser adecuado para resolver un problema en particular, pero tal vez su implementación metodológica sea complicada, de tal modo que un problema puede ser resuelto, aplicando más de un método. La elección del método de EMC y el enfoque para la integración con SIG depende del tipo de modelo de datos usado en SIG. En un SIG raster, cada celda individual es considerada como una alternativa a escoger y por lo tanto es candidata para la evaluación (Malczewsky 1999). El número de celdas en la mayoría de los mapas raster hace impráctico el uso de técnicas intensivas de análisis multicriterio basadas en la comparación, par con par, de todas las alternativas, como el análisis de concordancia (Eastman et al. 1995).

En este caso uno puede pensar que la técnica de sumatoria lineal jerarquizada es una técnica de multicriterio útil y práctica para un SIG raster (Eastman et al. 1995; Jankowski 1995). En dicha técnica, cada mapa factor estandarizado (es decir, cada celda raster dentro de cada mapa), es multiplicada por el peso del factor en cuestión, y entonces se suman los resultados. El resultado final es multiplicado por cada una de las restricciones (en forma de mapas), para dejar fuera las áreas que no deben de evaluarse. Así

entonces, dicha técnica multicriterio fue utilizada en la presente investigación, la cual está implementada en IDRISI (Eastman 1999a)

En relación con las ventajas de los métodos EMC podemos destacar las siguientes:

- 1) Permiten obtener una clasificación examinable de información objetiva, lo que ofrece mayores posibilidades de ampliar las fronteras del conocimiento del problema en estudio
- 2) Permiten integrar de modo coherente y práctico un aspecto de suma importancia en la planificación, como son los diferentes enfoques frente a un mismo problema.
- 3) Ofrecen la posibilidad de lograr una considerable reducción de la información inicial disponible, resumiendo en un solo conjunto de datos más pequeño las principales características de la información inicial respecto al problema planteado, pudiendo así ofrecer soluciones, o bien utilizar este nuevo conjunto de datos como entrada para un nuevo proceso.
- 4) Permiten tomar decisiones de un modo más coherente, basadas en el principio de la multidimensionalidad de criterios y puntos de vista, ayudando el proceso de toma de decisiones, acerca de problemas espaciales complejos (Barredo 1996).

Algunas desventajas son:

- 1) Ciertos aspectos de los métodos de EMC, pueden ser técnicamente muy complejos, lo cual puede generar que sean poco comprensibles para no expertos en el campo de la evaluación. Dichos métodos, en ocasiones, no son fácilmente implementables en los actuales sistemas de cómputo y en los paquetes de SIG disponibles en el mercado.
- 2) Un factor de gran relevancia, es el riesgo de que los métodos de EMC sean utilizados como una justificante científica sobre las decisiones ya tomadas (Carver 1991), ya sea por la complejidad de algunos procesos o por el indebido uso de los métodos, escalas de medida, criterios, o algunos otros aspectos de su aplicación (Barredo 1996)

Por los beneficios que otorgan, en cuanto a mejorar el proceso de toma de decisiones acerca de problemas espaciales complejos, las ventajas superan a las desventajas. Sin embargo, la complejidad de uso y la falta de una plataforma adecuada de aplicación representa una barrera para el éxito y el incremento de las implementaciones de los métodos MCE en las tareas de evaluación y asignación espacial (Carver 1991)

En el contexto anteriormente planteado, se puede decir que los SIG son muy útiles para el almacenamiento, proceso y manejo de base de datos espaciales (Aronoff 1989) En la mayoría de los SIG las capacidades de análisis espacial se basan principalmente en la habilidad para realizar sobreposición

determinística y operaciones "buffer" Tales habilidades si bien son ideales para realizar búsquedas basadas en mapas criterios nominales, son de uso limitados cuando son considerados criterios y objetivos múltiples y contrapuestos

Algunas de las limitaciones de la sobreposición determinística de mapas digitales son:

- 1) Es difícil de entender cuando más de cuatro factores están involucrados
- 2) La mayoría de los procedimientos de sobreposición no permiten reconocer el hecho de que las variables pueden no ser igualmente importantes

Las limitaciones anteriores pueden ser superadas con el uso del análisis multicriterio Este enfoque parece mejor porque:

- 1) Está diseñado para trabajar con muchos criterios.
- 2) Son tomadas en cuenta las diferencias en la importancia entre los diferentes criterios (Janssen y Rietveld 1990)

De este modo, la integración de técnicas analíticas diseñadas para trabajar con problemas multicriterio pueden proporcionar al usuario herramientas más funcionales dentro del SIG (Carver 1991; Malczewski 1999) Además esta integración puede ser útil para resolver situaciones de conflictos para individuos o grupos interesados (Malczewski 1996), sobre todo en el contexto espacial (Janssen y Rietveld 1990)

En las dos últimas décadas, las técnicas de toma de decisiones multicriterio han experimentado un crecimiento espectacular (Gupta et al 2000) El análisis multicriterio ha sido considerado como un enfoque apropiado para estudiar el impacto de diferentes políticas para el manejo ambiental y los recursos naturales (Qureshi et al. 1999), la toma de decisiones económico ambientales (Tiwari et al. 1999) y la estimación de la aptitud de la tierra como una herramienta de planeación para el diseño de patrones de uso de suelo que prevengan conflictos ambientales (Bojórquez et al 2001).

Sin embargo los estudios de aplicación en algunas áreas han sido escasos, las razones detrás de esto son: algunos métodos multicriterio requieren información que es difícil obtener en el mundo real, algunas veces la complejidad de las formulaciones matemáticas desalienta a los posibles usuarios y generalmente el grado de desarrollo prevaleciente en las instituciones no es favorable para su aplicación Tal es el caso de los problemas de decisión en la planeación agrícola que también involucran criterios múltiples, contrapuestos y en donde una decisión "satisfactoria" es buscada (Gupta et al 2000)

1.3 Descripción del área de estudio

1.3.1 Generalidades

El área de estudio es el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Toluca, México (Figura 1.1). El cual se localiza entre los paralelos 19°01' y 19°31' N y entre los meridianos 99°15' y 99°57' W. Colinda al norte con el DDR de Atlacomulco, al Noreste con el DDR de Zumpango, al Este con el Distrito Federal, al Sur con el DDR de Coatepec Harinas y al Oeste con el DDR de Valle de Bravo. Los límites del DDR Toluca se tomaron de la cartografía oficial disponible, la cual fue la carta geográfica escala 1:250,000 de 1995 publicada por el IGECM (Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México). El DDR Toluca consta de 24 municipios, en los cuales eventualmente se podrían aplicar los resultados de esta investigación, ya que en todos ellos se realizan actividades agrícolas.

Desde el punto de vista geomorfológico el área está considerada como 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 (López-Blanco y Zambrano 2002).

El área es una planicie lacustre-aluvial con pendientes suaves, localizada en la parte alta de la cuenca del Río Lerma. En el extremo sur del DDR, corre el río Zacango, el cual se origina con los escurrimientos del 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 rango de altitud varía entre 1,800 a 4,640 msnm.

Dentro del ámbito del Estado de México, una de las zonas con mayor importancia dentro de la actividad agrícola es el Distrito de Desarrollo Rural, Toluca. Dicha área, 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), 21,091 ha (6.9%) son de agricultura de riego, 81,124 ha (26.8%) son de uso forestal, 8,530 ha (2.8%) corresponden a áreas erosionadas, 15,268 ha (5.0%) de zonas urbanas (incluyendo uso industrial) y el resto para otros usos.

1.3.2 Cultivos considerados

En esta investigación se consideraron los cultivos de mayor importancia en el ámbito del DDR Toluca. El orden en el cual se estudiaron dichos cultivos fue definido en base a dos criterios; primero se consideraron los cultivos actualmente explotados y después se describieron los cultivos de alternativa, como el caso de amaranto y nopal. Para el caso de los cultivos actuales, el otro criterio usado fue el de importancia tanto en superficie sembrada como económica. De este modo el orden de los cultivos bajo

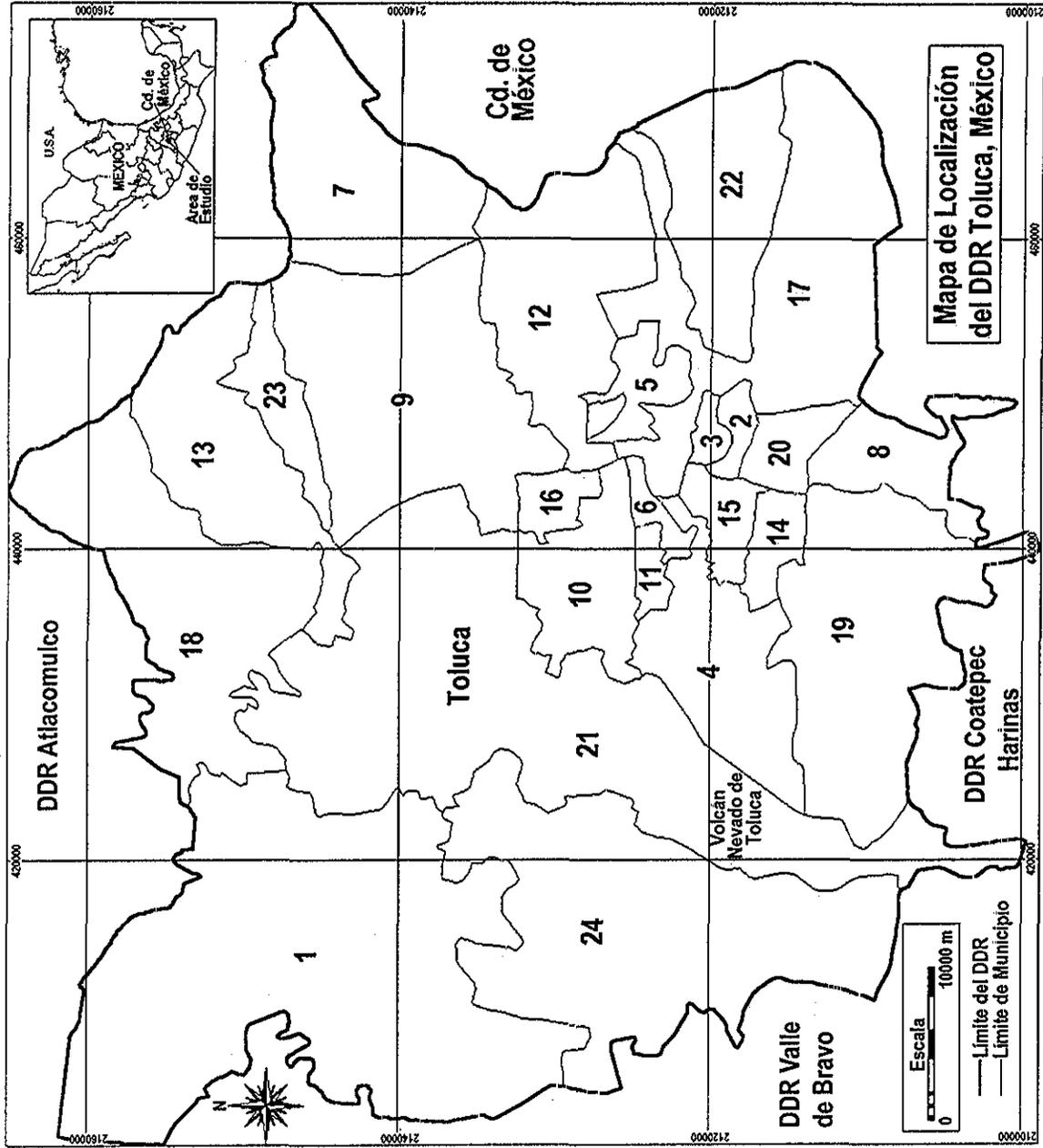


Figura 1.1. Localización del área de estudio. DDR Toluca, México. Las claves por municipios son: 1=Almoloya de Juárez, 2=Almoloya del Río, 3=Atizapan, 4=Calimaya, 5=Capulhuac, 6=Chapultepec, 7=Huixquilucan, 8=Jocuingo, 9=Lerma, 10=Metepac, 11=Mexicalcingo, 12=Ocoyoacac, 13=Otzolotepec, 14=Rayón, 15=San Antonio la Isla, 16=San Mateo Atenco, 17=Santiago Tianguistenco, 18=Temoaya, 19=Tenango del Valle, 20=Texcalyacac, 21=Toluca, 23=Xonacatlan, 24=Zinacantepec.

estudio fue: maíz, papa, avena, haba, amaranto y nopal.

El maíz (*Zea mays* L.) tiene una cobertura nacional ya que se disponen de un gran número de materiales criollos, variedades e híbridos que se adaptan a la mayoría de las condiciones del medio físico presentes en nuestro país (Aragón 1995). Es uno de los cereales más importantes para consumo humano y animal, por lo que se cultiva para grano y para forraje (Dorembos y Kassam 1979). Esta planta ha tenido una enorme importancia en México desde tiempo muy remotos, hasta la fecha se han reconocido muchas razas, las cuales incluyen gran número de formas que se caracterizan por el color, tamaño y volumen. Existen indicios que ubican al continente americano como el centro de origen del maíz, se consideran como posibles puntos a: México, Guatemala, Colombia, la región andina (Perú, Ecuador, Bolivia), y las tierras bajas de Paraguay, Uruguay, Argentina y Brasil. Sin embargo, existen suficientes elementos documentales que indican que México fue el centro primario de origen, domesticación y dispersión del maíz hace más de 6 mil años. Asimismo, la topografía accidentada de nuestro país define zonas geográfico-ecológicas perfectamente delimitadas, lo que contribuyó a la diferenciación racial del maíz. Actualmente existen aproximadamente entre 25 y 30 razas bien delimitadas, producto de 4,000 años o más de evolución (INEGI 1997).

En cuanto a la superficie ocupada, el maíz es el cultivo anual más importante en el Estado de México. La siembra de maíz en esa entidad durante el año agrícola del 2000, se realizó principalmente en el ciclo Primavera-Verano con 588,001 ha y 461 ha que se sembraron durante el ciclo Otoño-Invierno. La producción total de este cultivo en ese año, fue de 1,716,036 toneladas (SAGARPA 2000). En el DDR Toluca, el cultivo de maíz es el más importante. Para el año 2000 se sembraron 118,305 ha de temporal, que representan el 38.9% de la superficie total del área de estudio, con una producción de 406,883 ton que representan el 23.7% de la producción estatal (SAGARPA 2000).

La papa (*Solanum tuberosum* L.) procede originalmente de los Andes en América del Sur (Fabiani 1967; Dorembos y Kassam 1979), de zonas tropicales de altitud elevada, en donde se han encontrado tubérculos de diversas formas, con una antigüedad cercana a los 4,500 años. El cultivo se produce en todo el mundo, pero es de especial importancia en los climas templados (Dorembos y Kassam 1979). En el estado de México, de acuerdo con SAGARPA (2000), se sembraron 7,807 ha, de las cuales 5,667 se sembraron en condiciones de temporal y 2,140 ha en condiciones de riego. La producción total para ese año fue de 173,134 ton. En el DDR Toluca, la papa es un cultivo importante y de tradición, la superficie sembrada en el ciclo Primavera-Verano del 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 42,918 ton, con un

rendimiento medio de 20.5 ton/ha y un valor de la producción de \$98,710,480 (SAGARPA 2000). Lo cual resalta la importancia económica de este cultivo en el área de estudio.

Por otra parte, el cultivo de avena (*Avena sativa* L.), en el estado de México, durante el año agrícola (incluyendo Primavera-Verano y Otoño-Invierno) del 2000, se sembraron 41,866 ha, de las cuales 36,422 ha (87%) se sembraron en condiciones de temporal, el resto, es decir 5,464 (13%) fue sembrado en áreas de riego, con un rendimiento medio de 19.7 ton/ha (riego y temporal) y una producción de 828,149 ton. En el DDR Toluca, se sembraron en el ciclo Primavera-Verano 2000, 4,324 ha de temporal, con un rendimiento medio de 30.2 ton/ha de forraje verde y una producción de 130,801 ton (SAGARPA 2000).

Otro cultivo actual en el área de estudio, aunque de menor importancia, es el de haba (*Vicia faba* L.) que es una planta que sirve como fuente alimenticia ya que se consume en verde o grano, empleándose para la elaboración de diferentes alimentos. El haba se siembra en regiones temporales de los estados de Tlaxcala, México, Puebla, Hidalgo, Michoacán, Veracruz y Guanajuato, así como en los alrededores del D.F. (Aragón 1995). De este cultivo, en el Estado de México se sembraron en el año agrícola 2000, 4,182 ha, de las cuales 2,730 ha se sembraron en condiciones de temporal y el resto, 1,453 ha se sembraron en condiciones de riego, en ese ciclo se produjeron 23,568 ton, con un rendimiento medio por hectárea de 5.6 ton (SAGARPA 2000). Para ese mismo año en el DDR Toluca, en condiciones de temporal, se sembraron durante el ciclo Primavera-Verano 2000, 1,050 ha con este cultivo con una producción de 3,780 ton y un rendimiento medio de 3.6 ton/ha (SAGARPA 2000).

Uno de los cultivos planteados como de alternativa en este estudio, es el amaranto (*Amaranthus spp*) el cual tiene gran tradición e importancia alimentaria desde la época prehispánica, pero olvidado durante varios siglos (Reyna 1986). Los primeros indicios del amaranto en México indican que desde mucho tiempo antes de la Conquista, esta planta tenía usos alimenticios, ya se que recolectaban las hojas y semillas de plantas silvestres (Espitia 1986), esta planta es considerada como otra más que México aportó al mundo (Suárez 1988). Diversas tribus indígenas del Noroeste y Centro del país conocieron y aprovecharon el grano y hojas en su alimentación (Gómez 1986). En la actualidad ha mostrado un alto grado de adaptación en regiones climáticas muy variadas del país, la porción oriental de la Mesa Central, es una de las regiones en las que con más frecuencia se ha cultivado el amaranto por su importancia étnica, industrial y comercial (Reyna 1986). En la región central de México, el cultivo juega un papel de importancia económica y permanece como fuente potencial de germoplasma susceptible de ser aprovechada para la producción de granos a través de la agricultura tradicional o tecnificada (Gómez

1986) Diversos centros de investigación están tratando de rescatar del olvido este cultivo que constituye un importante componente en la dieta de muchos pueblos (Reyna y Granados 1987) Este cultivo se considera como un tesoro nutricional debido a que su proteína, contiene casi el doble de la lisina que tiene el trigo, el triple de la del maíz y más aún de la que contiene la leche (Reyna y Flores 1987).

De los centros de producción, el más relevante es el que abarca parte del Distrito Federal, donde se localizan importantes sitios productores como Tulyehualco (Gómez 1986), Milpa Alta y San Gregorio, estos sitios se encuentran en la zona térmica templada y reciben precipitaciones entre 700 y 800 mm al año. Otros centros de producción se encuentran en los estados de Morelos, Puebla, Tlaxcala y Estado de México en localidades ubicadas en la zona templada con precipitaciones de hasta 1200 mm al año (Reyna 1986). Además este cultivo también se conoce en Oaxaca, Michoacán, Jalisco, Colima, Tamaulipas, Sinaloa, San Luis Potosí, Nuevo León y Chihuahua (Sánchez 1988) Asimismo el amaranto ha sido empleado para la alimentación animal, utilizándose como forraje (fresco y ensilado), paja, grano crudo, y cocinado, grano germinado y otros (Cervantes 1988) El alto valor nutritivo de la semilla de amaranto, sus potencialidades agrícolas y de industrialización lo hacen una excelente alternativa para la agricultura y la alimentación en México (Espitia 1986; Espitia 1991)

En el Estado de México para el año agrícola 2000, se sembraron 350 ha, con una producción de 1,460 ton y un rendimiento medio de 4.2 ton/ha (SAGARPA 2000) En el DDR Toluca no hay información estadística reportada sobre la siembra de amaranto, en este contexto, y dadas las enormes cualidades y ventajas de este cultivo, el objetivo de realizar la EMC es explorar el potencial del mismo como una alternativa de producción de los cultivos anuales actualmente explotados en el área de estudio

Otro cultivo de alternativa planteado en este estudio, es el Nopal. Los nopales son plantas ampliamente distribuidas en el territorio mexicano, que desempeñan una función importante en la alimentación de los habitantes de algunas zonas áridas y semiáridas, además de que la economía de algunas regiones se basa en este fruto. Los aztecas conocían el nopal, que fue la primera cactácea introducida a Europa por los conquistadores (Aragón 1995). Las cactáceas se cultivan cada vez más por sus frutos así como también para usarlas como vegetales y forraje (Nobel 1995) El género *Opuntia* spp, se localiza prácticamente en la mayoría de las condiciones ecológicas existentes en la República Mexicana. Constituye comunidades con características fisonómicas específicas, que forman el tipo de vegetación denominada matorral crasicaula que ocupa cerca de 3 millones de ha distribuidas en los estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Hidalgo, Chihuahua, Tamaulipas, Durango y Aguascalientes. Los nopales tienen un enorme potencial para ser industrializados en colorantes, caucho

sintético, alcohol, anticorrosivos y papel. Además son empleados como especie ornamental para interiores, debido a las características fisonómicas que presenta. El cultivo de nopal puede ser un recurso importante en la economía rural y de las zonas áridas, por los altos rendimientos que se pueden obtener de tuna, si se siembra en superficies que no cuentan con una precipitación pluvial adecuada para el cultivo de otras especies más exigentes en cuanto al consumo de agua y a las condiciones de suelo (Aragón 1995). Estimaciones hechas en el Estado de México indican que existen 140,000 ha propicias para el cultivo de nopal, con precipitaciones anuales de 370 a 550 mm (Borrego y Burgos 1986). En el DDR Toluca, no se han reportado oficialmente plantaciones de este cultivo por parte de la SAGARPA, sin embargo en el área de estudio existen plantaciones de traspatio, como límites parcelarios o a las orillas de los caminos. El objetivo de realizar la EMC de este cultivo, es explorar su potencial en el área de estudio, sobre todo en aquellas áreas con condiciones extremas o limitantes para otros cultivos.

1.3.3 Clima

Por la ubicación del estado de México en la zona intertropical, la temperatura en general debería ser alta, sin embargo la altitud modifica esa condición y contribuye a que prevalezcan temperaturas moderadas en gran parte del estado (INEGI 2001). Las condiciones de temperatura y precipitación han dado lugar al predominio de climas templados en poco más de la mitad del territorio estatal. En menor proporción se encuentran los climas semi-fríos localizados en los cerros y serranías por arriba de los 3,000 m de altitud y el clima frío en la cima de los volcanes incluyendo el Volcán Nevado de Toluca.

El área de estudio, está dominado por tres tipos climáticos:

1) Templado sub-húmedo con lluvias en verano $C(w_2)(w)$. Este clima es el más húmedo de los templados sub-húmedos, su precipitación invernal, es decir la que ocurre en enero, febrero y marzo, corresponde a menos del 5% de la lluvia total anual. Este tipo de clima se encuentra en terrenos cuya altitud va de 1,800 a 2,700 m, en los cuales la precipitación total anual es mayor de 700 mm y la temperatura media anual varía de 12 a 18°C (INEGI 2001). Este clima es característico principalmente de la zona conocida como Valle de Toluca.

2) Semi-frío sub-húmedo con lluvias en verano, $C(E)(w_2)(w)$. Este clima es el más húmedo de los climas semi-fríos sub-húmedos, su precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal es menor del 5%. Comprende algunas porciones de la Sierra de las Cruces y del Nevado de Toluca, con altitudes mayores a 2,500 y menores de 4,000 m. Se distribuye en las partes altas de los municipios de Toluca, Zinacantepec, Calimaya, Lerma y Huixquilucan. La precipitación total anual en estas

zonas es mayor a 800 mm y la temperatura media anual varía de 5 a 12°C (INEGI 2001).

3) Frío E(T) H Este tipo de climas se caracteriza por tener una temperatura media entre -2 y 5°C y un régimen térmico medio del mes más caliente entre 0 y 6 5°C. En este clima, la temperatura media del mes más caluroso (abril) es de 5 8°C Este clima comprende la parte alta del Volcán Nevado de Toluca y se asocia a comunidades vegetales del tipo de alta montaña. En este tipo de clima, la precipitación total anual es de 1,243 mm en promedio; el mes más húmedo es julio con 270 mm y el mes más seco es diciembre con 17 2 mm (INEGI 2001) Por otra parte, las heladas ocurren cuando la temperatura más baja del día, por lo regular al amanecer, es igual o inferior a 0°C ocasionando frecuentes daños a los cultivos. Las primeras heladas en las montañas y en los valles intermontanos se registran generalmente después de la segunda quincena de octubre. La mayor frecuencia se produce en diciembre, enero y febrero, sin embargo, en marzo todavía tienen una gran influencia en altitudes superiores a 2,700 m (INEGI 2001)

La mayor frecuencia de heladas (100 a 140 días al año) se presentan en las estribaciones del Volcán Nevado de Toluca. Las zonas con menor cantidad de heladas se localizan al norte y noreste (en parte de los municipios de Xonacatlán, Temoaya y Oztolotepec) y al poniente de Zinacantepec con una frecuencia anual entre 40 y 60. La mayor parte del DDR Toluca corresponde a la frecuencia anual de heladas de entre 80 y 100, incluyendo a la ciudad de Toluca (Serrano 1993).

Las granizadas no guardan una pauta de comportamiento definida, aunque se encuentran asociadas a los períodos de precipitación. La mayor incidencia del fenómeno se registra en los meses de junio, julio y agosto. En el clima templado se registra una frecuencia de granizo entre 0 y 12 días. En el clima semi-frío el fenómeno se produce de 12 a 18 días al año. El clima frío presenta un rango de granizadas mayor de 18 días al año (INEGI 2001)

1.3.4 Vegetación

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). Los bosques de coníferas son la vegetación predominante en los sistemas montañosos, se localizan masas puras de una sola especie o en asociaciones. En el Nevado de Toluca y en la Sierra de las Cruces, crecen *Pinus patula*, *Pinus montezumae* y *Pinus michoacana*. En la colindancia con otros tipos de vegetación se forma el bosque mixto, como el caso donde se da la mezcla de pino (*Pinus*) con encinos (*Quercus*) y oyamel (*Abies*).

El bosque de pino es una comunidad siempre verde que constituye un recurso forestal por

excelencia, se trata de poblaciones que tienen un crecimiento relativamente rápido, muchos de ellos son resistentes a las sequías y soportan el pastoreo, además, los bosques de pino tienen una estructura muy homogénea pues generalmente las poblaciones se componen de unas cuantas especies, lo que facilita las tareas de explotación. La vegetación está formada por diferentes especies de pino que alcanzan una altura promedio de 15 a 30 metros. Los pinares tienen un estrato inferior relativamente pobre en arbustos, pero con abundancia de gramíneas amacolladas (INEGI 2001). Gran parte de estos bosques se asientan en las partes altas del Volcán Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces, a altitudes entre 2,500 y 4,000 m; crecen preferentemente sobre suelos profundos tipo Andosol, la precipitación en estos lugares es superior a 1,000 mm anuales y la temperatura se mantiene entre 8 y 12°C, estas condiciones son propias de los climas semi-fríos sub-húmedos con lluvias en verano (INEGI 2001).

El bosque de pino-encino se localiza en las serranías del Volcán Nevado de Toluca, en lugares cuya altitud varía de 2,000 a 3,000 m, se desarrollan sobre suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario, en su mayoría del tipo Andosol, Cambisol y Luvisol. La precipitación promedio de esos lugares fluctúa de 1,000 a 1,500 mm anuales, la temperatura media anual va de 10 a 20°C, la mayor parte de esta vegetación se encuentra en los climas templados sub-húmedos con lluvias en verano (INEGI 2001).

El bosque de oyamel está conformado por árboles altos, a veces mayores de 30 m. Las masas arboladas pueden estar conformadas por elementos de la misma especie o mixtos, acompañados de diferentes especies de coníferas; algunos bosques son densos, sobre todo en condiciones libres de disturbio, pero debido al fuerte impacto que provocan las actividades humanas, su área se encuentra en constante disminución, para dar lugar a espacios agrícolas o pecuarios. Estos bosques se localizan cubriendo pequeñas superficies de las laderas y cañadas húmedas del Volcán Nevado de Toluca y Sierra de las Cruces; se desarrolla a altitudes entre 2,400 y 3,400 m, prospera en suelos de tipo Andosol y Cambisol con profundidad variable, bien drenados, ricos en materia orgánica y húmedos durante buena parte del año. Los climas donde se encuentran estos árboles es semi-frío sub-húmedo y con menos frecuencia templado sub-húmedo con lluvias en verano, con precipitaciones anuales en promedios que fluctúan de 1,000 a 1,400 mm, con temperaturas muy frescas en el año, de 7 a 14°C en promedio. Este bosque está dominado por elementos arborescentes del género *Abies* (INEGI 2001).

En el estrato arbóreo mayor de 20 m, se puede encontrar: *Abies religiosa* (oyamel), *Quercus crassipes* (encino), *Quercus laurina* (encino laurelillo), *Pinus montezumae* (ocote blanco), *Alnus firmifolia* (aile) y *Cupressus lindleyi* (cedro blanco).

El bosque de encino es una comunidad boscosa dominada por diferentes especies del género *Quercus* (encinos), los árboles pueden alcanzar desde 4 hasta más de 30 metros de altura. En la región, este tipo de vegetación se localiza en las laderas y pendientes de la Sierra de las Cruces, en suelos de tipo Feozem, de profundidad variable, ricos en materia orgánica o bien en suelos clasificados como Luvisoles. Este tipo de bosque se adapta a varios climas desde los templados sub-húmedos hasta los semi-cálidos y semi-fríos sub-húmedos. La temperatura media oscila entre 12 y 24°C, con una precipitación anual de 700 a 1200 mm (INEGI 2001). En la Sierra de las Cruces, se encuentran *Quercus mexicana* y *Quercus laurina*.

El bosque de cedro es una comunidad dominada por árboles del género *Cupressus* de gran porte, con una altura superior a los 15 m, comparte características ecológicas con los géneros *Pinus*, *Abies* y *Quercus*, con quienes frecuentemente se mezcla. En general son formas de vida en proceso de desaparición cuya madera es muy apreciada por la gran demanda que tiene en el mercado, por lo que este bosque se encuentra en pequeñas áreas en la Sierra de las Cruces. Los climas en los que se desarrolla corresponden al templado y semi-frío sub-húmedo con lluvias en verano; su altitud varía de 2,700 a 3,200 m, la temperatura media va de 12 a 14°C, su precipitación fluctúa de 800 a 1000 mm y prospera en suelos tipo Andosol (INEGI 2001).

El pastizal de alta montaña, también llamado matorral alpino o pradera de alta montaña, se extiende en lugares fríos a altitudes que varían desde los 3,600 a 4,500 msnm (IIIGEC 1993). Es la forma de vida que se desarrolla a partir del límite altitudinal superior al bosque de coníferas. Está compuesto por asociaciones de gramíneas que crecen con aspecto de pradera, amacollado (zacatonal) o arrossetado, con una altura menor a un metro (INEGI 2001). Las especies más conocidas son *Agrostis tolucensis*, *Eryngium proteiflorum*, *Arenaria bryoides*, *Calamagrostis tolucensis*, *Lupinus montanus*, y *Muhlenbergia montana* entre otras (IIIGEC 1993). Este tipo de vegetación crece en las partes altas del Volcán Nevado de Toluca, se desarrolla en suelos de tipo Andosol, en climas fríos con temperatura media entre 2 y 6°C y una precipitación de 1,000 a 1,500 mm (INEGI 2001).

De acuerdo con SAGAR (1998), la superficie ocupada por los bosques (el principal componente de la vegetación natural), es de 81,124 ha, que representan el 26.8 % de la superficie total del DDR Toluca. Actualmente en muchas de las áreas boscosas, se realizan actividades agrícolas principalmente con los cultivos de papa y avena.

1.3.5 Suelos

En el DDR Toluca, los tipos de suelos que predominan son: Andosol, Feozem, Vertisol, Cambisol, Luvisol, Litosol, e Histosol

El suelo Andosol, es propio de áreas sujetas a actividad volcánica reciente, se deriva de cenizas volcánicas, poseen una capa superficial color negro o muy oscuro. Entre sus características destacan: su capacidad para retener el fósforo que no puede ser absorbido por las plantas, tener un pH ácido y ser muy susceptibles a la erosión. Estas condiciones no lo hacen muy adecuado para la actividad agrícola. En general los andosoles son esponjosos y de textura media (contenido de arcilla y arena menor de 35% y 65%, respectivamente), el drenaje interno que presentan va de drenado a muy drenado. Para su mejor conservación deben ser usados con fines forestales (INEGI 2001). Se distribuyen sobre sierras volcánicas donde generalmente se encuentran asociados a feozems, en lugares donde el clima es templado y templado semi-frío. La vegetación principal que sustentan está constituida por bosque de pino-encino, pino, oyamel-pino, y algunos son utilizados en agricultura de temporal (INEGI 2001).

Las limitantes físicas más severas para su uso y manejo de este tipo de suelos son: un estrato rocoso a menos de 50 cm de profundidad, pedregosidad y en varios casos las pendientes muy abruptas, aunque también existen áreas de suelos profundos sin limitante alguna. Los rendimientos de los cultivos agrícolas están condicionados a la alta capacidad de estos suelos a retener el fósforo, por lo que las plantas cultivadas pueden tener deficiencias de este elemento (INEGI 2001). Se localizan principalmente en las partes altas tanto del Volcán Nevado de Toluca (Figura 1.1), así como en la Sierra de las Cruces.

El suelo tipo Feozem, se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes, la formación de estos suelos es generada en gran medida por el intemperismo de las rocas de origen ígneo extrusivo. En general, la clase textural de los feozems es media y su drenaje interno varía de drenado a moderadamente drenado. Las limitantes físicas para su uso y manejo son la presencia de una capa lítica (rocosa) o dúcica (tepetate) a menos de 50 cm de profundidad. Su susceptibilidad a la erosión es leve en las zonas planas y moderada en laderas con pendientes más fuertes. Estos suelos se localizan en climas templados, y la vegetación natural que sustentan está constituida por bosques de encino-pino, pastizal natural e inducido. En terrenos planos y profundos se practica la agricultura de temporal y riego (INEGI 2001). En el DDR Toluca, se localizan principalmente en la parte central (cubriendo parcialmente el valle) y en áreas hacia el sur del municipio de Almoloya de Juárez (Figura 1.1).

Los vertisoles son suelos de origen aluvial y residual, formados a partir de rocas sedimentarias clásticas y rocas ígneas extrusivas. Tienen más de 30% de arcilla expandible (montmorillonita principalmente), en todos los horizontes que se encuentran a menos de 50 cm de la superficie. Debido a esta condición, presentan agrietamiento en el período seco del año, son duros cuando están secos y pegajosos en húmedo. El comportamiento de la textura arcillosa provoca dificultades en la labranza, sobre todo mal drenaje en época de lluvias (problemas de inundación). Su drenaje interno varía de escasamente drenado a muy escasamente drenado y tienen baja susceptibilidad a la erosión. Estos suelos se distribuyen sobre lomeríos, laderas con poca pendiente, llanuras con piso rocoso y algunos vasos lacustres, donde están asociados con feozems. El clima en estas áreas es templado y su uso actual está constituido por agricultura de temporal con cultivos anuales, agricultura de riego y pastizales inducidos. Es recomendable usar estos suelos para el cultivo del maíz (INEGI 2001). Este tipo de suelo se localiza principalmente en el norte y noroeste del área de estudio, rodeando las presas Alzate y Ramírez y en una pequeña porción del municipio Lerma (Figura 1.1).

El suelo Cambisol se caracteriza por ser joven, poco desarrollado, variable en estructura como consecuencia de la intemperización, tiene una capa en el subsuelo que parece roca, en ella se forman terrones. En gran medida la formación de estos suelos se debe al clima, pues son característicos de zonas de transición climática. La textura dominante de los cambisoles es media, con drenaje interno drenado y susceptibilidad a la erosión de moderada a alta. Las limitantes físicas que pueden presentar para su uso y manejo son: profundidad limitada por un estrato rocoso a menos de 50 cm y pendientes abruptas (mayores de 15%). Estos suelos se encuentran sobre topografías de sierras, cañadas, lomeríos y laderas en las que sustentan vegetación constituida por pastizal inducido, bosques y agricultura de temporal (INEGI 2001). Este tipo de suelo puede proporcionar rendimientos de moderados a altos en la agricultura (Serrano 1993) y se ubican en pequeñas porciones al noreste del DDR Toluca.

El Luvisol, es un suelo de alta susceptibilidad a la erosión y sustentan vegetación de bosque. La formación de estos suelos se debe básicamente a las condiciones de alta humedad existentes en la zona y al material parental, por lo que su origen es generalmente residual. En el DDR Toluca estos suelos están asociados a cambisoles en áreas con climas templado, con vegetación de bosque de pino-encino y pastizal inducido. La susceptibilidad a la erosión va de moderada a muy alta, por lo que se recomiendan para uso forestal (INEGI 2001). Se localizan hacia el norte en la colindancia con el DDR de Atlacomulco y al este de los municipios de Xonacatlan, Lerma y Ocoyoacac (Serrano 1993)(Figura 1.1)

Los Litosoles son suelos muy someros (menores de 10 cm de profundidad) limitados por un estrato duro y continuo (fase lítica) o por tepetate. La delgada capa que se presenta se caracteriza por su clase textural media. La formación de este tipo de suelos es de origen residual, a partir de rocas ígneas extrusivas, su espesor está condicionado a la pendiente ya que ésta influye directamente sobre la escasa acumulación de los materiales edáficos, y son muy susceptibles a la erosión. Además de la limitante que representa para su uso y manejo la profundidad, también están las pendientes donde se encuentran, así como la pedregosidad y los afloramientos rocosos superficiales (INEGI 2001). En el DDR Toluca se localizan en pequeñas áreas dispersas al Oeste de Tenango del Valle, al sureste de Texcalyacac, al norte de Capulhuac y otras (Serrano 1993)(Figura 1.1).

La formación los Histosoles, es básicamente de origen lacustre y presentan uno o varios horizontes extremadamente ricos en materia orgánica. Son característicos de zonas donde se acumula el agua y gran cantidad de desechos de plantas que tardan mucho en descomponerse (zonas pantanosas o lechos de antiguos lagos) y generalmente muestran acumulación de salitre. Determinar la textura de estos suelos es difícil, debido a que están compuestos más de materia orgánica que mineral. Las limitantes para su uso y manejo son la inundación y el contenido de sales. En este tipo de suelos se pueden obtener excelentes rendimientos con cultivos de hortalizas, dependiendo del grado de influencia de las limitantes antes mencionadas (INEGI 2001). En el DDR Toluca, estos suelos se encuentran en las cercanías de Almoloya del Río y San Pedro Tultepec, al este de la ciudad de Toluca (Figura 1.1).

1.3.6 Hidrología

La principal corriente que drena el área de estudio es el río Lerma, el cual constituye uno de los sistemas hidrológicos más importantes de país, recorre un total de 1,180 km desde su origen hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. De este modo el río Lerma constituye una de las corrientes superficiales más importantes de la cuenca Río Lerma-Toluca, puede decirse que tiene su origen en los manantiales que alimentaban una laguna ubicada en el municipio de Almoloya del Río, esta laguna fue una de las más altas de un conjunto de tres que descendían hacia el norte para encausar sus aguas al río Lerma. Los afluentes de dicho río son: por la margen derecha el arroyo Sila-San Bartolo, río Temoaya y arroyo Muerto-Ocoyoacac, y por la margen izquierda el río San Pablo, río Verdiguél, arroyo Agua Bendita y arroyo Las Cruces (INEGI 2001).

El cauce del río Lerma se interrumpe por la presa José Antonio Alzate, marcando el límite entre el curso alto y medio de la cuenca, el río recorre 37 km desde su origen antes de llegar a la presa antes

mencionada (Serrano 1993). El impulso de la industrialización en la entidad ha ocasionado cambios desfavorables en los recursos hidrológicos de esta cuenca, cuyo problema de contaminación es considerado de primer orden y de control inmediato (INEGI 2001) Aproximadamente el 60% de las aguas residuales provenientes de las zonas industriales de Toluca, Lerma, Ocoyoacac y Santiago Tianguistenco son vertidas al río Lerma. El tramo comprendido desde el nacimiento de éste, hasta la presa José Antonio Alzate, presenta un alto grado de contaminación y se encuentra en condiciones sépticas durante todo el año, asimismo, se ha convertido en una laguna de estabilización con graves problemas de contaminación por metales pesados, detergentes e infestación de maleza acuática, lo que ha desencadenado un impacto negativo en la economía y en la salud de la población. En términos generales, el río Lerma se constituye más que en un río, en un colector público de aguas residuales sin signos de vida acuática y con repercusiones negativas a la ecología de la zona (INEGI 2001).

En cuanto a los cuerpos de agua, destacan las presas Antonio Alzate e Ignacio Ramírez. La primera de ellas está localizada en el municipio de Temoaya y es abastecida principalmente por el Río Lerma y otros escurrimientos menores provenientes del municipio de Temoaya. Esta presa se ubica en el norte del DDR y es de carácter permanente. La presa Ignacio Ramírez se localiza al oeste de la anterior, en el municipio de Almoloya de Juárez, la abastece el río La Gavia, así como otras corrientes superficiales provenientes de las estribaciones del Volcán Nevado de Toluca, al igual que la presa Alzate, ésta es de carácter permanente y su uso es en el control de avenidas y abastecimiento de agua para fines agrícolas del DDR Atlacomulco (Serrano 1993).

En el área de estudio existen una gran cantidad de pequeños bordos en parte del municipio de Almoloya de Juárez y norte de Zinacantepec, algunos bordos son de carácter permanente y en ellos se realizan actividades de acuicultura, también sirven de abrevaderos e incluso permiten la irrigación de pequeñas áreas agrícolas. De acuerdo con SAGARPA (2000), la superficie agrícola irrigada en el DDR Toluca, es de 21,091 ha, por lo que considerando la superficie total del área de estudio, ésta se considera principalmente como un área de agricultura de temporal.

CAPITULO 2. METODOLOGIA

En este capítulo se explican detalladamente los procedimientos que fueron empleados para la obtención, verificación y procesamiento de las bases de datos de clima, suelo y relieve, así como el procesamiento de la imagen Landsat y la realización de la EMC. De manera lógica, un primer paso sería la identificación de las variables a considerar en la EMC, sin embargo, desde el punto de vista de la implementación metodológica se consideró más pertinente iniciar con la etapa de preparación de las bases de datos disponibles, que por su importancia debían ser consideradas y llevar de manera paralela algunas de las actividades de esa etapa, junto con algunas actividades de la EMC. Una ventaja de haber realizado lo anterior, fue el avance logrado en una de las fases que requieren de mayor tiempo y esfuerzo, que es la preparación de las bases de datos.

De este modo, el procedimiento general seguido en este trabajo fue: 1. La obtención de la base de datos de clima, suelo y relieve necesarios para los cultivos y disponibles en las diferentes fuentes de información, también se incluyó una etapa de verificación para la eliminación de errores e inconsistencias 2. La preparación y el procesamiento de la base de datos incluyendo la imagen de Landsat TM para obtener el mapa de uso/cobertura de suelo, interpolación de las bases de datos de clima y suelo y el ajuste de los mapas de temperatura de acuerdo al gradiente térmico obtenido. En esta parte se incluyó una evaluación de los cambios entre diferentes imágenes de Landsat de 1996 y 2000, para tratar de evaluar la vigencia de la información considerada 3. Realización de la EMC usando las variables del medio físico relevantes para identificar áreas adecuadas de cultivos y los diferentes productos del procesamiento de las bases de datos, incluyendo la información de Landsat en el contexto de un SIG. En la Figura 2.1, se muestra de manera esquemática, el diagrama metodológico general seguido en este trabajo.

2.1 Base de datos de clima

La información de clima se obtuvo de 35 estaciones meteorológicas ubicadas tanto dentro como fuera del área de estudio. El número de años de observación fue diferente para cada estación, por lo que no se seleccionó un período específico sino todos los datos disponibles, se analizaron estaciones con un mínimo de 24 años y otras en las que se consiguieron 42 años de datos. La información fue revisada para eliminar inconsistencias, datos no útiles y estimar valores faltantes, asimismo fue actualizada con la información disponible en la Comisión Nacional del Agua (CNA), a través de la captura digital. Las variables consideradas en este estudio fueron: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y

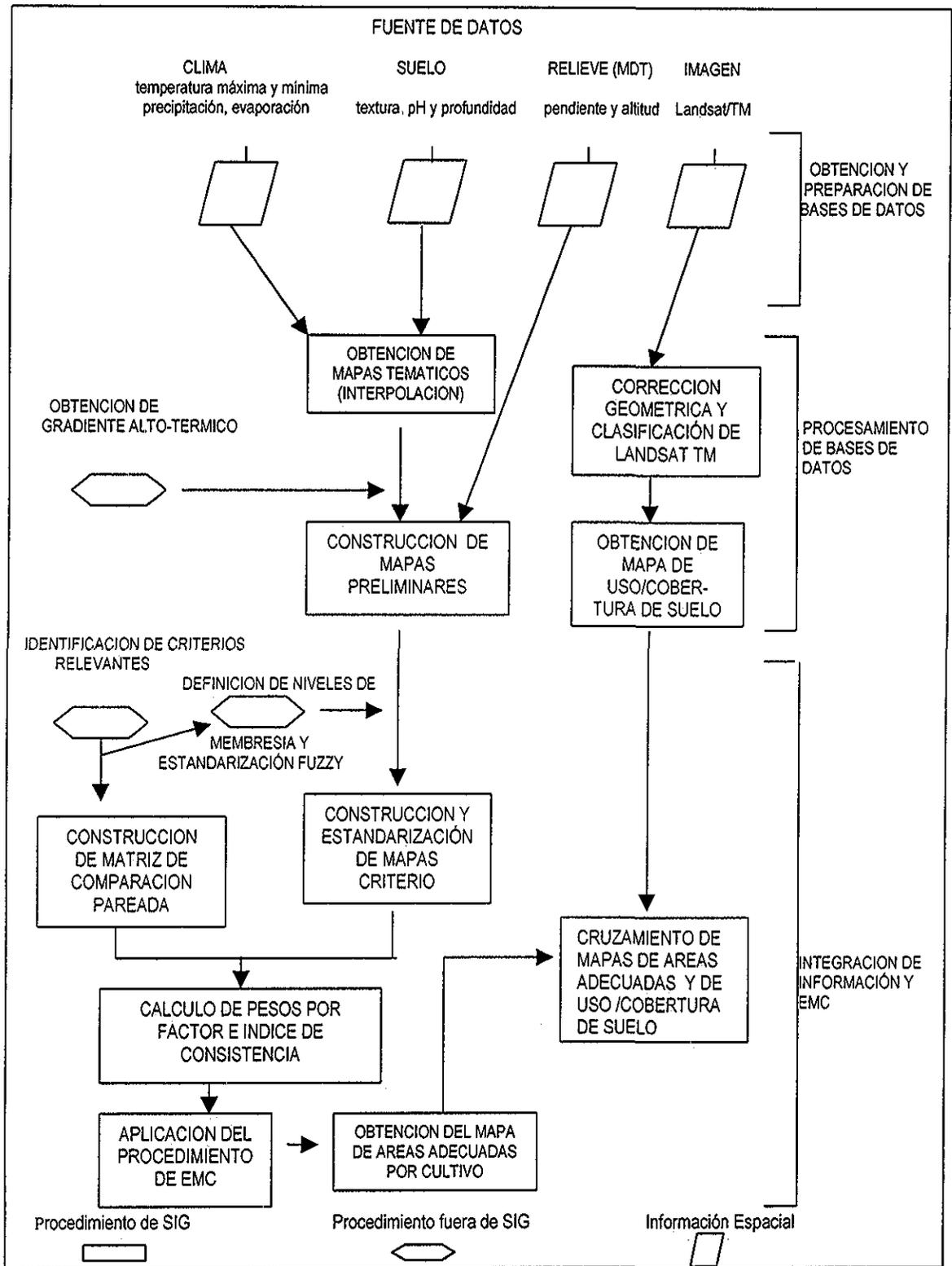


Figura 2.1. Diagrama metodológico general para la obtención de áreas adecuadas por cultivo.

evaporación. En la figura 2.2, se muestra el procedimiento general seguido para el procesamiento de los datos de clima, el cual incluyó los siguientes pasos:

2.1.1. Estimación de datos faltantes y cálculo de medias decenales

Para la estimación de datos faltantes, primero se definió el siguiente criterio: si en un mes faltaban más del 30% de los datos diarios, es decir 9-10 días, estos no se estimaban. Posteriormente para estimar un dato faltante se analizaron dos ideas básicas para definir el criterio de estimación a seguir, por un lado estimar el dato faltante a partir de sus valores cercanos o bien estimarlo tomando en cuenta las variaciones a través de los años.

En el primer caso, se calculó la media de cinco días antes del dato faltante y cinco días después (criterio 1), para el segundo caso se calculó la media para el mismo día y mes para cinco años antes y para cinco años después (criterio 2) En ambos casos se calculó la desviación estándar de las diez observaciones

Se escogieron al azar cinco estaciones, en cada una de ellas y donde fue posible, se estimó un valor faltante, aplicando los criterios 1 y 2 y calculando la desviación estándar para cada valor estimado. Lo anterior se realizó dos veces para cada variable (temperaturas máxima y mínima, precipitación y evaporación) Al final, se comparó la desviación estándar del valor estimado con ambos criterios y se observó que del total de valores estimados (36), en el 58% de los casos la desviación estándar del criterio 1, fue menor que la desviación estándar del criterio 2. Con base en lo anterior se decidió tomar el criterio 1 para estimar los datos faltantes, de los archivos de los datos de clima.

Posteriormente se procesó la información para obtener las medias decenales mediante programas computacionales elaborados en Q-Basic. Se utilizó un programa para cada variable, de esta forma se generó un valor medio para cada decena y cada variable por estación, la información anterior se organizó en un archivo con extensión VEC, el cual contenía, el valor medio de la variable climática, generado como se mencionó anteriormente, un dígito que indica el número de puntos del elemento a interpolar (uno en nuestro caso) y las coordenadas geográficas en la proyección UTM de cada estación. Usando el archivo anterior se construyeron los mapas primarios mediante un algoritmo de interpolación, el procedimiento descrito anteriormente, dentro del contexto global del procesamiento de la base de datos de clima, se puede observar en la Figura 2.2.

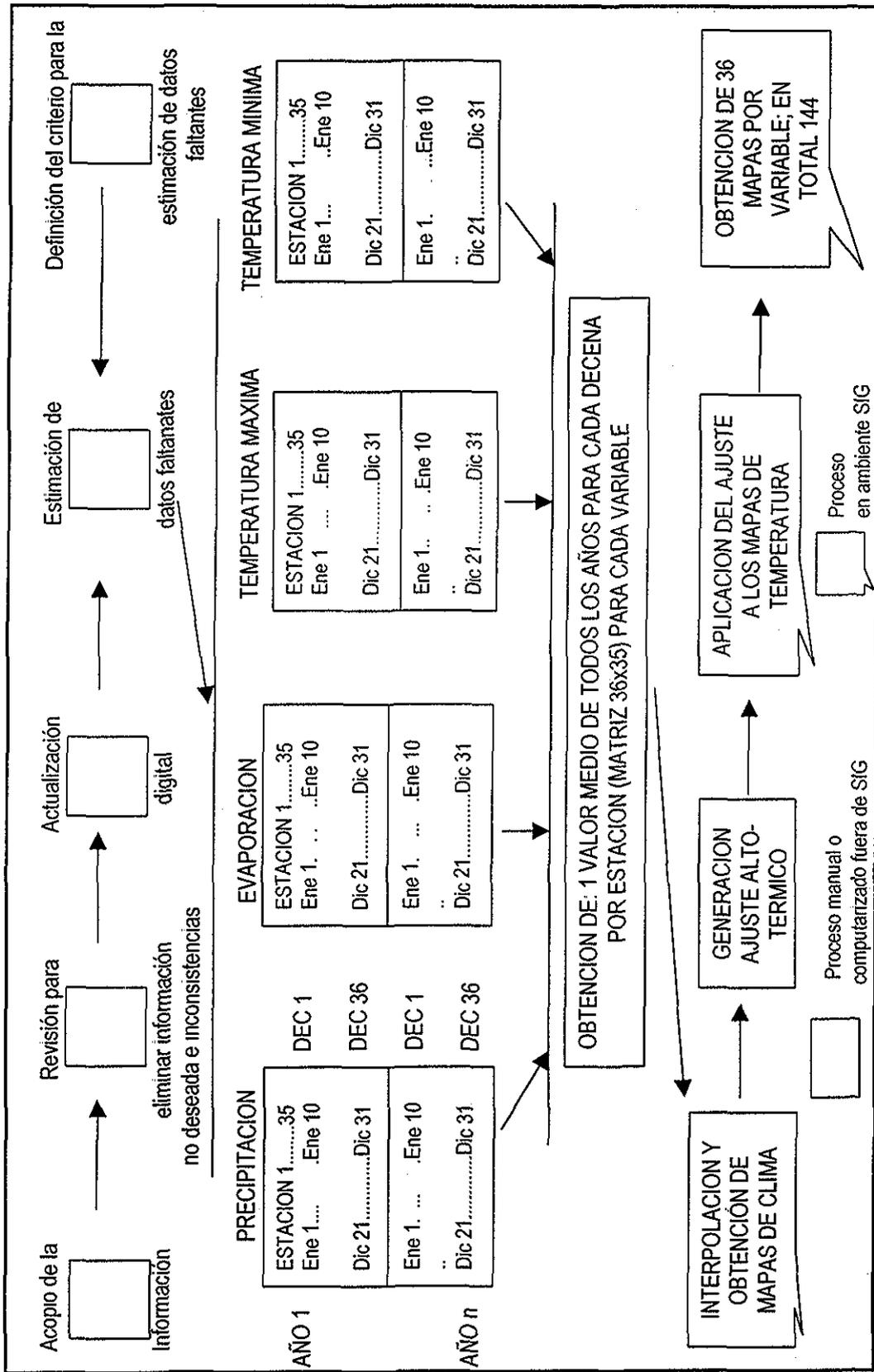


Figura 2.2. Diagrama empleado para procesar la base de datos de clima.

2.1.2 Interpolación de información

Se realizaron varias pruebas antes de decidir que procedimiento de interpolación se iba a utilizar. La primera opción que se probó, fue la de usar algunos programas realizados ex-profeso en INIFAP. De esta manera los mapas interpolados que se obtuvieron de temperatura máxima y mínima mostraron buenos resultados en el aspecto general, sobre todo al considerar las variaciones de altitud a través de un ajuste adiabático. Sin embargo al analizar los valores asignados en los pixeles correspondientes a las estaciones utilizadas, se observaron diferencias, en algunos casos hasta de varios grados, con respecto al valor que debían tener dichos pixeles. En la Tabla 2.1, se muestran las diferencias entre los valores de temperatura máxima decenal de algunas estaciones y los valores interpolados.

Tabla 2.1. Comparación entre los valores de temperatura máxima decenal (en °C) y los valores interpolados para varias estaciones meteorológicas

Estación Meteorológica	Valor pixel original (No interpolado)	Valor pixel interpolado
Mexicalcingo	13.7	17.9
Temoaya	19.2	15.4
Lerma	21.5	18.4
Nueva Santa Elena	20.0	20.0
Mólinito	24.8	19.9
Presa Mixcoac	23.1	18.1
Atotonilco	23.7	24.5
Mimiapan	22.8	19.2

Debido al problema anterior otra opción fue probar los procedimientos de interpolación incorporados en el software Surfer (Golden Software 1996) sin embargo los resultados mostrados no fueron muy satisfactorios, sobre todo porque no se reflejaba ninguna variación debida a la altitud. Una tercera opción fue la de usar IDRISI (Eastman 1997), cuyo procedimiento utiliza el método de la distancia ponderada promedio, que asigna mayor peso a los puntos cercanos, del dato a interpolar, que a los puntos lejanos, manteniendo una relación exponencial, mediante la especificación de la función de distancia. La función de distancia asigna pesos en diferentes formas, por ejemplo la relación entre pesos espaciales y distancia puede ser especificada por una función inversa cuadrada o inversa cúbica (Yue-Hong 1997). Este procedimiento tiene la ventaja de que es un método "exacto" (Bosque 1992), es decir el resultado de la interpolación reproduce, en los puntos muestrales, exactamente sus valores originales. Debido a lo anterior los mapas obtenidos fueron adecuados, sin embargo éstos tampoco reflejaban en forma pertinente los cambios que sufren la temperatura máxima y mínima al variar la altitud. Con el propósito de

resolver el problema anteriormente planteado, se decidió utilizar estos últimos mapas interpolados de temperatura y generar un ajuste a través de la obtención de un gradiente térmico. De este modo, mediante el proceso anterior se obtuvieron 36 mapas primarios (uno por cada decena) para cada una de las variables de clima consideradas en este estudio, es decir 144 en total

2.1.3 Generación del ajuste altotérmico

Los mapas primarios de temperatura fueron ajustados mediante un gradiente térmico, derivado de un modelo de regresión que tomó en cuenta la altitud y la temperatura de 72 estaciones meteorológicas ubicadas en zonas representativas, dentro del Estado de México. El propósito de realizar este procedimiento, fue ajustar los resultados de la interpolación climática, con respecto a la variación de altitud, de acuerdo al concepto de gradiente térmico, que define que por cada 100 m de variación en la altitud sobre el nivel del mar, existe una variación de 0.65 de grado centígrado, como un estándar a nivel del planeta Tierra (García 1989). Este concepto es específicamente útil para el caso de la temperatura máxima y mínima de acuerdo al principio de que la temperatura disminuye al aumentar la altitud.

Primeramente, fue necesario obtener el gradiente térmico específico para el área de estudio, lo cual se realizó a través del cálculo de una ecuación de regresión, obtenida a partir de 72 datos de temperatura media anual e igual número de datos de altitud de estaciones meteorológicas dentro del Estado de México. Los criterios de selección de las estaciones fueron: por un lado la similitud de las condiciones del DDR Toluca (sobre todo altitud sobre el nivel del mar) y por otro lado se buscaron estaciones representativas de condiciones climáticas, que aún no presentes en el DDR, proporcionaran suficiente variabilidad climática como para asegurar obtener respuesta a los efectos altitudinales. Por lo anterior se escogieron estaciones de zonas de transición (altitudes entre 1,500-1,800 m) y de zonas de mayor altura que el valle de Toluca.

Sustituyendo los valores de a y b , obtenidos de la ecuación de regresión, en la ecuación general de la recta se tiene:

$$Y = ax + b \quad (1)$$

donde

Y = temperatura (variable dependiente)

a = pendiente de la recta

x = valores de altitud (variable independiente)

b = constante

Una vez obtenidos los valores de a y b, se calcularon cuales serían los valores de Y para los dos valores de x (1,000 y 2,000), es decir la relación entre la altitud y la temperatura. Después, con los datos anteriores, se obtuvo el gradiente térmico específico (g) para nuestra área de estudio usando la siguiente fórmula (García 1989):

$$\frac{\text{Diferencia en temperatura } ^\circ\text{C}}{\text{Diferencia en altitud en m}} = \frac{g}{100} \quad (2)$$

Una vez obtenido el gradiente térmico, se despejó de la fórmula anterior el valor de temperatura que sirvió para ajustar cada mapa de temperatura máxima y mínima, utilizando IDRISI, lo cual se puede observar en el diagrama general empleado para la base de datos de clima (Figura 2 2)

2.2 Base de datos de suelo

La información de suelos se obtuvo de varias fuentes: la profundidad de suelos se obtuvo de la digitización de la cartografía temática de edafología del INEGI (varias fechas) Por otra parte la información de algunas características físicas y químicas del suelos se obtuvo de un muestreo de suelos realizado entre 1993 y 1994 (INIFAP 1994) Usando la información anterior se generó un mapa de clasificación textural a partir de un método geométrico El procedimiento general seguido para el procesamiento de la información de suelos se puede ver en la Figura 2 3.

2.2.1 Profundidad del suelo

Esta información se obtuvo de la digitización de las fases físicas, de las cartas de edafología a escala 1:50,000, del INEGI; el área de estudio se cubrió con 10 cartas. La profundidad de suelo asociada a cada fase física se muestra en la Tabla 2.2.

Una vez que las cartas fueron digitizadas, se procedió a revisar segmentos con el fin de depurar errores u omisiones al digitizar, para después construir polígonos y finalmente rasterizar.

2.2.2 Muestreo de suelos

Este trabajo fue realizado conjuntamente entre la SAGAR y la Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de México, entre 1993 y 1994. Este muestreo fue realizado para el área de uso de suelo agrícola (aproximadamente 150,000 ha) siguiendo una retícula de 1 km por 1 km. En ortofotos a escala 1:10,000 se identificaron los sitios de muestreo. En cada sitio se levantó una muestra compuesta de

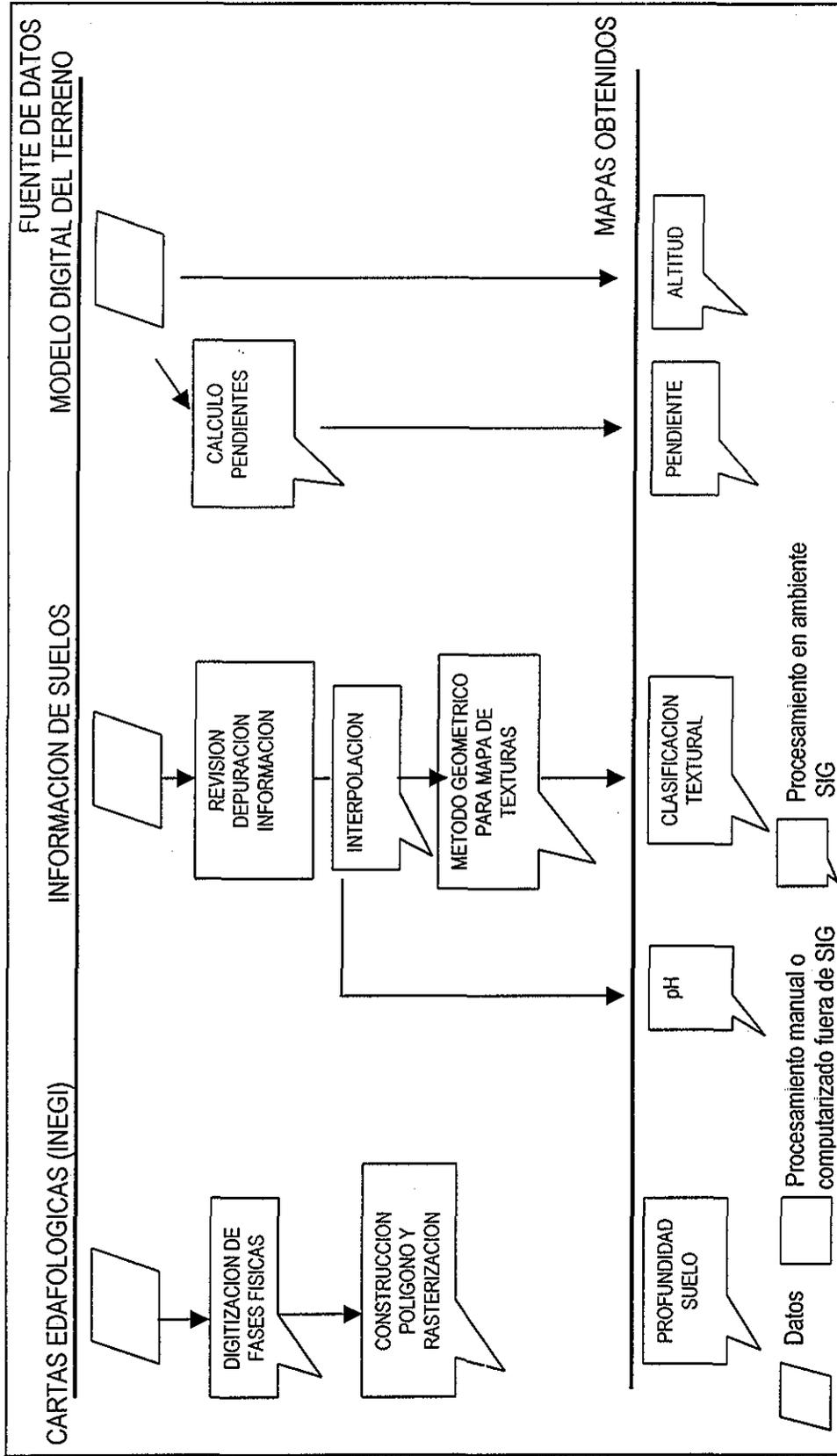


Figura 2.3. Diagrama empleado para procesar la base de datos de suelo.

Tabla 2.2. Profundidad de suelo asociada a fases físicas Tomado de la cartografía del INEGI (varias fechas)

Fase física	Profundidad suelo (m)
Dúrica y Lítica somera	0.1 - 0.5
Dúrica y Lítica profunda	0.5 - 1
Suelos sin fase	> 1
Gravosa	0.1 - 0.5
Litosol	0 - 0.1

varias sub-muestras para su envío al laboratorio. La profundidad a la que se tomó cada muestra fue de 30-40 cm. Las variables medidas fueron: pH, materia orgánica, fósforo, potasio, calcio, magnesio, arena, limo y arcilla (INIFAP 1994). Asociada a cada valor puntual por variable se obtuvo la información de coordenadas geográficas, las cuales se convirtieron a la proyección UTM. Se construyó un archivo para la interpolación por variable. En la figura 2.3 se muestra el diagrama general del procedimiento seguido para procesar la base de datos del suelo y obtener los mapas respectivos.

2.2.2.1 Conversión de coordenadas

Para realizar la conversión se escribió un programa en Q-Basic, el cual lee un archivo que contiene las coordenadas geográficas (que están en decimal de grado) y multiplica éstas por 3,600 para convertirlas a segundo de arco, posteriormente estos valores se redondearon. Este archivo sirvió de entrada para convertir las coordenadas de tipo geográficas a UTM, de manera automática utilizando el procedimiento disponible en ILWIS (ITC 1998). El paso anterior produjo un archivo de salida, el cual se unió con el archivo original (que tenía los valores del muestreo para cada variable), por medio de un programa escrito en Q-Basic.

2.2.2.2 Revisión y depuración de la información

Cada archivo por variable fue revisado y se encontraron valores de coordenadas, evidentemente erróneas, es decir, fuera del área de estudio. Lo anterior se resolvió en dos etapas: en la primera, se elaboró un programa en Q-Basic, para eliminar aquellos valores x,y, que fueran mayores a los límites del área de cobertura del Modelo de Elevación Digital en más de 3,000 unidades (metros en este caso). En la segunda etapa se construyó un archivo de puntos de ILWIS con las coordenadas UTM (ya corregidos en el punto anterior), el valor de la variable y el número del registro correspondiente, para sobreponerlo a una máscara del DDR, para revisar que los datos del muestreo fueran consistentes en comparación con sus puntos vecinos.

2.2.2.3 Interpolación de información

Este proceso se llevó a cabo utilizando un método estándar, no estadístico, el cual puede ser utilizado si no se usan métodos geoestadísticos (Burrough 1991). Por lo que se usó el procedimiento disponible de IDRISI para todas las variables en estudio, es decir: pH, materia orgánica, fósforo, potasio, calcio, magnesio, arena, limo y arcilla. El número de datos del muestreo por variable, después del proceso de depuración, se muestra en la Tabla 2.3

Tabla 2.3. Número de datos por variable del suelo utilizados en la interpolación

Variable	Núm. de datos
Limo	1076
Arcilla	1076
Arena	1076
pH suelo	1070
Materia orgánica	1077
Fósforo	1050
Potasio	1050
Calcio	1041
Magnesio	1049

2.2.2.4 Construcción de un mapa de clasificación textural

Utilizando la información de contenido de arena, limo y arcilla del muestreo de suelo, se generó un mapa de clasificación textural. Se partió de la idea de utilizar un método geométrico (basado en la forma clásica del triángulo de texturas), que permitiera conocer a que clase textural correspondería un valor de arena, limo y arcilla cualquiera. Para automatizar el procedimiento se realizaron las siguientes actividades: primeramente se construyó un sistema de coordenadas en el que se desarrollaría la implementación del método propuesto, dicho sistema se basó en las propiedades geométricas de un triángulo rectángulo. Posteriormente utilizando el sistema de coordenadas propuesto, se calcularon los vértices de los polígonos que forman cada una de las clases de un triángulo de texturas, después se construyó un archivo de polígonos el cual fue rasterizado y posteriormente vectorizado para obtener los valores de x (valor de arena), y (valor de arcilla) y z (valor de clase textural correspondiente). Enseguida se preparó la información del contenido de arena, limo y arcilla (proveniente del muestreo), transformando los valores necesarios para poder comparar este archivo con el anteriormente creado y mediante un manejador de archivos obtener para cada par de valores XY (% de arena, % de arcilla), su correspondiente clase textural y obtener de ese modo el mapa de clasificación textural.

2 2 2 4 1 Definición de un sistema de coordenadas

En dicho sistema el contenido de arcilla representa el eje Y, el cual no debe sufrir ninguna modificación, ya que los valores de arcilla se miden de manera "normal" sobre este eje. El contenido de arena representa el eje X, el cual sufrió la siguiente transformación. Si se asume que:

La longitud máxima del eje Y = 100 (dado que el valor máximo del contenido de arcilla es cien) y que X = longitud total del eje X. Entonces se calcula cuál es la longitud del eje X, a partir de las propiedades geométricas del triángulo, ya que se sabe que, al partir por la mitad un triángulo equilátero, se generan dos triángulos rectos. El ángulo opuesto al ángulo recto (90°) en esos triángulos, es igual a 60°. Se puede aplicar la función tangente de ese ángulo (60°) para conocer el valor de x1 (la mitad de la longitud total X), sabiendo que el cateto opuesto es 100 (valor total de arcilla) (Figura 2 4)

En la Figura 2 4:

$$\tan(a) = \text{cateto opuesto} / \text{cateto adyacente}$$

$$\tan(60^\circ) = 100 / x1$$

despejando x1, entonces

$$x1 = 100 / \tan(60^\circ)$$

$$x1 = 57.735027$$

pero, se dijo anteriormente que x1 representa la mitad de la longitud total X, por lo que:

$$x1 * 2 = 115.4700538379 \text{ entonces la longitud total del eje X es igual a:}$$

$$X = 115.4700538379$$

Ahora los valores sobre el eje X, deben ser ajustados proporcionalmente a esta longitud

2 2 2 4 2 Cálculo de los vértices de los polígonos (sobre el eje X)

Para construir los polígonos que representen las diferentes clases de texturas, primeramente hay que conocer las coordenadas de los vértices que forman cada uno de dichos polígonos, esas coordenadas estarán formadas por un valor de y (que representa un valor de % de arcilla al cual no hay que transformar) y un valor de x (que representa un valor de % de arena), dicho valor se calculó en base a las propiedades geométricas de un triángulo rectángulo y usando el sistema de coordenadas explicado en la sección anterior y ajustando proporcionalmente a la longitud del eje X. Lo anterior se hizo en dos etapas y para cada uno de los 12 polígonos de clase textural considerados. En la primera se calcularon las coordenadas de valor % de arena 1 (va1) a partir de los valores de % arcilla y usando la función tangente. En la segunda se calcularon las coordenadas de valor de arena 2 (va2) a partir de los valores de limo, ambos valores se sumaron para obtener la coordenada total (x) (Figura 2 5)

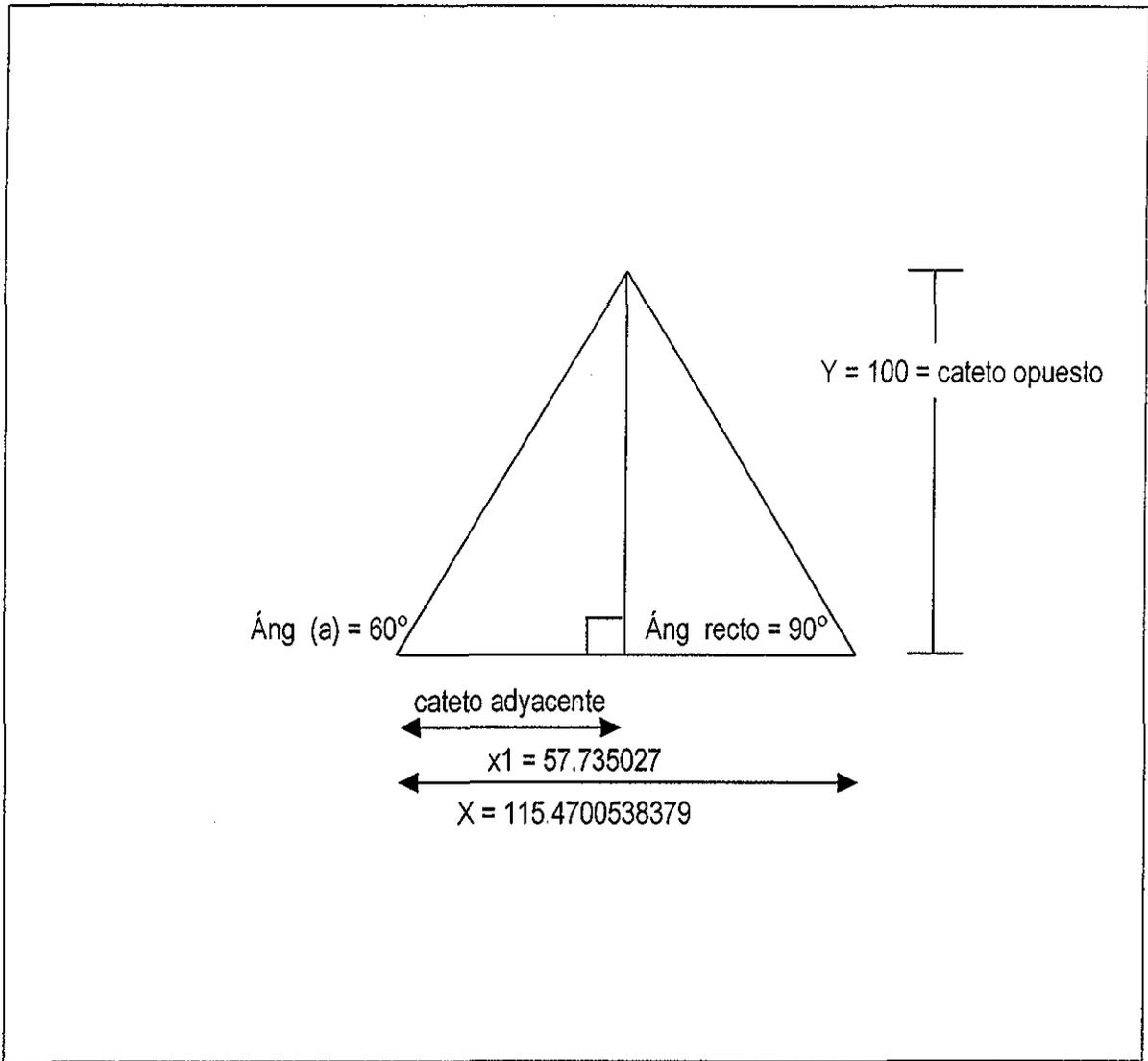


Figura 2.4. Triángulo equilátero usado en el método geométrico para la construcción del mapa de clases texturales de suelos

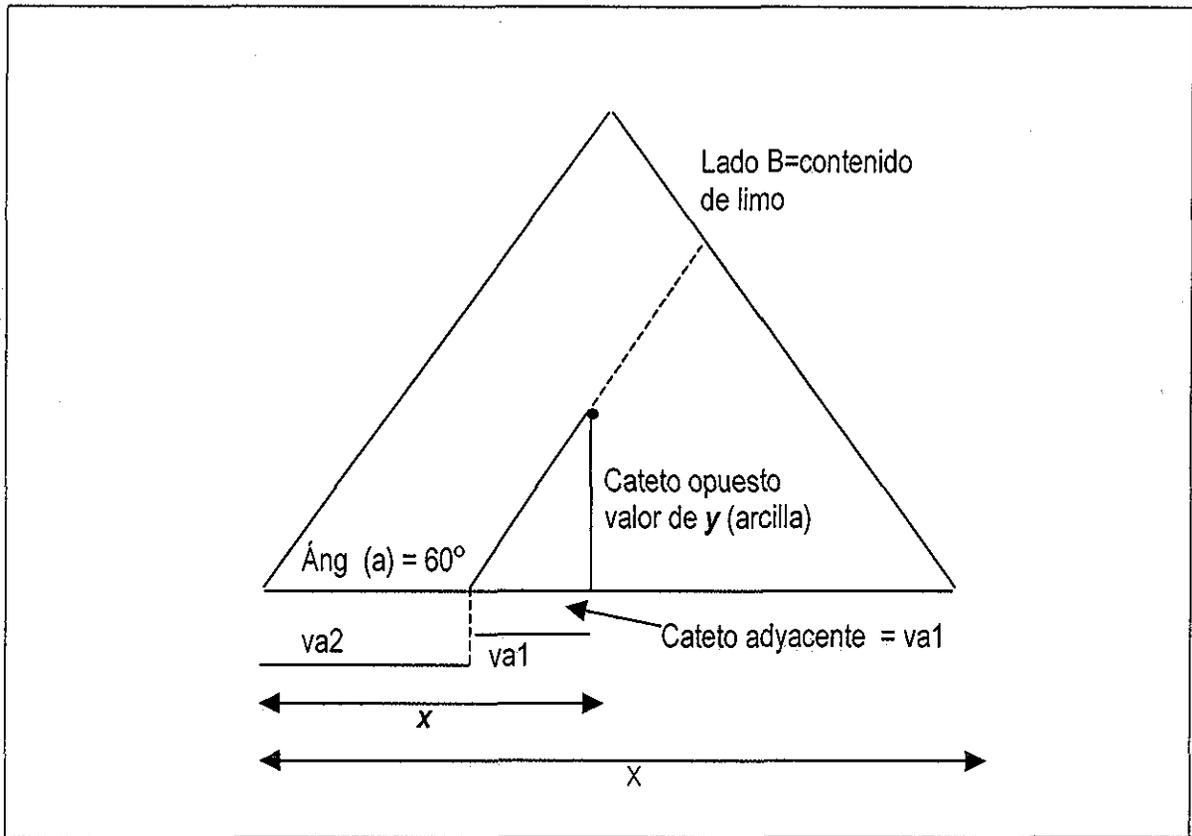


Figura 2.5. Triángulo usado como base para calcular los valores de los vértices de los polígonos de las clases de textura.

Etapa a) El va_1 , es decir solo una parte del valor total de la coordenada de arena (x) fue obtenido a partir del valor de arcilla (valor conocido de y), ya que a partir de este dato, se puede proyectar sobre el eje X un triángulo, del cual se sabría, el cateto opuesto (valor de y) y el valor del ángulo (60°). Por lo que usando la función tangente se puede estimar el valor de va_1 :

$$\tan(60^\circ) = \text{cateto opuesto/cateto adyacente}$$

$$\tan(60^\circ) = \text{valor de } y/va_1$$

despejando va_1 , tendríamos:

$$va_1 = \text{valor } y/\tan(60^\circ)$$

Ejemplo: suponga un valor de arcilla (y)= 20

$$va_1 = 20/1.732050807569$$

$$va_1 = 11.547004$$

Etapa b) Calcular el valor de va_2 , a partir del valor de limo. Sobre el lado B, en un triángulo de texturas, se mide el contenido de limo y si trazáramos una línea de proyección (línea punteada, en la Figura 2.5) de este punto sobre el eje X, podríamos estimar la longitud de va_2 y entonces conocer al valor de x , es decir el otro valor de la coordenada de arena de un vértice de polígono cualquiera. De este modo tendríamos:

Usando la siguiente proporción:

Si un valor máximo de limo (100) _____ corresponde a 115.4700538379

Un valor de limo cualquiera _____ que valor correspondería (va_2)

Así:

$$va_2 = \text{valor de limo} * 115.4700538379/100$$

Ejemplo:

Valor de limo = 28

$$va_2 = 28 * 115.4700538379/100$$

$$va_2 = 32.3316$$

Finalmente, del ejemplo anterior:

$$vt = va_1 + va_2$$

$$vt = 11.547004 + 32.3316$$

$$vt = 43.8786$$

Del modo anterior se calcularon las coordenadas (valor de arena), para todos los vértices de todos los polígonos de clase textural. Con esta información se construyó un archivo de polígonos

2 2 2 4 3 Construcción del archivo de polígonos, rasterización y vectorización

Primeramente se construyó un archivo con extensión SMT, el cual tiene las coordenadas de cada uno de los vértices que forman los polígonos de las clases de texturas y un código (1 al 12) que corresponde a cada clase de texturas. Con la información de ese archivo, se generó un archivo de polígonos, al cual se le revisaron sus segmentos, intersecciones y puntos finales para posteriormente rasterizarlo con un tamaño de pixel de 1, generándose de ese modo 1,000 líneas y 1,155 columnas. Una vez vectorizado el archivo anterior, se exportó a la versión 1.4 de ILWIS, como archivo de puntos con extensión PNT. Este archivo tiene los siguientes valores: x, y, z. Donde x, y son las respectivas coordenadas y z es la clase de textura de cada punto. Este archivo tiene 575,824 puntos.

2 2 2 4 4 Preparación de los datos de arena, limo y arcilla del muestreo de suelo

Por otra parte, una vez obtenidos los mapas interpolados para las variables arena, limo y arcilla del muestreo de suelo, se procedió a realizar un ajuste para que la suma de las tres variables resultara 100, generándose un archivo de texto. En el archivo anterior, los valores de arena se transformaron de acuerdo al valor de eje X (valor de arena) descrito anteriormente en la sección 2 2 2 4 1, de la siguiente manera:

$$\text{Arev} = ((100 - \text{are}) * 115\ 4700538379 / 100)$$

Donde:

Arev = Valor de arena transformado de acuerdo al sistema de coordenadas usado

are = Valor de arena proveniente del muestreo de suelo

La primera parte de la fórmula es para darle sentido a los valores, de acuerdo al sistema de coordenadas propuesto. Este archivo consta de 662,200 datos (que es el tamaño de cualquier mapa interpolado del área de estudio).

2 2 2 4 5 Obtención del mapa de clasificación textural

El propósito final fue obtener la clase textural a la que corresponde cada par de datos de x (arena) y y (arcilla) del archivo obtenido en el punto anterior, para lo cual fue necesario buscar en el archivo obtenido en el punto 2 2 2 4 3, los valores (x,y) que correspondieran exactamente y obtener así la clase de textura respectiva (valor z). Lo anterior se realizó utilizando las facilidades de la implementación de SQL (Sequential Query Language) que posee el manejador de archivos ACCESS. Primeramente se creó una base de datos y se importaron ambos archivos. El obtenido a partir de la rasterización de los polígonos de clases de texturas y el archivo con los datos transformados proveniente del muestreo de suelos, después se creó una relación entre cada par de valores (x,y) de cada archivo y se definió el criterio de búsqueda. Si

el valor de X de un archivo es igual al valor de X del otro archivo y si el valor de Y de un archivo es igual al valor de Y del otro archivo, entonces se escribía en un tercer archivo los valores de x y y del archivo del muestreo de suelos y su correspondiente valor de z (clase de textura) El archivo así obtenido fue documentado con los mismos parámetros utilizados para los otros mapas, como tipo de archivo, número de columnas e hileras, sistema de referencia, valores mínimos y máximos de X-Y y la resolución De este modo se obtuvo el mapa de clasificación textural el cual fue utilizado para las etapas posteriores de la EMC.

2.3 Base de datos del relieve

Con respecto al relieve, la información de pendiente (en %) y altitud fue obtenida del Modelo Digital del Terreno (MDT) usando ILWIS e IDRISI Cuando este trabajo comenzó, la información disponible del MDT era de 3 segundos de arco de resolución espacial, en términos de coordenadas geográficas, lo cual es alrededor de 90 m de tamaño de pixel en la latitud del área de estudio, que fue la resolución usada en esta investigación

El procedimiento para tener disponible el MDT fue el siguiente:

Se exportó de IDRISI a formato ERDAS de 16 bits, posteriormente se importó en ILWIS y se creó un sistema de coordenadas para definir un área de trabajo en la cual se especificaron los siguientes parámetros; proyección: UTM, zona: 14, elipsoide: Clark 1866 y datum: NAD 27 México Una vez hecho lo anterior, se creó una georeferencia, tomando como base el sistema de coordenadas ya creado y definiendo los valores mínimos y máximos para X e Y del área de estudio

Posteriormente el MDT se remuestreó utilizando el procedimiento disponible (RESAMPLE) de ILWIS y la opción del "vecino más cercano" (nearest neighbour) Dado que el MDT del área de estudio consta de 2 cuadros de 1 grado de latitud y 1 grado de longitud, cada uno (100° oeste, 19° norte y 100° oeste, 18° norte) , todos los pasos anteriores se realizaron para cada uno de ellos

El siguiente paso fue "pegar" los dos cuadros usando el procedimiento (GLUERAS) disponible en ILWIS, en el cual hay que definir el primer y segundo mapa a pegar, así como la fila norte (fila de inicio), fila sur (fila de término incluyendo ambos grados), columna oeste (columna de inicio) y columna este (columna de término) Para nuestro caso los parámetros anteriores fueron: 500, 1,270, 60 y 920, por lo cual el MDT tiene un tamaño de 770 filas y 860 columnas

Para evitar almacenar información innecesaria, el MDT se recortó utilizando el procedimiento disponible (SUBRAS) de ILWIS definiendo la primer línea: 500, número de líneas: 770, primer columna: 60 y número de columnas: 860

2.4 Uso de suelo y procesamiento de imagen Landsat

Para obtener la información del uso/cobertura del suelo en el área de estudio, se procesó una imagen LANDSAT/TM, de marzo de 1996, la cual se recortó para cubrir solo el área de interés, conformando una matriz de 2318 x 2410 pixeles. 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 georeferenciada considerando el sistema de coordenadas UTM, además se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para evaluar la variabilidad presente en las bandas.

Posteriormente se llevó a cabo una clasificación supervisada probando varios algoritmos de clasificación y diferentes umbrales. Dicha clasificación tuvo como objetivo obtener un mapa de uso/cobertura del suelo que mostrara las principales clases de información presentes en el área de estudio. El mapa así obtenido fue cruzado con cada uno de los mapas de áreas adecuadas de cultivos obtenidos mediante la EMC, lo cual será explicado más adelante.

La clasificación resultante fue evaluada para obtener la matriz de error y determinar su exactitud (Lillesand y Kiefer 1994). Con el propósito de contar con información actualizada de uso de suelo, se georeferenció una imagen de la misma área y el mismo mes pero del año 2000, para realizar algunas observaciones sobre el cambio de uso del suelo entre ambas fechas.

2.4.1 Corrección del “bandedo” de la imagen

En la banda 3 se observaron pixeles que se repetían periódicamente en cierta porción de la imagen, por lo que para corregir esa información, la imagen se exportó de ILWIS a formato BMP, posteriormente en el software Photostyler, se cambiaron los valores de pixeles erróneos, los cuales formaban segmentos de 12 pixeles de longitud, observándose lo anterior en 10 filas. El procedimiento seguido fue cambiar el valor del pixel en cuestión por la media del valor del pixel de la fila superior y el valor del pixel de la fila inferior. Después se importó nuevamente la imagen a ILWIS.

2.4.2 Georeferencia de la imagen

Para realizar este procedimiento fue necesario la definición de puntos de control, lo cual se hizo de la siguiente manera:

Los primeros puntos se identificaron en la pantalla y se marcaron en las cartas topográficas correspondientes, después éstos se digitizaron en ILWIS y de ahí se obtuvieron sus coordenadas en UTM. Posteriormente los puntos restantes se identificaron en la pantalla y se marcaron en las cartas topográficas correspondientes. La ubicación geográfica de dichos puntos se obtuvo mediante la medición directa en la carta, utilizando un escalímetro. Los puntos de control (72 en total) fueron capturados en un archivo (tiepoints), creado para tal propósito. Posteriormente la georeferencia fue aplicada a todas las bandas usadas en este procesamiento.

2.4.3 Corrección geométrica y Análisis de Componentes Principales (ACP)

La corrección geométrica se llevó a cabo utilizando el procedimiento disponible en ILWIS usando la opción del vecino más cercano y una georeferencia previamente creada con un tamaño de pixel de 30 m. Por otra parte se realizó un ACP, para conocer cuáles bandas explicaron la mayor varianza observada en la información disponible. Dicha prueba se realizó para todas las bandas (1-5 y 7).

2.4.4 Clasificación supervisada

Para llevar a cabo la clasificación de los píxeles de la imagen, fue necesario construir un archivo de muestras ("training areas") en el cual se definieron las clases de información, sus dominios y representación. Lo anterior se hizo usando el procedimiento disponible (SAMPLEMAP) de ILWIS.

La clasificación supervisada fue realizada considerando varias clases espectrales, apoyándose en varios compuestos de color (4/3/1 y 5/3/1) para distinguir en pantalla las diferentes clases de información. Asimismo algunos algoritmos de clasificación fueron probados y para cada uno de ellos fueron usados diferentes valores umbrales. Una vez obtenido el mapa de uso de suelo, este fue remuestreado a un tamaño de pixel de 90 m, para homogeneizar la resolución espacial utilizada en este estudio. La clasificación supervisada fue corroborada con trabajo de campo, que incluyó 42 sitios distribuidos en el área de estudio.

2.4.4.1 Matriz de error espectral y real de la clasificación

La matriz de error espectral fue obtenida utilizando las capacidades de ILWIS, cruzando el mapa de puntos del archivo de muestras, con el mapa raster derivado de la clasificación supervisada, de lo

anterior fue obtenida una Tabla, cuyos valores fueron usados para construir la matriz de error espectral. Para estimar la exactitud de la matriz de error espectral, se generaron varias medidas como: la exactitud del algoritmo (error de omisión), la exactitud del usuario (error de comisión) y la exactitud total de la matriz de error espectral.

Por otra parte, la matriz de clasificación real, se construyó comparando el mapa raster final producto de la clasificación supervisada, con los datos reales de las clases de información presentes en el campo. La obtención de los datos reales se realizó en tres etapas. En la primera se construyó un archivo de puntos de comparación, de tal manera que se formara una malla o "grid" con una distancia de 3,000 m entre cada punto. Este archivo de puntos fue rasterizado y posteriormente cruzado con el mapa raster final, para obtener una Tabla que contenía el número progresivo de los puntos y la clase de información obtenida en la clasificación. Posteriormente se elaboró, sobre un acetato, una malla o "grid" con una distancia de 3,000 m entre los puntos, tomando como referencia las cartas topográficas respectivas, identificando rasgos distintivos que sirvieron de apoyo para localizar dichos puntos en las fotos aéreas.

De esa manera, mediante fotointerpretación se obtuvo la clase de información observada en el campo para cada uno de los puntos de la malla. Los datos anteriores se compararon con las clases de información producto de la clasificación, para anotar la concordancia o discrepancia entre ambas.

En la segunda etapa y con el propósito de aumentar el número de puntos de comparación, sobre todo para ciertas clases, se formó una malla a una distancia de 1,000 m entre cada punto. Finalmente y con el mismo propósito que la fase anterior, se construyó una malla con una distancia de 500 m entre cada punto. En resumen se puede decir que se realizó un muestreo uniforme con una malla inicial de 3,000 m entre cada punto de comparación y sucesivamente se construyeron mallas a cada 1,000 m y posteriormente a cada 500 m para realizar sub-muestreos más intensivos solo para las clases de información "escasas".

La estimación de la exactitud de la matriz real se realizó calculando la exactitud total, la cual se obtuvo dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados (es decir, la suma de los elementos a lo largo de la diagonal de la matriz), entre el número total de píxeles considerados. También se calculó el estadístico κ ("KHAT"), cuyo valor puede variar entre 0 y 1 y es un indicativo de qué tanto mejor (expresado en porcentaje) es una clasificación supervisada, en comparación con una asignación aleatoria de valores a los píxeles en cuestión. Esta medida toma en cuenta, para su estimación, los datos del número total de píxeles considerados, el número total de píxeles correctamente clasificados y la suma de los productos del número de píxeles en cada fila y cada columna (Lillesand y Kiefer 1994).

El estadístico κ es calculado como:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Donde:

r = número de filas en la matriz de error

x_{ii} = número de observaciones en la fila i y columna i (es decir, los píxeles bien clasificados)

x_{i+} = total de observaciones en la fila i

x_{+i} = total de observaciones en la columna i

N = número total de observaciones en la matriz

2.4.5 Utilización de reglas de decisión para la obtención del mapa de uso/cobertura de suelo

En el mapa resultante de la clasificación supervisada se obtuvieron varias clases de información con una gran heterogeneidad espectral como: ciudades, áreas degradadas, áreas de inundación y cumbre volcánica. Dicha heterogeneidad estuvo asociada a algunas clases espectrales muy pequeñas, en cuanto al número de píxeles con esa huella espectral (es decir eran poco representativas en relación al número total de píxeles de la escena usada), ejemplo de esas clases fueron: la nieve y la vegetación acuática. Por lo anterior y tomando en cuenta el objetivo del procesamiento de la imagen, en términos prácticos resultaba poco útil considerar cada una de estas respuestas espectrales como clases de información.

Debido a lo anterior, se decidió hacer mejoras sucesivas del mapa de uso/cobertura suelo, obtenido directamente de la clasificación, con el objetivo de contar sólo con las clases de información que fueran representativas en cuanto a su tamaño (número de píxeles con esa respuesta espectral) y distribución en el área de estudio. De este modo, el procedimiento seguido para llevar a cabo lo anterior fue el siguiente: primero se identificaron las clases de información que debían ser consideradas por las características espectrales ya mencionadas, después y tomando como base el compuesto en color 4/3/1, se digitizaron directamente en la pantalla el o los polígonos que formaron la clase en cuestión. Para definir los límites de dichos polígonos, de tal manera que éstos estuvieran apegados a la realidad en el campo, se aplicaron técnicas de fotointerpretación en dichas áreas, el análisis de la cartografía disponible y por supuesto los recorridos de campo.

Posteriormente y una vez obtenido el mapa raster respectivo, éste fue cruzado con el mapa de uso

de suelo/cobertura producto de la clasificación, generándose un mapa de salida. Después se obtuvo el siguiente mapa raster (producto de la digitización de otra clase de información), el cual fue cruzado con el mapa de salida previo, generándose un nuevo archivo de salida.

Por ejemplo: supóngase que se creó un archivo raster llamado, "Ciudad", que contenía uno o varios polígonos llamados "Cds" (los cuales fueron digitizados directamente en la pantalla) y que el mapa producto de la clasificación se llamó "Usosue1", cuyos polígonos que representan a las ciudades (y los cuales se desean mejorar) se llamaron "Zu", entonces se aplicó la siguiente regla de decisión:

$Iff((Ciudad="Cds")and(Usosue1="Zu"),"Cds",Usosue1)$

Lo anterior puede interpretarse como:

Si en el mapa raster Ciudad existe el (o los) polígono(s) "Cds" y en el mapa raster de la clasificación Usosue1 existe el (o los) polígono(s) "Zu";

Entonces reemplaza todas las coincidencias (es decir, los polígonos que coincidan en la misma ubicación geográfica) con el (o los) polígono(s) "Cds";

De otro modo, coloca el (o los) polígono(s) que contenga el mapa raster Usosue1

Es bueno aclarar, que tanto el mapa raster Ciudad, como el mapa raster Usosue1, debieron de usar la misma georeferencia, para que lográramos los resultados esperados. El proceso anterior se repitió hasta que todas las clases de información con las características espectrales descritas, estuvieran homogeneizadas y representaran información real y sobre todo, que el mapa así obtenido cumpliera con el objetivo planteado.

2.4.6 Comparación entre la información 1996 y 2000 de Landsat TM

El objetivo de esta actividad fue realizar un análisis entre la información de marzo de 1996, utilizada para la clasificación supervisada que dio origen al mapa de uso de suelo, y la información de marzo del 2000, con el propósito de comparar los cambios generales en el uso/cobertura de suelo entre ambas fechas. El primer nivel de análisis fue una inspección sobre los cambios notables ocurridos, en general, sobre todo en las grandes clases de información (bosques, agricultura de temporal, cuerpos de agua). El segundo nivel consistió en el análisis específico de algunas clases de información que se consideraron adecuadas en términos de su comportamiento dinámico, tales como: áreas inundables, ciudades, áreas quemadas presentes en áreas agrícolas, bosques o áreas de frontera agrícola. El analizar éstas últimas áreas permitió identificar posibles cambios en dicha frontera entre ambas fechas. En ambos niveles de análisis se utilizó el compuesto 4/3/1 el cual permitió la mejor identificación de los rasgos

presentes en ambas imágenes

Para llevar a cabo el análisis de las áreas inundables se siguió el criterio de digitizar áreas cubiertas con agua (píxeles más oscuros en el compuesto utilizado) y áreas con evidente vegetación acuática (color rojo en el compuesto), como un solo polígono. El criterio anterior se apoyó en la cartografía correspondiente y también en los recorridos de campo (que se realizaron de Noviembre de 1999 a Marzo del 2000), en los cuales se comprobó la combinación de espejo de agua y vegetación acuática en dichas áreas.

Para el caso de las ciudades, el criterio seguido fue digitizar ciudades pequeñas que pudieran ser identificadas en el compuesto utilizado, además que estuvieran localizadas de manera representativa dentro del área de estudio. De este modo las ciudades utilizadas para esta comparación fueron: Tenango del Valle, Capulhuac-Tianguistenco, Xonacatlán e Ixtlahuaca. Los límites de dichas ciudades fueron definidos también con el apoyo de la cartografía disponible y las fotos aéreas.

Para el caso de áreas recientemente quemadas primero se definieron cinco "sub-áreas" en la imagen de 1996, que presentaron esta clase de información de manera más o menos homogénea, ya sea en áreas de uso agrícola (como práctica de manejo post-cosecha), bosque (quema de pastizal que eventualmente se convirtió en incendio forestal) o ambos casos. La práctica agronómica de quemar los residuos de la cosecha, se realiza con el propósito de facilitar la preparación del terreno del siguiente cultivo.

Se ubicaron sitios representativos dentro de toda el área de estudio, estas "sub-áreas" fueron delimitadas de acuerdo a sus coordenadas geográficas y para cada una de ellas fueron digitizadas todas las incidencias de esta clase de información con el mismo código de polígono para obtener las estadísticas de cada una de estas "subáreas". Una vez que fueron digitizados todos los polígonos de todas las clases de información consideradas, se obtuvieron las estadísticas respectivas para realizar el análisis correspondiente.

2.5 Evaluación Multicriterio (EMC)

Como se mencionó en el capítulo 1, la EMC puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones. Así, el fin básico de las técnicas de EMC es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflictos (Voogd 1983). La EMC basa su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas y de criterios. De este modo, un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar

convenientemente, una serie de alternativas a partir de los criterios que se consideren pertinentes en una evaluación (Barredo 1996)

En este contexto, las actividades que se llevaron a cabo en este trabajo para lograr la implementación de la EMC, y que dieron como resultado la obtención de los mapas de áreas adecuadas para los diferentes cultivos fueron: revisión bibliográfica sobre los requerimientos ambientales necesarios para el desarrollo adecuado de los cultivos aquí considerados; identificación y jerarquización de las variables del medio físico relevantes para el desarrollo de los cultivos y que debían ser consideradas como criterios en la EMC; construcción de la matriz de comparación pareada; prueba de no redundancia (independencia) del conjunto de factores (criterios); obtención de los mapas factor estandarizados, para lo cual se tomó como base el grado de pertenencia a la función de membresía; construcción de los mapas restricción; cálculo de los pesos de los criterios así como del índice de consistencia; obtención de los mapas de áreas adecuadas de cultivos mediante el uso del procedimiento de EMC dentro del SIG, análisis de los resultados obtenidos y realimentación del proceso para afinar los resultados. Finalmente, se realizó el cruzamiento de los mapas de áreas adecuadas y el de uso/cobertura actual del suelo para precisar los resultados obtenidos. El proceso completo para realizar la EMC se puede observar en la Figura 2.6, de manera esquemática. Es conveniente aclarar que la EMC de los cultivos se realizó en base a las características de la especie y no de variedades, especialmente en lo relacionado a los requerimientos ambientales y estimación de la importancia de los criterios en la evaluación realizada. A continuación se detallan los procedimientos anteriormente mencionados.

2.5.1 Requerimientos ambientales de los cultivos

En esta etapa se llevó a cabo una revisión exhaustiva de las referencias bibliográficas disponibles, incluyendo, libros, revistas especializadas, bases de datos (por ejemplo, FAO 1998) y tesis de posgrado, que permitiera acopiar la información disponible sobre los requerimientos del medio físico que favorecen el crecimiento y desarrollo óptimo de los cultivos en cuestión. El propósito de esta actividad fue fortalecer la decisión de tomar algunas variables del medio físico como relevantes en la definición de las áreas adecuadas para los cultivos, permitiendo de ese modo la identificación de los criterios (factores) que debían ser considerados para la EMC. Lo anterior concuerda con lo reportado por Malczewski (1999), ya que según este autor, la selección de los criterios puede hacerse mediante la revisión de la literatura existente, estudios analíticos (simulación y modelación) y mediante encuestas o entrevistas de opinión.

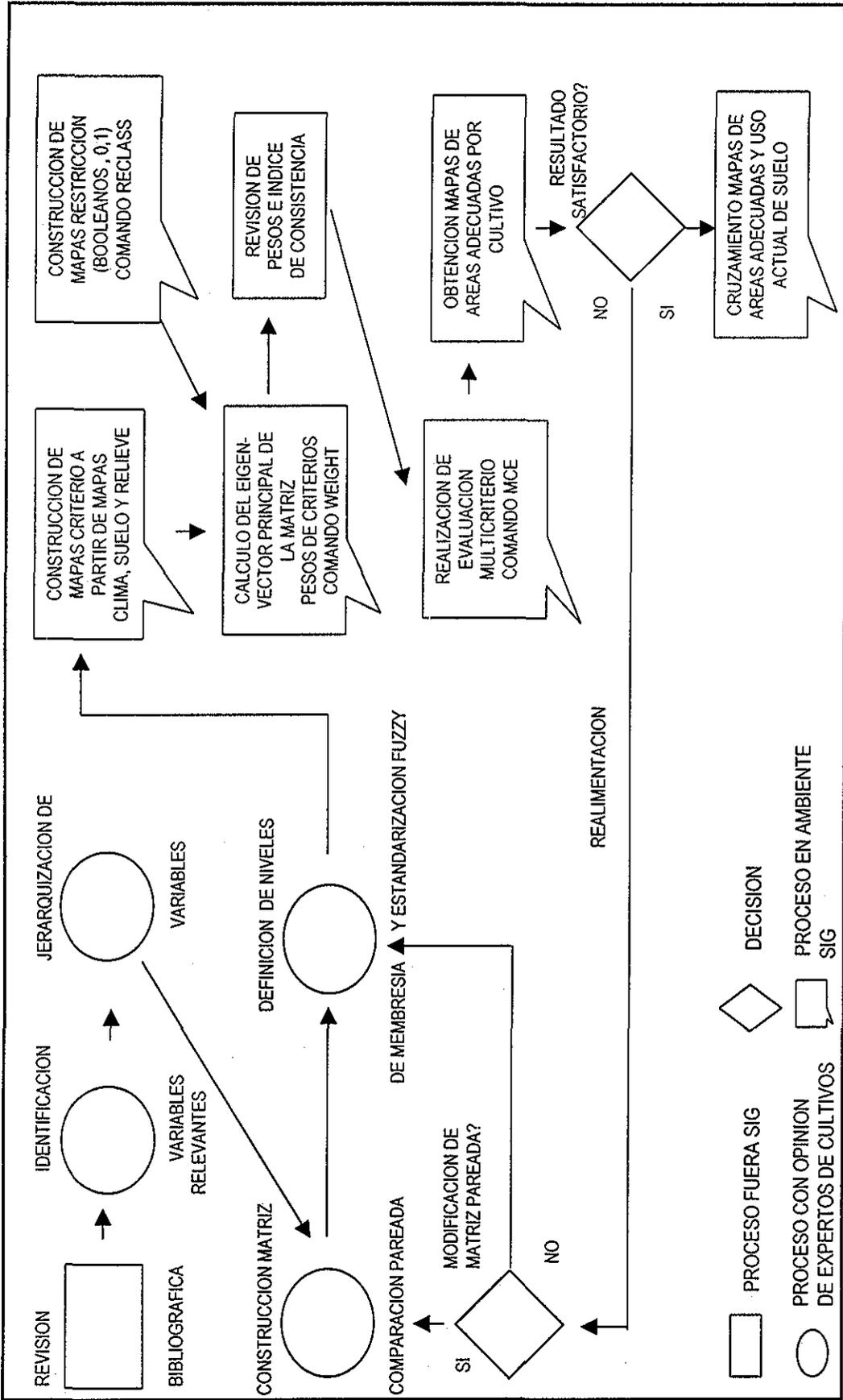


Figura 2.6. Diagrama del proceso empleado para realizar la Evaluación Multicriterio.

Por otro lado, el propósito también fue contar con suficiente información que permitiera corroborar que los rangos mínimos y máximos definidos junto con los expertos para cada factor relevante, fueran congruentes con los niveles reportados en la bibliografía consultada

2.5.2 Entrevista con los expertos de cultivo. Construcción de la matriz de comparación pareada.

Las actividades realizadas en esta etapa fueron: A) Explicación a los expertos del objetivo general de esta evaluación B) Identificación de las variables del medio biofísico (suelo, clima y relieve) más importantes en la definición de áreas adecuadas del cultivo en cuestión De acuerdo con Malczewski (1999) esta etapa puede considerarse como una entrevista de opinión que sirvió para la construcción del conjunto de criterios a usar en la evaluación Además se realizó la jerarquización de las variables identificadas anteriormente Esta actividad fue muy importante ya que de este modo, fue relativamente fácil detectar alguna inconsistencia en la etapa posterior de asignación de pesos a las variables, facilitando a su vez el proceso general de EMC. C) Explicación de qué es la matriz de comparación pareada de criterios, su función y procedimiento de llenado.

Para la construcción de la matriz de comparación pareada se usó la escala de valoración continua de Saaty (1980) Este método emplea una escala con valores de 1/9 (extremadamente menos importante) a 9 (extremadamente más importante) (Tabla 2.4), para valorar la importancia relativa entre dos criterios a la vez (Malczewski 1999). Este método ha sido probado, teóricamente y empíricamente, para una diversidad de estudios de elección de alternativas incluyendo la toma de decisiones sobre ubicación de áreas o sitios con diferentes propósitos (Lai y Hopkings 1995; Siddiqui et al. 1996; Malczewski et al. 1997; Diaz-Salgado y López-Blanco 2000) y está implementado en IDRISI (Eastman 1999a).

Tabla 2.4. Escala de valoración usada para la comparación pareada entre factores

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente Damente	Fuerte- mente	Moderada- damente	Ligera- mente	Igual	Ligera- mente	Moderada- damente	Fuerte- mente	Extrema- damente
← ←			→ →					
MENOS IMPORTANTE						MAS IMPORTANTE		

El primer paso en la construcción de la matriz fue colocar las variables identificadas como relevantes y que por lo tanto fueron consideradas como criterios, tanto en columnas como en hileras, en orden de importancia de acuerdo a la jerarquización previamente realizada, para ir comparándolas par con

par El acomodo por orden de importancia permitió a la vez detectar cualquier inconsistencia en el proceso de la comparación pareada. Dicha comparación se inició con la primera columna y los expertos de cultivo debían de responder a la pregunta:

Con respecto a ese criterio en columna, ¿ Cómo considera usted al criterio en hilera? (el criterio colocado en la segunda hilera)

La respuesta consistía en la valoración de la importancia de un criterio con respecto al otro utilizando la escala descrita anteriormente (Tabla 2.4).

Posteriormente se cuestionaba:

Con respecto a al criterio en columna; ¿ Cómo considera usted al criterio en la siguiente hilera?

El procedimiento anterior continuó, así sucesivamente hasta terminar de comparar el criterio en columna con respecto a todos y cada uno de los criterios en hilera. Una vez que se había concluido con la primera columna y no antes, se prosiguió con la segunda columna, repitiendo la pregunta:

Con respecto a ese criterio en columna, ¿ Cómo considera usted al criterio en hilera en turno?

Así sucesivamente hasta terminar de comparar todos los criterios en hilera con respecto a ese criterio en columna. El procedimiento anterior se repitió hasta llenar la matriz con todas las comparaciones pareadas posibles. Debido a que la matriz es simétrica, solamente la mitad triangular inferior izquierda fue llenada, las celdas restantes son simplemente los valores recíprocos de la mitad triangular utilizada (Eastman et al. 1995). Como se muestra en el siguiente ejemplo: si la importancia del pH del suelo con respecto a la altitud fue valorada como 1/7 (fuertemente menos importante), entonces la importancia de la altitud con respecto al pH del suelo sería de 7 (fuertemente más importante). El tamaño de la matriz dependió del número de criterios involucrados en el proceso de valoración, es decir, si había siete criterios, entonces el tamaño de la matriz fue de 7x7.

Matriz de comparación pareada de criterios

	pH suelo	Altitud		Precipitación
pH suelo	1	7
Altitud	1/7	1
Precipitación				1

Cuando se comparaba entre sí el mismo criterio, por ejemplo, la importancia de la altitud (en columna) con respecto a la altitud (en hilera) el valor asignado de antemano fue de uno (igual en

importancia), lo anterior formaba una línea diagonal con valores igual a uno. Posteriormente, junto con los expertos se definieron los rangos generales de las variables identificadas como relevantes (es decir, criterios). Dichos niveles fueron revisados para que fueran consistentes con lo reportado por la bibliografía.

2.5.3 Construcción de mapas factor, cálculo de pesos y obtención de mapas de áreas adecuadas por cultivo

Como se mencionó en la sección 1.2.4 un criterio es una base sobre la cual una decisión es medida o evaluada. De acuerdo con Eastman et al. (1995), un criterio puede ser de dos tipos: a) factor, el cual es un criterio que resalta o no, la potencialidad de una alternativa específica para la actividad bajo evaluación; y b) restricción, el cual es un criterio que sirve para limitar las alternativas evaluadas.

Asimismo, una de las propiedades que debe de poseer el conjunto de factores (criterios) para representar adecuadamente la naturaleza multicriterio de un problema dado, es la no redundancia o independencia entre todos los factores, para evitar la doble evaluación de alguno de ellos (Malczewski 1999). Para evaluar la propiedad anterior, se obtuvo la matriz de correlaciones de los factores utilizados para identificar áreas adecuadas de los cultivos de maíz y avena (con excepción de profundidad y textura de suelo, por ser variables categóricas), por considerar que estos cultivos son representativos y de los más importantes en la actividad agrícola del DDR Toluca. Para llevar a cabo lo anterior, se usaron los mapas interpolados de cada factor, en el caso de la temperatura mínima y máxima se usaron los mapas interpolados sin el ajuste hecho con el gradiente altotérmico, ya que de lo contrario, se hubiese esperado de antemano, una gran correlación entre la altitud y las temperaturas mínima y máxima.

Además, dado que los mapas interpolados de clima, suelo y relieve poseen diferentes escalas de medida de origen, la EMC requiere que los valores contenidos en los diferentes mapas factor, sean estandarizados o transformados a unidades comparables (Malczewski 1999). Existen varios enfoques que pueden ser usados para hacer a los mapas factor comparables entre sí, tales enfoques son: transformación lineal, función de utilidad/valor (ambos son enfoques determinísticos), el probabilístico y el enfoque de función de membresía fuzzy.

Los conjuntos fuzzy son conjuntos sin límites tajantes, esto es, la transición entre la membresía o pertenencia y la no membresía o no pertenencia de un elemento en el conjunto es gradual (Eastman 1999b; Malczewski 1999). Lo anterior permite que los elementos pertenezcan parcialmente a múltiples conjuntos. De este modo la lógica fuzzy es útil para describir la transición de entidades en el mundo real, donde la pertenencia a un conjunto es realmente una cuestión gradual. Lo anterior significa una lógica que

permite que valores intermedios sean definidos entre evaluaciones convencionales tales como si/no, verdadero/falso, blanco/negro (Malczewski 1999)

Un conjunto fuzzy está caracterizado por un grado de membresía fuzzy (también llamada posibilidad) que varía entre 0.0 y 1.0, indicando un incremento continuo desde la no membresía (no pertenencia) hasta la membresía completa (Eastman 1999b).

La capacidad de los conjuntos fuzzy para expresar la transición gradual de membresía o no membresía y viceversa tiene una amplia utilidad en la definición de entidades geográficas con límites graduales, así como en la operación y análisis, incluyendo por supuesto, el análisis de decisiones espaciales (Malczewski 1999)

La bibliografía sobre el tema de teoría de conjuntos fuzzy y su aplicación es extensa (Zadeh 1965, Klir and Yuan 1995, Robinson 1988; Burrough 1996; Altman 1994), basta decir aquí que el enfoque de función de membresía fuzzy fue utilizado en este trabajo ya que permitió realizar la estandarización de los mapas interpolados continuos, así como la estandarización de mapas provenientes de información categórica, generando mapas factor estandarizados que representaban de una manera más realista el gradiente que se observa en el mundo real (Ceballos-Silva y López-Blanco En prensa, ver Anexo 5)

En nuestro estudio los mapas continuos fueron: temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, pH del suelo, altitud y pendiente. Asimismo, los mapas categóricos fueron: profundidad del suelo y textura del suelo

Utilizando IDRISI, se realizó la estandarización de los mapas factor, usando el enfoque fuzzy (procedimiento FUZZY), para el caso de los mapas continuos se usó la función sigmoideal con varios tipos de membresía: de incremento monótonicamente, de decremento monótonicamente y simétrica, según fuera el caso. Los valores de no membresía (0) y membresía completa (1) se asignaron de acuerdo a la función y tipo de membresía utilizada y a los niveles de los requerimientos (ambientales) de cada factor

El valor de membresía 0, se asignó al nivel de requerimiento ambiental considerado como de muy baja potencialidad para cada factor. Por el contrario, el nivel de membresía 1, se asignó al nivel del requerimiento ambiental considerado como de muy alta potencialidad para cada factor

Para el caso de mapas factor categóricos (profundidad y textura de suelo), se definieron cinco categorías de potencialidad: Muy Bueno (5), Bueno (4), Medio (3), Bajo (2) y Muy Bajo (1). En el procedimiento de IDRISI se usó la opción de función definida por el usuario y el grado de membresía para cada categoría se definió usando números fuzzy (Malczewski 1999)

Los números fuzzy son un conjunto de valores graduales, definido en el dominio de los números reales, los cuales poseen las propiedades de normalidad y convexidad y que además proporcionan las bases para la definición de variables lingüísticas o variables fuzzy (Malczewski 1999:130). Así, los números fuzzy son estados de una variable lingüística, estos estados son representados por conceptos lingüísticos tales como: "muy corto", "corto", "medio", "largo" y así sucesivamente. A partir de estos conceptos lingüísticos pueden ser asignados números fuzzy a diferente información categórica (por ejemplo, diferentes niveles de pendiente del terreno) (Malczewski 1999:133). En nuestro caso, como se mencionó anteriormente, esta información categórica definida en términos de áreas adecuadas para cultivos fue: Muy Bueno, Bueno, Medio, Malo y Muy Malo. La asignación de números fuzzy a cada categoría permitió definir el grado de membresía a una función fuzzy.

De este modo fueron construidos todos los mapas factor estandarizados. Para ambos casos, es decir mapas continuos y mapas categóricos y dado que el procedimiento de EMC utilizado (sumatoria lineal combinada) requiere que los scores o niveles de los criterios sean números enteros, se usó la opción de mapas byte, para producir mapas estandarizados con valores entre 0 y 255. El valor 0 está asociado al nivel muy bajo de potencialidad y el valor 255 está asociado al nivel muy alto de potencialidad.

Asimismo se construyó el mapa restricción (Booleanos 0 y 1), el cual consideró las siguientes clases de información como 0 (no aptas para la evaluación en cuestión): cuerpos de agua permanentes, cumbre volcánica, ciudades y áreas inundadas.

Posteriormente y a partir de la matriz de comparación pareada construida como se explicó en la sección anterior, se calcularon los pesos de importancia relativa para cada uno de los mapas factor. Dichos pesos se obtuvieron del cálculo del eigenvector principal de la matriz, utilizando el procedimiento (WEIGHT) disponible en IDRISI. Dichos pesos se revisaron, para analizar de manera general que fueran congruentes con las valoraciones otorgadas por los expertos en la construcción de la matriz pareada.

Debido a que para la construcción de la matriz de comparación pareada pueden existir múltiples formas por medio de las cuales la importancia relativa de los criterios pueda ser estimada, es posible también determinar el grado de consistencia que ha sido usado en el desarrollo de las valoraciones. Saaty (1980) indica el procedimiento mediante el cual, una medida de consistencia conocido como Índice de Consistencia, puede ser calculada. Este índice indica la probabilidad de que las valoraciones de la matriz fueran generadas aleatoriamente. De este modo Saaty señala que matrices con un índice mayor a 0.10 deben de ser re-evaluadas (Eastman et al. 1995). Debido a lo anterior, el Índice de Consistencia fue

calculado cuidando que se encontrara dentro de los límites establecidos, de no ser así, en algunos casos la matriz de comparación pareada fue re-evaluada

Una vez que se obtuvieron los mapas factor estandarizados, así como sus pesos y los mapas restricción, se realizó la Evaluación Multicriterio, para obtener los mapas de áreas adecuadas para cada cultivo, utilizando el procedimiento (MCE) de IDRISI. Dicho procedimiento utiliza la combinación lineal ponderada, el cual es uno de los procedimientos más utilizados en la evaluación multicriterio (Eastman et al 1995; Jankowski 1995) Con dicho procedimiento los factores son combinados aplicando un peso a cada uno de ellos, el cual es multiplicado por su nivel (0 a 255 en este caso) seguido de la sumatoria de los resultados hasta producir un mapa de aptitud o potencialidad, es decir:

$$S = \sum w_i x_i$$

donde:

S = potencialidad

w_i = peso del factor i

x_i = nivel del factor i (en nuestro caso, de 0 a 255)

Cuando restricciones Booleanas (mapas de restricción) también son usadas, el procedimiento anterior puede ser modificado multiplicando la potencialidad calculada de los factores por el producto de las restricciones, es decir:

$$S = \sum (w_i x_i) * \prod c_j$$

donde:

c_j = nivel de la restricción j

\prod = producto

Después se revisaron los mapas resultantes para analizar que las áreas por nivel de potencialidad estuvieran en general espacialmente bien ubicadas de acuerdo a los rangos por variable utilizados

2.5.4 Realimentación de la EMC

Después de realizar la EMC y obtener los mapas de áreas adecuadas por cultivo, se realizaron nuevamente entrevistas con los expertos de cultivos. El propósito de lo anterior fue analizar conjuntamente los resultados alcanzados, poniendo énfasis en la definición de los rangos generales usados para cada factor, así como en la veracidad en la identificación de las áreas adecuadas para los cultivos considerados. También se revisó la consistencia en la estimación de la importancia relativa de cada factor a través del análisis del vector de pesos y de que el Índice de Consistencia obtenido se encontrara dentro de los límites

establecidos como aceptables (Saaty 1980) De este modo los expertos analizaron y aprobaron los resultados en relación a la extensión y distribución de las áreas adecuadas o potenciales para cada cultivo

2.5.5 Cruzamiento de los mapas de uso de suelo y áreas adecuadas

Para cada cultivo se obtuvo una tabla producto del cruzamiento de los mapas de uso/cobertura del suelo y áreas adecuadas, para ubicar dichas áreas dentro de zonas de agricultura actual y obtener las estadísticas más precisas sobre las áreas encontradas para cada cultivo Antes de realizar el cruzamiento anteriormente descrito, el mapa de áreas adecuadas (ya estandarizado y con valores entre 0 y 255), fue reclasificado en 10 clases para que el cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo, arrojara resultados interpretables Las clases cercanas al 0 fueron consideradas como de muy bajo potencial y por el contrario las clases cercanas al 10 se consideraron como de muy buen potencial

CAPITULO 3. EVALUACION DE LA CALIDAD DE LA INFORMACION Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS BASES DE DATOS

En cuanto a la calidad de los datos, es reconocido que los conjuntos de datos espaciales pueden contener numerosos errores e imprecisiones (Heywood et al 1995). Mientras que, con respecto al procesamiento no automatizado, el procesamiento digital de datos geográficos trae enormes beneficios, dado que los análisis son más rápidos, precisos y sofisticados, también se hacen más evidentes las deficiencias en los datos

Esto puede conducir a problemas serios, no sólo en la exactitud de los resultados, sino también en las consecuencias de tomar decisiones basadas en datos de pobre calidad (Goodchild 1993). La calidad es difícil de definir para los datos espaciales, dado que a diferencia de productos manufacturados, los datos no tienen propiedades físicas que permitan evaluar fácilmente su calidad (Veregin 1999) La calidad de los datos está asociada a una gran variedad de conceptos interrelacionados como son: exactitud, error, precisión y resolución. Así, la definición de la calidad de los datos, está en función de qué tanto, ellos cumplen con las expectativas de un usuario para realizar una tarea específica (Jones 1997)

En esta investigación se usaron diferentes bases de datos, las cuales no fueron homogéneas en su resolución tanto espacial como temporal. La base de datos de clima fue construida a partir de la información proveniente de las estaciones meteorológicas, las cuales en general, no representan la variabilidad espacial presente en el área de estudio. El período considerado dependió fundamentalmente de la disponibilidad de los datos, lo cual fue heterogéneo entre las diferentes estaciones consideradas

La base de datos de suelo fue construida por un lado, a partir de información proveniente del muestreo de suelos (INIFAP 1994), realizado básicamente sólo para el área agrícola del área de estudio. A partir de dicha información se generaron los mapas temáticos interpolados, tal y como se explicó en la sección respectiva de Metodología. Por otro lado, también se usó la información cartográfica, a escala 1:50,000, para construir un mapa categórico de profundidad de suelos

Adicionalmente se usó información proveniente del procesamiento de una imagen de Landsat TM de 1996 con una resolución aproximada de 30 m de tamaño de pixel, para generar un mapa de uso/cobertura de suelo, cuya estimación de exactitud se hizo a través de la construcción de la matriz de error espectral y la matriz de error real, lo cual se reporta en la sección correspondiente del capítulo de resultados. Con respecto a la información del relieve, a partir del Modelo Digital del Terreno, el cual tiene una resolución espacial de 90 m, se generaron los mapas de altitud y pendiente. En este contexto, el

propósito de esta parte de la investigación, fue obtener una primera aproximación de la exactitud de la Base de Datos de relieve, así como evaluar la variabilidad espacial de algunos elementos de las Bases de Datos de clima y suelo.

Primero se estimó la exactitud de los datos de altitud (provenientes del Modelo Digital del Terreno), dado que esta variable es una de las más importantes del relieve y además juega un papel muy importante como elemento del medio biofísico, en la definición de las áreas adecuadas para los cultivos. Después mediante el análisis geoestadístico se evaluó la variabilidad espacial de las bases de datos de suelo y clima. De esta manera se trató de medir en una primera aproximación, la confiabilidad de la información utilizada y obtener un panorama general de las Bases de Datos en este sentido.

3.1 Procedimiento para la evaluación del MDT

El procedimiento se llevó a cabo en varias etapas: 1) Obtención de los datos de altitud directamente de las cartas topográficas 1:50,000 del INEGI (varias fechas) para 111 puntos de varias zonas representativas del área de estudio, 2) obtención de los datos de altitud del MDT de los mismos 111 puntos, mediante el cruzamiento del archivo de puntos, con las coordenadas UTM y el MDT, 3) realización del análisis de regresión simple entre ambos conjuntos de datos de altitud previamente descritos.

3.2 Procedimiento para el Análisis Geoestadístico

El objetivo de realizar este análisis fue obtener más información sobre la variabilidad espacial de algunos elementos que conformaron las bases de datos de clima y suelo. Específicamente se realizó el análisis geoestadístico de las variables: precipitación, evaporación, temperatura mínima y máxima. Las cuales provenían de las estaciones meteorológicas, así como: pH del suelo y contenido de arena, limo y arcilla, las cuales provenían del muestreo de suelos (INIFAP 1994), descrito en la sección 2.2.2. En todos los casos se disponía de la localización geográfica de los datos, lo cual fue una condición necesaria para realizar el análisis. De este modo se pretendió obtener información sobre la variabilidad espacial de dichas variables, lo cual permitiría caracterizar más precisamente el comportamiento de las mismas en el área de estudio.

Una parte importante del análisis consistió en usar el variograma, el cual es la herramienta estadística básica en Geoestadística y que sirve para estimar qué tan similares son los valores, en función de la distancia que hay entre ellos (Armstrong 1998:10), en una dirección dada (llamada *lag*), (Oliver 1996). Es decir por medio de esta herramienta se puede representar gráficamente la variabilidad espacial.

de un fenómeno en relación a la distancia, calculando la varianza de pares de puntos a diferente separación.

En relación a lo anterior se puede decir que, en general, una serie de pares de puntos que están cercanos el uno al otro, en promedio, tienen baja varianza (es decir, están mejor correlacionados), que los pares de puntos de posición lejana. Para un ángulo fijo, el variograma indica qué tan diferentes se vuelven los valores cuando la distancia se incrementa. Un variograma típico es el que alcanza un límite llamado *sill* o meseta a una distancia llamada *range* (Chilés y Delfiner 1999).

Después de que el variograma ha alcanzado su valor límite (su *sill*), no hay ninguna correlación entre las muestras, esa distancia crítica, es llamada *range* (Vauglin 1999), o longitud de la correlación de los datos y es una medida de la variabilidad espacial. Un *range* largo implica homogeneidad en los datos, mientras que un *range* corto implica alta variabilidad espacial. Otro parámetro del análisis geoestadístico, es el *nugget*, el cual es una varianza hipotética que puede ser atribuida a los errores en las mediciones y a la variabilidad observada en distancias cortas (Oliver 1996; Armstrong 1998).

Para llevar a cabo el análisis geoestadístico se utilizó el procedimiento de correlación espacial (SPATCORR) disponible de ILWIS, el cual examina la correlación de un proceso aleatorio con él mismo, en el espacio, mostrando de manera gráfica la correlación entre una serie de puntos o un mapa y ellos mismos para diferentes ajustes en tiempo y espacio, visualizando así la variabilidad espacial del fenómeno bajo estudio.

El procedimiento utilizado para este análisis en ILWIS, fue el siguiente:

- 1) Primeramente se prepararon archivos con extensión PNT, los cuales tenían la información de las coordenadas UTM de las estaciones meteorológicas, para el caso de la base de datos de clima, y las coordenadas UTM del muestreo, para el caso de la base de datos de suelo. Dichos archivos fueron importados del formato ASCII a la versión 2.3 de ILWIS, para generar archivos de puntos.
- 2) Después se prepararon archivos (con extensión TBL), uno para cada variable, es decir con los datos de precipitación, temperatura mínima, máxima y evaporación para el caso de clima, y con los datos de pH, contenido de arena, limo y arcilla para el caso de suelos. Esos archivos se importaron de formato ASCII a la versión 2.3 de ILWIS con extensión TBT, es decir en forma de tablas de atributos. A dichas tablas se les cambió el *domain*, utilizando el que se definió en el archivo de puntos creado anteriormente.

- 3) A los archivos de puntos del paso uno, se les editaron sus propiedades para indicar que tenían ligada una tabla de atributos (creada en el paso previo)
- 4) Después se realizó el análisis geoestadístico, el cual produjo una tabla con los siguientes valores: distancia, Núm de pares de puntos, la autocorrelación espacial estandarizada, la autovarianza espacial y el variograma empírico. Posteriormente se graficaron los datos de distancia (eje X, en km) y variograma empírico (eje Y, en las unidades de la variable en cuestión elevadas al cuadrado) y se ajustó un variograma teórico para cada una de las variables en consideración. La elección del tipo de modelo del variograma teórico, se basó en la forma que representara mejor el comportamiento de la variable en cuestión

3.3 Resultados de la evaluación de la calidad y variabilidad espacial de las Bases de Datos

3.3.1 Análisis regresión de datos de altitud

Del análisis de regresión simple entre los datos de altitud provenientes por un lado del MDT y por el otro lado, de la medición directa en las cartas topográficas respectivas, se obtuvo un coeficiente $R^2=0.981$, lo cual significa que hubo una gran correspondencia entre ambos conjuntos de datos. Además el valor de pendiente de la recta fue de 0.988, la cual expresada en grados fue de 44.0 y con un error estándar de 39.0, lo cual significa una alta asociación entre ambos datos.

Asumiendo que los valores obtenidos de las cartas topográficas a escala 1:50,000 del INEGI, son más exactos (ya que la escala es mayor), se realizó un análisis de las diferencias observadas entre ambos conjuntos de datos y se obtuvo que del total de observaciones hechas ($n=111$), en el 12.6% (14 observaciones) se presentó una diferencia de más de 50 m en los valores de altitud. En el resto 87.4% (97 observaciones) se presentaron diferencias de menos de 50 m.

Con respecto al grupo en el cual se observaron diferencias mayores de 50 m en los valores de altitud, se obtuvo que el 57% (8 observaciones) se ubicaron en altitudes mayores a los 3,000 msnm, el restante 43% (4 observaciones) se ubicaron a altitudes menores a los 3,000 msnm. Dicho nivel de altitud, se tomó como referencia, ya que en el área de estudio, a partir de esa altitud se presentan las condiciones más heterogéneas del relieve.

En relación al grupo en el cual se observaron diferencias menores de 50 m, en las valoraciones de altitud, se obtuvo que el 35% (34 observaciones), se ubicaron en altitudes mayores a los 3,000 msnm, el restante 65% (63 observaciones) se ubicaron en altitudes menores a 3,000 msnm. En general se puede decir que el mayor porcentaje de las diferencias en las mediciones de altitud fueron menores a 50 m.

Además, dentro de las observaciones con diferencias mayores a 50 m, el mayor porcentaje se ubicó en altitudes mayores a los 3,000 msnm, al analizar las posiciones geográficas de los puntos anteriores, se observó que éstos, se encuentran ubicados en las áreas del Volcán Nevado de Toluca y en el norte de la Sierra de las Cruces. Es decir, son áreas con mayor heterogeneidad en el relieve, lo cual puede explicar la situación anterior

Por lo anterior, en general, se puede decir que hay una cercanía importante entre ambas fuentes de información a pesar de poseer diferente resolución. Además se puede comentar que la confiabilidad del MDT es buena, ya que a pesar de provenir de una escala 1:250,000, sus valores de altitud fueron bastante similares a aquellos provenientes de las cartas topográficas a escala 1:50,000.

3.3.2 Análisis Geoestadístico de las variables de clima y suelo

Los parámetros y resultados obtenidos del análisis geoestadístico para las variables de clima (precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima y evaporación), se muestran en la Tabla 3.1. En ella se puede observar que de acuerdo a los valores de *nugget*, la variable que mostró mayor variabilidad espacial fue la precipitación, seguida de la evaporación, mientras que la variable con menor variabilidad espacial fue la temperatura mínima (valor 0 de *nugget*).

En la Figura 3.1, se puede observar, para la variable precipitación, el comportamiento del variograma empírico con respecto a la distancia, así como el variograma teórico usando un modelo exponencial. En dicho modelo el valor de *sill* o meseta fue de 39,000 que correspondió a un valor *range* de 35,000 m, después del cual los valores de esta variable ya no muestran ninguna correlación. Este valor *range* fue el menor de las cuatro variables de clima consideradas (Tabla 3.1), lo cual indica también que en esta variable se observó la mayor variabilidad espacial.

Tabla 3.1 Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas teóricos para las variables de clima

Variable	Modelo	Nugget	Sill	Range (m)	Lag (m)
Precipitación	Exponencial	20000	39000	35000	10000
Temperatura Mínima	Gaussiano	0	12	48000	10000
Temperatura Máxima	Gaussiano	4	7	48000	10000
Evaporación	Gaussiano	8000	40000	36000	10000

Con respecto a la temperatura mínima, en la Figura 3 2, se muestra el comportamiento del variograma empírico con respecto a la distancia, así como el variograma teórico utilizando un modelo Gaussiano. El *sill* se alcanzó en el valor 12 (eje y), que correspondió a un valor de *range* de 48,000 (m) en el eje X. Se puede decir que después de esa distancia los valores de esta variable ya no muestran ninguna correlación. También se puede observar que a corta distancia (al principio del eje X), esta variable es más continua ya que el crecimiento en el eje de la distancia se mantiene, para después incrementarse de acuerdo a un modelo Gaussiano, lo anterior indica que a distancias cortas no hay mucha variabilidad espacial en lo que a temperatura mínima se refiere (Díaz Avalos 2001-2002 Comunicación personal), lo que coincide también con valores grandes (48,000) en el *range*. Por lo anterior, se observó que esta variable presentó menor variabilidad espacial que el resto.

El comportamiento de la temperatura máxima se muestra en la Figura 3 3, en la cual se observa el variograma empírico en relación con la distancia (m) y el variograma teórico usando un modelo Gaussiano, en el cual el valor *sill* fue de 7, que correspondió a un *range* de 48,000 m. Después de esa distancia los valores de esta variable ya no muestran correlación alguna. Al igual que la temperatura mínima, en esta variable se mostró poco incremento del variograma empírico a distancias cortas, lo cual habla también de la naturaleza continua y de la menor variabilidad espacial en ese intervalo.

Con respecto a la evaporación en la Figura 3 4, se observa el variograma empírico en relación a la distancia y el variograma teórico usando un modelo Gaussiano, en el cual el valor *sill* fue de 40 que estuvo asociado a un *range* de 36,000 m, después del cual los valores de esta variable, ya no están correlacionados. En general y de acuerdo a los valores correspondientes de *nugget* y *range*, se puede comentar que la variable con mayor variabilidad espacial fue la precipitación, seguida de la evaporación, después la temperatura máxima y finalmente la menor variabilidad espacial se mostró en la temperatura mínima.

Asimismo, en cuanto a las variables de clima usadas, se observó una gran variabilidad espacial, lo cual es reflejo tanto de la distribución aleatoria de las estaciones meteorológicas consideradas, como del número de ellas. Uno de los beneficios del análisis geoestadístico es la obtención de los parámetros de *sill*, *range*, *nugget*, los cuales pueden ser usados como parámetros para realizar la interpolación *Kriging* (Armstrong 1998). Sin embargo, dada la mala distribución de las estaciones y al escaso número de ellas (35), para el caso de las variables de precipitación y evaporación la interpolación *kriging* no fue usada. Por otra parte, la variación espacial de las temperaturas máximas y mínimas en relación a la altitud, fue

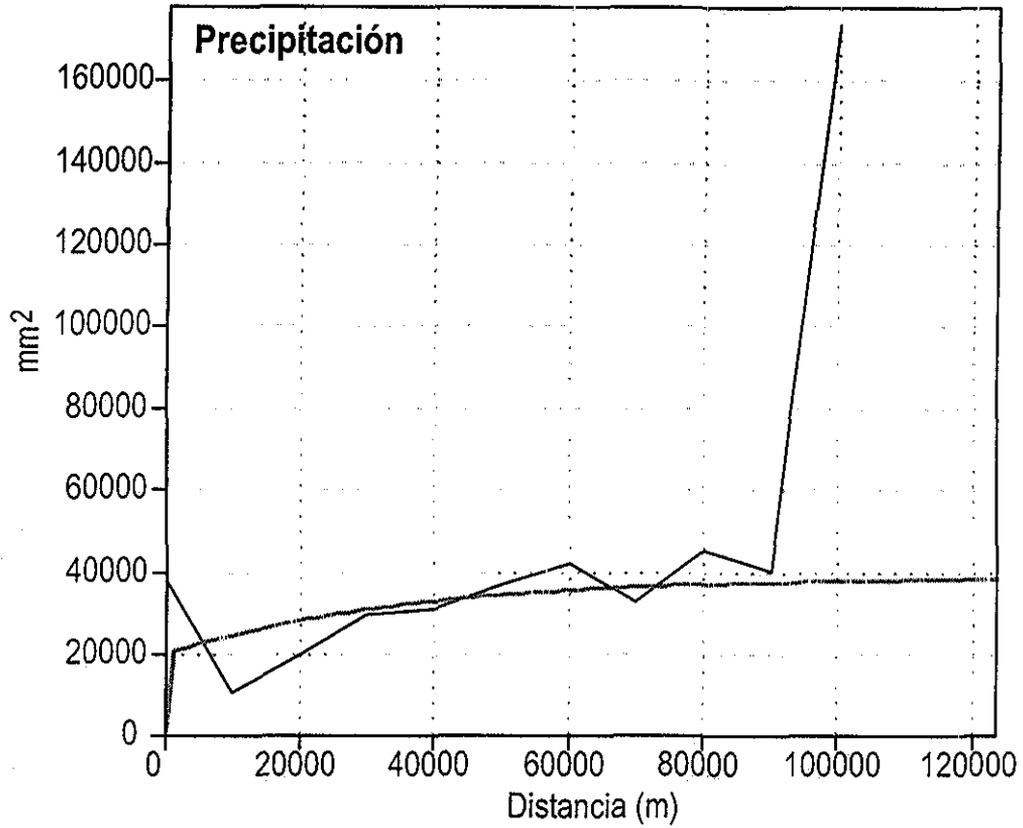


Figura 3.1. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la precipitación

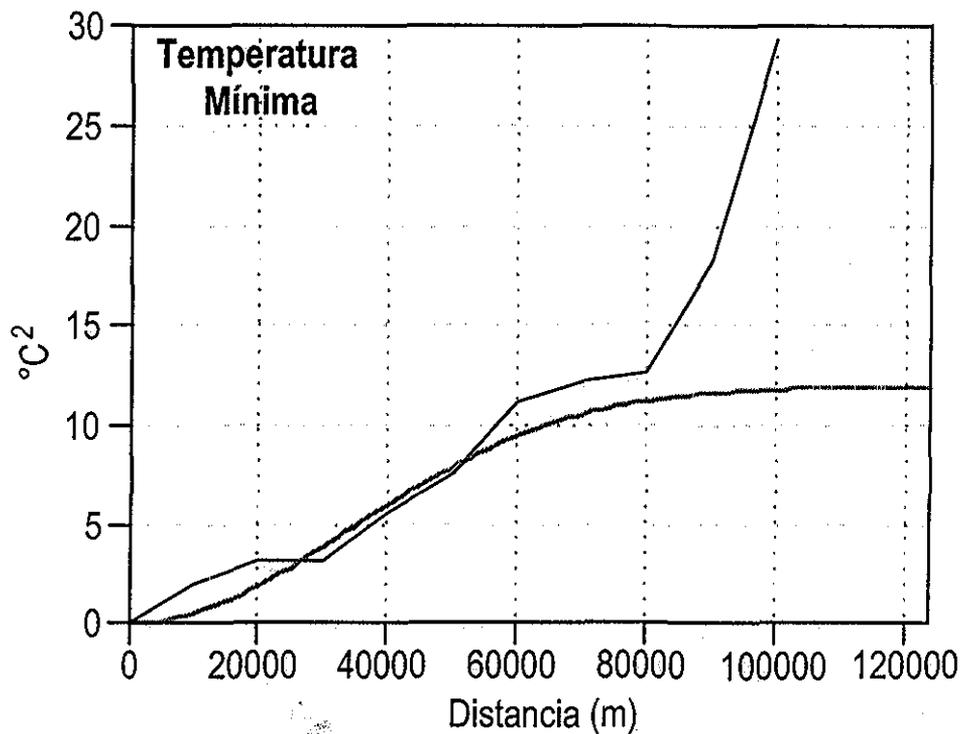


Figura 3.2. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la temperatura mínima.

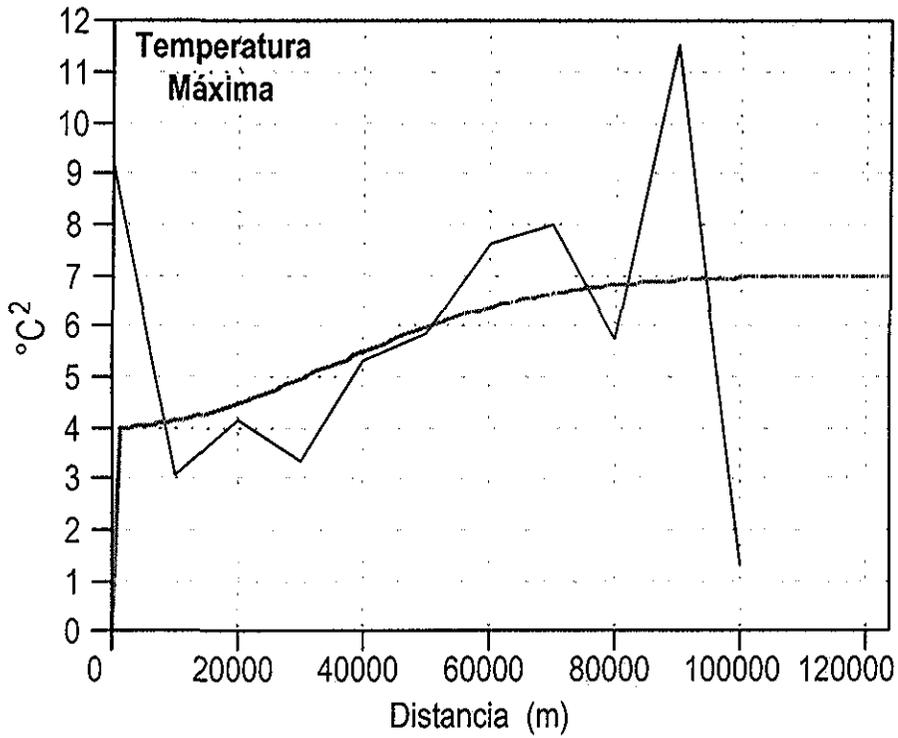


Figura 3.3. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la temperatura máxima.

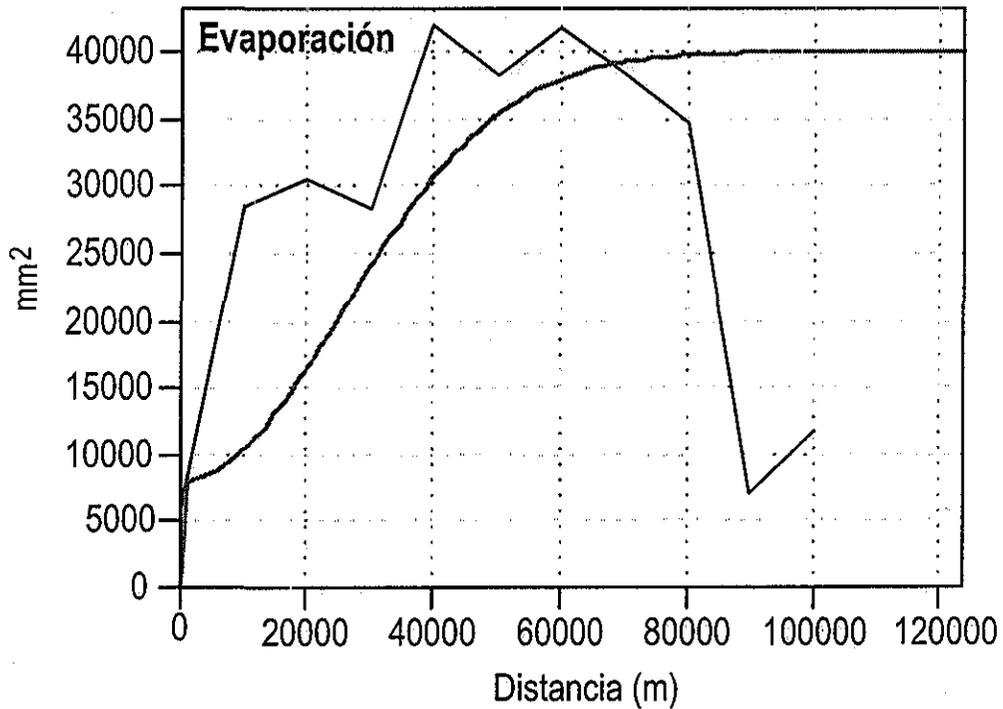


Figura 3.4. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) de la evaporación.

correctamente expresada mediante el cálculo del gradiente altotérmico, el cual fue usado para ajustar los mapas interpolados respectivos, haciendo innecesario el uso de la interpolación *kriging*

Con respecto al análisis geoestadístico de las variables de suelo (pH y contenido de arena, limo y arcilla), en la Tabla 3.2, se muestran los resultados obtenidos en el ajuste del variograma.

De la tabla anterior se observa que dado el valor de *nugget*, el contenido de Arena mostró la mayor variabilidad (tal vez eso explique que de acuerdo a los datos obtenidos del muestreo de suelos, en el área de estudio se encontraron 10 de las 12 clases existentes de textura de suelos) Además, la variable que mostró ser más continua fue el pH (con menor valor de *nugget*), con un rango en los valores puntuales de 6 ya que el valor mínimo encontrado fue 2.7 y al valor máximo encontrado fue de 8.7

Tabla 3.2. Parámetros utilizados en el ajuste de los variogramas teóricos para las variables de suelo

Variable	Modelo	Nugget	Sill	Range (m)	Lag (m)
pH	Exponencial	0.40	0.47	22000	1000
Arena	Exponencial	150	180	15000	1000
Limo	Exponencial	45	50	20000	1000
Arcilla	Exponencial	80	116	19000	1000

En la Figura 3.5, se puede observar para la variable pH del suelo, el comportamiento del variograma empírico en relación a la distancia (m) y el variograma teórico que representa la tendencia general de esta variable, usando un modelo exponencial. Se observa en dicha figura, que el valor *sill* o meseta se alcanzó en el valor 0.47 del variograma empírico, lo cual indica que a una distancia mayor a los 22,000 m (eje y de la gráfica), las muestras de esta variable ya no están correlacionadas.

Asimismo, en la Figura 3.6 se muestra el comportamiento del variograma empírico en función de la distancia y el variograma teórico usando el modelo exponencial, para la variable contenido de Arena. Se puede observar que el *sill* se alcanzó a un valor de 180, a este punto de estabilización corresponde aproximadamente una distancia de 15,000 m, lo cual indica que a distancias mayores que ésta, las muestras ya no están correlacionadas entre sí.

Con respecto a la variable contenido de Limo, en la Figura 3.7, se puede observar que el valor *sill* se alcanzó en 50 en la escala del variograma empírico, lo cual correspondió a una distancia aproximada de 20,000 m después de la cual se puede decir que las muestras de esta variable ya no están correlacionadas, de acuerdo a su valor de *nugget* (Tabla 3.2), esta variable mostró menor varianza con respecto al contenido de arena y arcilla.

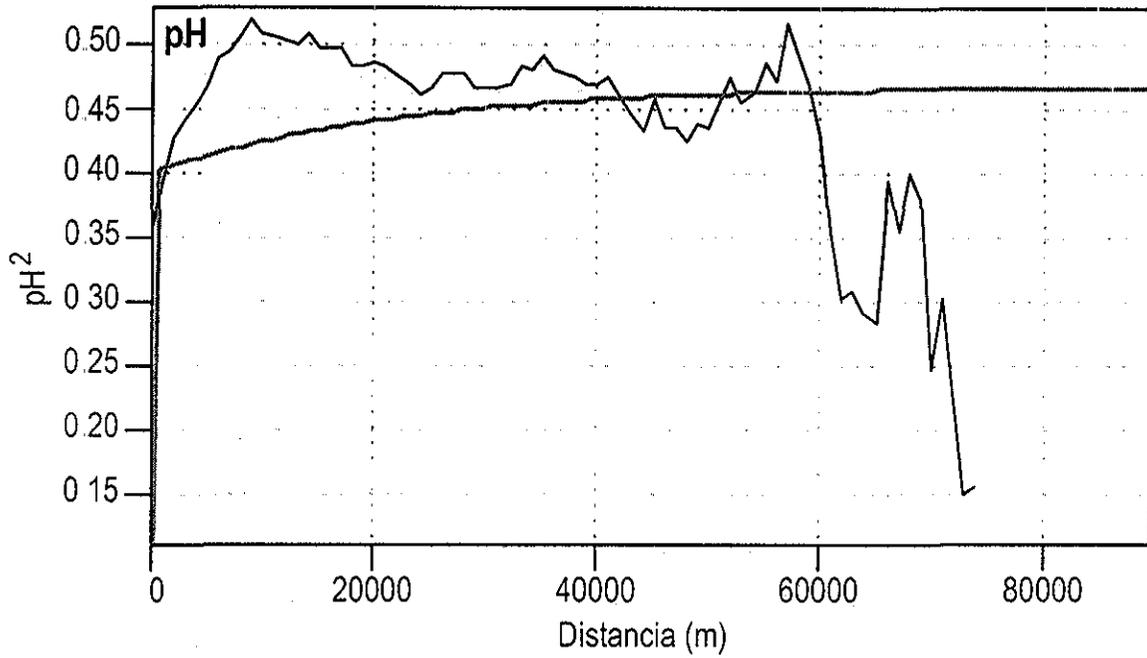


Figura 3.5. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del valor de pH del suelo.

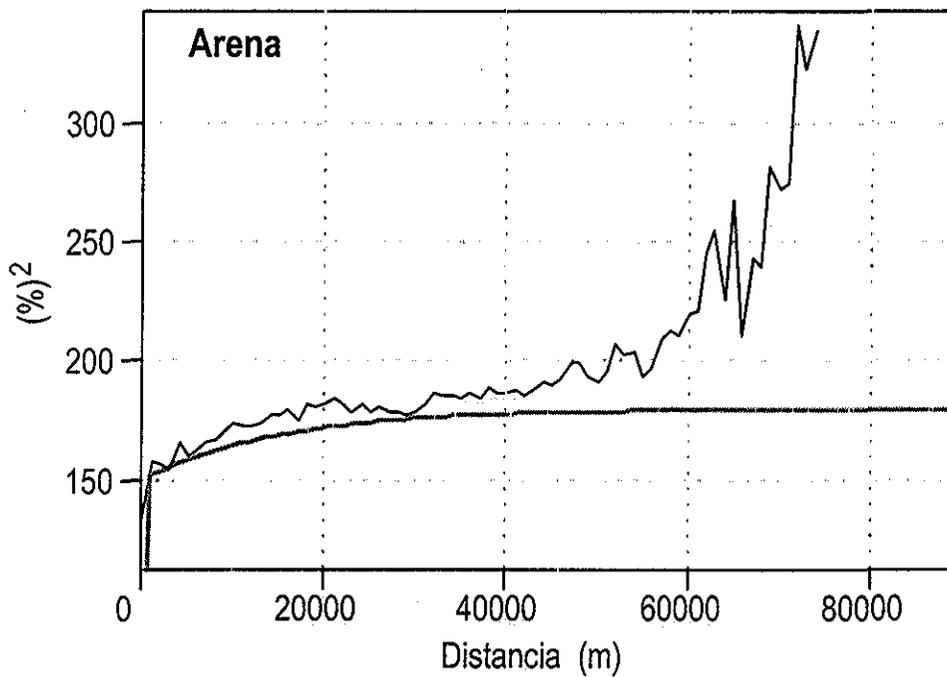


Figura 3.6. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de arena del suelo

Para la variable arcilla, se observa en la Figura 3 8, que el valor *sill* se alcanzó en 116 de la escala del variograma empírico, lo cual correspondió a un *range* o distancia de 19,000 m después de la cual los datos de esta variable no están ya correlacionados. Además de acuerdo con los valores reportados en la Tabla 3 2, esta variable mostró mayor varianza que el contenido de limo (tuvo mayor valor de *nugget*), pero menor varianza que el contenido de arena.

Para todas las variables antes mencionadas fue consistente el comportamiento de los valores de *range*, ya que a mayores valores de este parámetro se observa menor variabilidad espacial (caso del pH) y a menores valores, la variabilidad espacial es mayor (caso del contenido de arena)

3.4 Consideraciones generales

La exactitud de la base de datos de relieve, proveniente del MDT, fue suficiente para la escala usada en la EMC. Así los productos obtenidos a partir de esta información, es decir los mapas de pendiente (%) y altitud (msnm) son confiables y pueden ser útiles en el proceso de EMC para identificar áreas adecuadas de cultivos.

Para la base de datos de suelo se puede decir que, los valores de *range* para todas las variables usadas siempre fueron mayores que la distancia de la retícula empleada para el muestreo de suelo (1,000 m), lo anterior da una idea de la homogeneidad espacial observada en los datos de suelo, ya que mientras más grandes sean los valores de *range*, mayor es la uniformidad espacial. De acuerdo a lo anterior, y dado el nivel regional del muestreo, éste cumplió con su objetivo en términos de coleccionar información representativa acerca de algunas propiedades del suelo. Por lo tanto, se considera dicha información como confiable para procesarla en forma de mapas para la EMC.

Como se explicó anteriormente, uno de los beneficios del análisis geoestadístico es la obtención de los parámetros de *sill*, *range*, *nugget*, los cuales pueden ser usados como parámetros para realizar la interpolación *kriging*, sin embargo, dada la variabilidad espacial estimada para las variables de suelo y dado el tamaño de la retícula empleado en el muestreo, la interpolación *kriging*, seguramente no hubiera mejorado sustancialmente los mapas interpolados obtenidos.

En esta primera aproximación se trató de medir, la confiabilidad de la información utilizada y obtener un panorama general de las Bases de Datos en ese sentido. El análisis de correlación y el geoestadístico fueron herramientas útiles y factibles de implementar en nuestro caso y proporcionaron información adecuada para poder cumplir el propósito fundamental de esta sección.

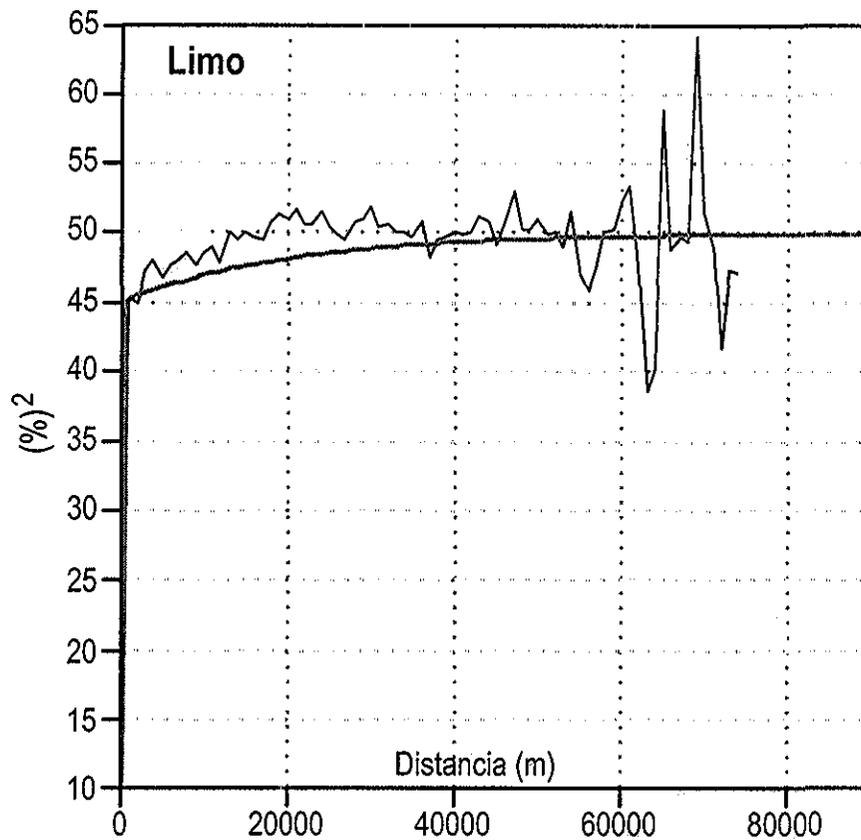


Figura 3.7. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de limo del suelo.

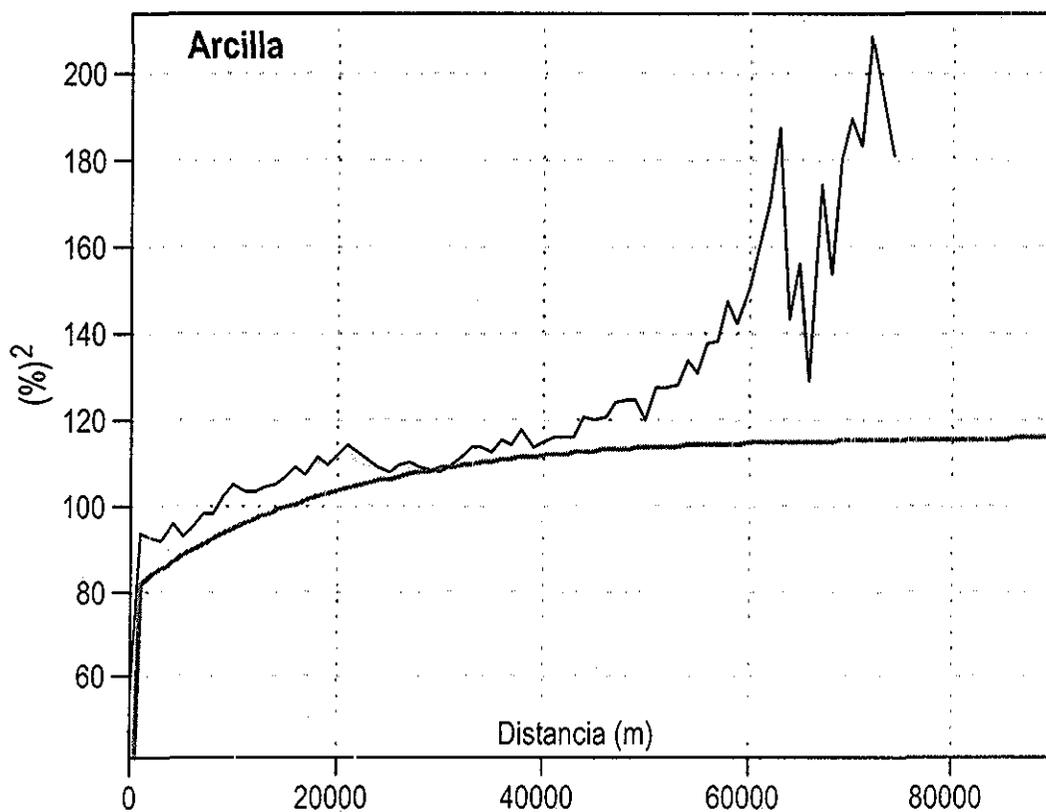


Figura 3.8. Variogramas empírico (línea negra) y teórico (línea gris) del contenido de arcilla del suelo.

En general las valoraciones de exactitud y representatividad de las Bases de Datos, no son una práctica común en estudios como este, de valoración del medio físico, sobre todo desde el punto de vista geoestadístico. Sin embargo es altamente deseable que se incluyan este tipo de análisis, para tener una valoración global de las Bases de Datos usadas y de los posibles errores o sesgos que puedan ser esperados en el procesamiento de la información espacial.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Base de 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 meteorológicas consideradas (Anexo 2), las medias decenales por variable. De acuerdo a la información anterior y para la variable precipitación, se observó que la mayor cantidad de lluvia se presentó en la estación de la localidad de Desierto de los Leones, D.F. (Anexo 3), con 1,327.1 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 al año. 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 al año (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 (Anexo 3), además el promedio anual de esta variable para todas las estaciones fue de 5.8°C. Los meses mas 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, que corresponde al DDR de Coatepec Harinas, con 27°C (Anexo 3). 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 3,200 m (Anexo 2) y la estación con menor altitud fue la de Malinalco, con 1,823 m. La altitud promedio de todas las estaciones consideradas fue de 2,552 m.

Con los valores medios decenales anteriormente mencionados, se construyeron los archivos de entrada, de acuerdo al formato IDRISI, para llevar 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.

Dichos mapas fueron revisados para analizar el resultado de la interpolación y cuidar que no se presentaran resultados contradictorios o inconsistentes de acuerdo a la base de datos utilizada y al conocimiento del área de estudio. Como se indicó en el capítulo de Metodología, los mapas de temperatura mínima y máxima se ajustaron de acuerdo a un gradiente altotérmico específico obtenido para el área de estudio, lo cual se explicará más adelante, los mapas de precipitación y evaporación se utilizaron sin ningún ajuste. Todos los mapas así obtenidos se usaron para la construcción de los diferentes mapas criterio necesarios para la EMC.

En cuanto al ajuste altotérmico, los resultados del análisis de regresión fueron:

$$R^2 = 0.9; \quad b \text{ (constante)} = 30\,476; \quad a = -0.007$$

Sustituyendo los valores de a y b en la ecuación (1), se obtuvo:

$$Y = -0.007(x) + 30\,476$$

Para dos valores de x (altitud), por ejemplo $x = 1,000$ y $x = 2,000$, se obtuvieron los siguientes valores de Y (temperatura):

$$Y = 23\,476$$

$$Y = 16\,476$$

Con estos datos se procedió a calcular el gradiente térmico (g) específico para la zona de estudio utilizando la fórmula (2):

Sustituyendo valores

$$\frac{23\,476 - 16.476}{2,000 - 1,000} = \frac{g}{100}$$

desarrollando la proporción anterior se obtuvo que:

$$g = 0.7$$

Es decir, por cada 100 metros de altitud hay una disminución de 0.7°C grados en la temperatura. Una vez conocido el gradiente térmico del área de estudio, el siguiente paso fue implementar el ajuste que debía hacerse a los mapas de temperatura máxima y mínima. Para realizar lo anterior se utilizó la fórmula (2), la cual fue aplicada a cada pixel de los mapas respectivos, asumiendo los siguientes valores:

$$\frac{t_2 - t_1}{a_2 - a_1} = \frac{g}{100}$$

Donde:

$$g = 0.7$$

a_1 = altitud de cada pixel del MDT

a_2 = altitud media, asumida como "referencia" para el DDR Toluca = 2,600 msnm

t_1 = valores de temperatura (máxima o mínima) de cada pixel en los mapas interpolados

t_2 = valor de temperatura (máxima o mínima) ajustado por el efecto de altitud

Sustituyendo los valores y despejando t_2 se obtuvo:

$$t_2 = 0.7 [(a_2 - a_1)/100] + t_1$$

Al aplicar a los 72 mapas generados de temperatura máxima y mínima, el ajuste altotérmico, ellos mejoraron en cuanto a mostrar la variación natural en el comportamiento de estas variables en relación con la altitud.

4.2 Base de datos de suelo y relieve

Como se mencionó en el capítulo de Metodología, la información de profundidad de suelos fue obtenida de la digitización de las cartas edafológicas disponibles. Una vez obtenido el mapa raster, éste fue la base para la construcción del mapa criterio que se utilizó para todos los cultivos. Asociando los niveles de profundidad con los niveles de potencialidad de acuerdo a la Tabla 4.1, se obtuvieron los siguientes resultados: se observó que el nivel 5 de potencialidad se extendió sobre 163,879.2 ha que representa el 61.9%, el nivel 4 en 67,379.8 ha (25.5%), el nivel 3 en 17,624.7 ha (6.7%), el nivel 2 en 8,026.2 ha (3.0%) y el nivel 1 en 7,665.8 ha (2.9%). Lo anterior indica que en más del 87% del área actualmente destinada a la agricultura y los 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 (33,316.7 ha) se puede considerar con restricciones para la actividad agrícola, al menos desde el punto de vista de la profundidad de los suelos. Lo anterior resulta lógico considerando el material parental de cenizas volcánicas.

A partir de la información proveniente del muestreo de suelos y utilizando el método geométrico explicado en la sección respectiva, se obtuvo el mapa de clasificación textural. En el área de estudio la distribución de las clases de textura se muestra en la Tabla 4.2.

De la tabla anterior se puede decir que gran porcentaje (más del 94.5%) del área de estudio tiene textura franca y franco arenoso, las cuales son adecuadas para la mayoría de los cultivos. El área con suelos de texturas arcillosas o arenosas, apenas fue de 284.3 ha, que representa un porcentaje insignificante del área total del DDR Toluca.

El mapa de clasificación textural sirvió de base para la construcción de los mapas criterio específicos para cada cultivo. Asimismo, con la información proveniente del muestreo de suelos y usando un algoritmo de interpolación estándar no estadístico, se generó un mapa de pH a partir del cual, se obtuvieron los mapas criterios para los cultivos en los cuales esta variable se definió como relevante.

Tabla 4.1. Fases físicas y profundidad de suelo asociados a nivel de potencialidad

Fase física	Profundidad suelo (m)	Nivel de Potencialidad
Suelos sin fase	> 1	5
Dúrica y Lítica profunda	0.5 - 1	4
Dúrica y Lítica somera	0.1 - 5	3
Gravosa*	0.1 - 5	2
Litosol	0 - 0.1	1

* La fase gravosa tiene asociada la misma profundidad de suelos que las fases dúrica, lítica y petrocálcica somera, sin embargo se consideró para este estudio con menor nivel de potencialidad para la definición de áreas adecuadas de cultivos

Tabla 4.2. Superficie (ha) y porcentaje por clase de textura de suelo

Clase de Textura	ha	%
Franco limoso	16.2	0.006
Franco	203917.5	76.74
Franco arenoso	47399.5	17.83
Arena limosa	181.4	0.06
Arena	9.7	0.003
Franco arcillo-limoso	997.1	0.37
Franco arcilloso	12507.2	4.70
Franco arcillo arenoso	132.0	0.04
Arcilla limosa	277.8	0.10
Arcilla	274.6	0.10

Tabla 4.3. Varianza por Componente Principal (CP) en las bandas de la imagen Landsat 1996

Componente Principal	Varianza
CP 1	90.39
CP 2	4.99
CP 3	3.68
CP 4	0.53
CP 5	0.38
CP 6	0.02

A partir del MDT se generaron 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

4.3 Uso de Suelo y procesamiento de la imagen Landsat TM

El primer análisis que se llevó a cabo fue el de Componentes Principales (CP), en el cual se encontró que los dos primeros componentes explicaron el 95.38% de la varianza de las seis bandas (Tabla 4.3), lo anterior indicó que en esos dos CP se concentró gran parte de la varianza total observada en las bandas utilizadas, de tal manera que esos dos CP podrían ser usados como representativos de la variabilidad presente en los datos de las bandas

Al analizar la estructura interna del CP1 (Tabla 4.4), se observó que las bandas con mayor importancia (de acuerdo a sus eigen valores) fueron: banda 4, banda 3 y banda 5. La estructura interna del CP2 (Tabla 4.4) mostró que las bandas más importantes fueron: banda 1, banda 3, y banda 2

4.3.1 Clasificación supervisada

Para llevar a cabo la clasificación supervisada se realizaron varias pruebas utilizando inicialmente las bandas 3, 4 y 5, que fueron las más importantes en términos de varianza, como se explicó anteriormente. Sin embargo los mejores resultados se obtuvieron utilizando todas las bandas, asimismo se definieron 18 clases espectrales las cuales se pueden ver en la Tabla 4.5. En algunos casos se identificaron diferentes clases espectrales provenientes de la misma clase de información, como en el caso de los cuerpos de agua, cuya respuesta espectral estuvo tal vez determinada por factores tales como: la profundidad, tamaño, naturaleza del cuerpo de agua y contenido de sólidos suspendidos

En cuanto a las clases presentes de bosque, cuando una categoría tuvo varios tipos de bosque, se consideró sólo la asociación sin jerarquizar la dominancia de una especie sobre la otra. Por ejemplo Pino-encino o Pino-oyamel, se usó sólo para indicar la presencia de los dos géneros. La clase sombra de bosque, se refirió a la provocada por la incidencia de los rayos solares al momento del registro de la imagen sobre la vegetación boscosa.

En el caso del suelo agrícola se identificaron varias clases espectrales determinadas posiblemente por su contenido de humedad, sin embargo se trataba en todos los casos de suelos dedicados a la agricultura de temporal. La clase de agricultura de humedad y riego incluyó áreas con humedad disponible, que permite el establecimiento de algún cultivo de ciclo corto (aprovechando la presencia de mantos

Tabla 4.4. Estructura interna de los Componentes Principales (CP) 1 y 2, según sus eigenvalores

CP	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6
CP 1	0.33	0.16	0.54	0.59	0.44	0.17
CP 2	0.71	0.37	0.41	0.32	0.30	0.03

Tabla 4.5. Número de pixeles muestreados por clase espectral para la clasificación supervisada

Clase	No pixeles muestreados
Cuerpos de agua1	1058
Cuerpos de agua2	1628
Cuerpos de agua3	153
Cuerpos de agua4	341
Bosque de Aile	331
Bosque de Oyamel	4117
Bosque de Pino	4040
Bosque Pino-Aile	526
Bosque Pino-Encino	2005
Bosque Pino-Oyamel	1259
Bosque sombreado	3487
Agricultura de temporal 1	12653
Agricultura de temporal 2	8743
Agricultura de temporal 3	22984
Agricultura de humedad y riego	2971
Ciudad	5209
Suelo con degradación física (erosión)	1352
Suelo con degradación química (salinidad)	545

freáticos someros) y áreas con riego permanente (sobre todo en áreas con altitud menor a 2,000 msnm, en el sur del DDR Toluca) En ambos casos esa clase espectral fue diferenciada, gracias a la reflectancia de la vegetación (respuesta típica de la clorofila) en el compuesto utilizado (4/3/1) en áreas agrícolas conocidas, las cuales fueron validadas mediante fotointerpretación (fotos de 1992 y 1993) y con recorridos de campo

La clase Ciudad, se refirió a las zonas urbanas e industriales y carreteras presentes en el área de estudio Las áreas con degradación física, se asociaron a zonas con problemas de erosión natural o inducida y las áreas con degradación química (salinidad), son zonas con problemas de drenaje cercanas a zonas de inundación temporal

Algunos problemas en el proceso de clasificación estuvieron relacionados con la confusión espectral entre diferentes clases, es decir, algunas clases de naturaleza diferente, presentaban patrones de respuesta espectral similares El problema anterior se observó entre las clases definidas como ciudad y erosión (áreas con degradación del suelo), este problema se presentó tanto en los poblados pequeños como en las ciudades grandes En general las áreas más conflictivas en cuanto a la confusión espectral fueron:

a) Ciudades: las cuales como se mencionó anteriormente, se confundieron con áreas degradadas (erosión) y de alta reflectancia

b) Areas quemadas: éstas son áreas descubiertas entre el bosque o áreas agrícolas en descanso, las cuales por cuestiones de manejo son quemadas Su respuesta espectral se confundió con la reflectancia de un tipo de cuerpo de agua

c) Cumbres volcánicas: en estas zonas hubo varias clases de información como: zacatón o pastizal, arena volcánica, cuerpos de agua y nieve, resultando una mezcla espectral difícil de caracterizar, debido a que son elementos que solo se observan en esas áreas y por lo tanto tienen poca representatividad

d) La misma situación que la anterior se presentó en áreas inundables temporales (zonas en donde se presentan problemas de drenaje) y cuya respuesta espectral fue muy heterogénea y por tanto difícil de clasificar

Para llevar a cabo la clasificación supervisada se utilizaron diferentes algoritmos como: clasificación de caja, mínima distancia, mahalanobis y máxima verosimilitud, probando también diferentes umbrales para cada uno de ellos

En los procedimientos de clasificación de caja y mínima distancia el porcentaje de píxeles clasificados, en general, fue menor con respecto a los procedimientos de mahalanobis y máxima verosimilitud, ya que en estos últimos casi el 100% de los píxeles fueron clasificados en algunas de las clases de información definidas. Aunque lo anterior provocó una sobre-estimación en el número de píxeles clasificados en ciertas clases espectrales, sobre todo en aquellas en las cuales el número de muestras no era suficiente, dando como resultado clasificaciones no satisfactorias. Para resolver este problema, por un lado, se aumentaron sustancialmente el número de muestras en todas las clases espectrales, pero sobre todo, en aquellas clases con menor número de muestras, por otro, se probaron diferentes umbrales para los diferentes algoritmos utilizados.

De este modo los mejores resultados se obtuvieron con valores de distancia umbral entre 20-25, sobre todo utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud. Este algoritmo está basado en las distancias con respecto a las medias de las clases espectrales y la matriz de varianza-covarianza de cada clase. La distancia umbral tiene que ser especificada por el usuario, en términos de los valores espectrales a ser clasificados, es decir, cuando se está clasificando una imagen, la distancia umbral tiene que ser un valor entre 0 y 255. Mientras más grande se escoja este valor, es más fácil que un píxel sea asignado a una clase.

El algoritmo de máxima verosimilitud asume que los valores espectrales de los píxeles de "entrenamiento" (training pixels) están estadísticamente distribuidos de acuerdo a una función de probabilidad normal multivariada, así para cada conjunto de valores espectrales de entrada, la distancia es calculada con respecto a cada clase espectral usando la distancia de Mahalanobis. El nombre de una clase con la distancia más corta es asignada a un píxel, si esta distancia es más pequeña que el valor de distancia umbral definido por el usuario, de otro modo un valor indefinido es asignado al píxel (ITC 1998).

4.3.2 Estimación de la exactitud de la clasificación

Para estimar la exactitud de la clasificación supervisada fue construida la matriz de error espectral (Tabla 4.6), la cual se elaboró por un lado, con el archivo de muestras (training areas) que se usó para realizar la clasificación (eje X) y por otro lado con los píxeles resultantes de la clasificación supervisada (eje Y), utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud y con un valor de distancia umbral de 20, de tal modo que esta matriz mide los errores de omisión y comisión (Lillesand y Kiefer 1994). El número total de píxeles muestreados fue de 77,628.

Tabla 4.6. Matriz de error espectral de la clasificación supervisada.

	W1	W2	W3	W4	P	O	Po	E	F1	F2	F3	C	I	S	Pd	A	Pa	Cd	Th
W1	1015											4	1	27					1047
W2		1628																	1628
W3			152																153
W4				338															341
P					3042	19	6	638	29		3	3	40	40		13			3833
O					50	2977	696	165					1	214			1		4104
Po					3	260	610	80					1	100		92	113		1259
E					182	42	125	1574						25		57			2005
F1					64				9875	428	1339	10	76		3			441	12236
F2					6		3		297	7102	731	11	36		557				8743
F3					188		2	13	7790	2102	16313	251	263	3	187	3		756	27871
C									18	11	83	4792	12		293				5209
I					23		8	4	69		11	3	2634			37	182		2971
S	114				68	257	92	50					1	2899					3481
Pd									1	116	10	109	1		1115				1352
A							11	11					5			291	6		324
Pa						2	47				1					13	441		504
Cd									23	5			22					517	567
Tc	1129	1628	152	338	3626	3557	1600	2535	18102	9759	18496	5183	3093	3308	2159	506	743	1714	77628

Exactitud del algoritmo de clasificación(%): W1 = 90; W2 = 100; W3 = 100; W4 = 100; P = 84; O = 84; Po = 38; E = 62; F1 = 55; F2 = 73; F3 = 88; C = 92; I = 85; S = 88; Pd = 52; A = 44; Pa = 59; Cd = 30

Exactitud del usuario(%): W1 = 97; W2 = 100; W3 = 99; W4 = 99; P = 79; O = 72; Po = 48; E = 78; F1 = 81; F2 = 81; F3 = 59; C = 92; I = 89; S = 83; Pd = 82; A = 88; Pa = 84; Cd = 95

Exactitud Total = $(1015+1628+152+338+3042+2977+610+1574+9875+428+2102+16313+251+263+3+18+11+83+4792+12+69+2634+1+116+10+109+1+11+11+2+47+23+5+1+13+441+517) / 77628 * 100 = 74\%$

W1=cuerpos de agua1, W2=cuerpos de agua2, W3=cuerpos de agua3, W4=cuerpos de agua4, P=bosque de pino, O=bosque de oyamel, Po=bosque pino-oyamel, E=bosque pino-encino, F1=suelo agrícola, F2=suelo agrícola2, F3=suelo agrícola3, C=ciudad, I=suelo agrícola de bosque, Pd=suelo con degradación física, A=bosque aile, Pa=bosque pino-aile, Cd=suelo con degradación química, Th=total hilera, Tc=total columna

Todos los elementos que están fuera de la diagonal en la matriz representaron un tipo de error. Los errores de omisión corresponden a los elementos fuera de la diagonal en columna, por ejemplo: 114 píxeles que debieron haber sido clasificados como cuerpos de agua1 (W1) y que fueron omitidos de esta categoría (Tabla 4.6). Los errores de comisión son representados por los elementos fuera de la diagonal en hilera, por ejemplo: 23 píxeles de suelo agrícola1 (F1) más 5 píxeles de suelo agrícola3 (F3) más 22 píxeles de suelo agrícola de riego (I), que fueron inadecuadamente incluidos en la categoría de suelos con degradación química (Cd).

Las clases espectrales relacionadas con el agua (cuerpos de agua1 a 4), mostraron en general menores errores de omisión y comisión que el resto de las clases. Con respecto a las clases espectrales relacionadas con bosques, en general se observó que gran parte de los píxeles incluidos erróneamente en otras clases (error de comisión), se ubicaron en otras clases también de bosques. Por ejemplo: en el caso de bosque de pino (P), 638 píxeles fueron incluidos en la clase bosque pino-encino (E), en el caso de bosque de oyamel (O), 696 píxeles fueron incluidos en la clase bosque de pino-oyamel (Po), en el caso de la clase bosque de pino-encino(E), 182 píxeles fueron incluidos en la clase de bosque de pino (P), en el caso de bosque de pino-aile (Pa), 47 píxeles fueron incluidos en la clase de pino (P)(Tabla 4.6). Dado que el objetivo de esta clasificación no fue obtener un inventario forestal preciso por especie o asociación de especies, se puede decir que las áreas boscosas, en general, fueron bien diferenciadas respecto de otras clases espectrales, como agricultura de temporal, ciudades y otras.

Un caso similar al anterior se observó con las clases espectrales relacionadas al suelo dedicado a la agricultura. En este caso se observó por ejemplo, que para el suelo agrícola1 (F1), 1339 píxeles fueron incluidos en la clase de suelo agrícola3 (F3), para el suelo agrícola2 (F2), 731 píxeles fueron incluidos en la clase suelo agrícola3 (F3), para el suelo agrícola3 (F3), 7790 píxeles fueron incluidos en la clase suelo agrícola1(F1)(Tabla 4.6). Lo anterior sirvió de base para apoyar la decisión de agrupar estas clases espectrales en una sola clase de información. De hecho estas tres clases espectrales formaron una sola clase de información que fue: suelo de agricultura de temporal. Tal vez las diferencias espectrales observadas pudieron ser ocasionadas por su contenido de humedad.

Para el caso de ciudad (C), se observó que 293 píxeles se incluyeron inadecuadamente en la clase de áreas con degradación física (erosión), lo anterior, se debió a la similitud de la respuesta espectral entre ambas clases, lo cual fue comentado anteriormente.

Con respecto a la clase espectral suelos con degradación física (Pd), 116 píxeles fueron incluidos en la clase suelo agrícola2 (F2) y por lo que se refiere a la clase suelos con degradación química (Cd), 23 píxeles fueron erróneamente incluidos en la clase suelo agrícola2 (F2)

De los párrafos anteriores, en general, se puede decir que no hubo errores de comisión extremadamente contrastantes, ya que dichos errores se presentaron entre clases de información similares o relacionadas

Otras medidas descriptivas obtenidas de la matriz de error espectral fueron: la exactitud de la aplicación del algoritmo de máxima verosimilitud (Tabla 4.6), la cual indica qué tan bien fue clasificado el archivo de muestras utilizado y la exactitud del usuario, la cual es una medida del error de comisión e indica la probabilidad que un píxel clasificado en una categoría dada, represente en la realidad esa categoría.

De acuerdo a lo anterior, las clases espectrales relacionadas con el agua (cuerpos de agua1 a 4), fueron las mejor clasificadas, con una exactitud del algoritmo que varió de 90 a 100% y con una exactitud del usuario que varió del 96 al 100%. Es decir, casi la totalidad de los píxeles de la imagen pertenecientes a cuerpos de agua fueron correctamente clasificados con una probabilidad muy alta, de que lo anterior sea cierto en la realidad. Los resultados anteriores pueden ser debidos a la homogeneidad espectral de estas clases, lo que permitió su diferenciación de otras clases espectrales.

Con respecto a las clases relacionadas con los bosques se observó que la exactitud del algoritmo varió de 38% de la clase bosque de pino-oyamel, a 84% con las clases bosque de pino y bosque de oyamel, con una media de 62%. La exactitud del usuario varió de 48% de la clase de bosque pino-oyamel (la cual fue más incierta en cuanto a su clasificación y la probabilidad que la categoría esté representada en el campo) a 88% del bosque de aile (Tabla 4.6), la media de esta exactitud fue de 75%.

Se puede decir que el bosque, en general, fue adecuadamente diferenciado de otras clases espectrales y que los errores de omisión y comisión se presentaron entre diferentes clases de bosque, por lo que los porcentajes de exactitud obtenidos para cada clase de bosque fueron adecuados para diferenciar grandes grupos de vegetación boscosa. Lo anterior contribuyó a cumplir con el objetivo de realizar el procesamiento de la imagen Landsat para diferenciar diferentes usos/coberturas de suelo.

Las clases espectrales relacionadas con el suelo dedicado a la agricultura (temporal y riego), mostraron un porcentaje de exactitud del algoritmo que varió de 55% del suelo agrícola1 a 88% del suelo agrícola3, con un valor medio de 75%, en cuanto a la exactitud del usuario, ésta varió de 59% del suelo agrícola3 a 89% del suelo de agricultura de riego, con una media de 77.5% (Tabla 4.6). Analizando el

comportamiento de los errores de omisión y comisión que fueron anteriormente expresados en términos de exactitudes obtenidas, se puede decir que, al igual que las clases relacionadas con los bosques, las relacionadas con el suelo dedicado a la agricultura fueron bien diferenciadas espectralmente y que es alta la probabilidad que esa clasificación corresponda a la realidad

La clase espectral Ciudad (C) tuvo una exactitud tanto del algoritmo como del usuario del 92%, lo cual indica que esa clase se separó espectralmente en forma adecuada con alta probabilidad que esos resultados sean apegados a la realidad.

De las clases espectrales suelos físicamente degradados(Pd) y suelos químicamente degradados (Cd), se puede decir que la exactitud del algoritmo no fue muy alta (52% y 30% respectivamente), lo cual habla de la dificultad que se tuvo con esas clases para diferenciarlas espectralmente, ya que más de 1,000 píxeles de la clase suelos físicamente degradadas fueron omitidos de esa categoría asignándolos en su mayoría a suelos agrícolas (F2 y F3)

En la clase suelos químicamente degradados sucedió algo similar, más de 1,100 píxeles fueron omitidos de esa categoría y fueron asignados a las clases de suelo agrícola (F1 y F3); sin embargo, la exactitud del usuario fue alta, 82% para Pd y 95% para Cd (Tabla 4.6), lo cual se puede interpretar como que una vez que se identificó y separó espectralmente un píxel dentro de esas categorías, es muy probable que su clase corresponda a la realidad en el campo

La exactitud general de la clasificación supervisada fue del 74%, la cual se puede considerar adecuada, tomando en cuenta tanto el tamaño de la escena como la heterogeneidad espectral de las clases presentes en el área de estudio.

Posteriormente, fue construida la matriz de error real (Tabla 4.7). En dicha matriz se utilizó, por un lado, la información proveniente de la fotointerpretación, la verificación en campo y la cartografía disponible (eje X), y por otro, el resultado de la clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud (eje Y).

Como se explicó anteriormente, algunas clases espectrales diferentes correspondían a las mismas clases de información, como el caso de los cuerpos de agua y suelos agrícolas de temporal. En el caso de las cuatro clases espectrales de cuerpos de agua, se formó solo una. Para los tres diferentes tipos de suelo agrícola se formó solo la clase denominada agricultura de temporal. En el caso de la clase espectral bosque sombreado y de acuerdo al análisis llevado a cabo mediante fotointerpretación y consulta cartográfica, los píxeles pertenecientes a esa clase, fueron asignados a diferentes clases de bosques de acuerdo a su ubicación con respecto al bosque dominante más cercano

Tabla 4.7. Matriz de error real de la clasificación supervisada de la imagen Landsat

		Información real (fotointerpretación)										
	Ag	Pi	Ab	Pa	Pe	At	Cd	Ar	Ae	Ai	PI	SI
Ag	3											
Pi		78	5	3	7	3			3		1	
Ab		2	45	7	2	1				1	2	
Pa		2	8	20	4					1	6	
Pe		5	4	2	38	3		1			3	
At		1	4		3	268	12	3	13			13
Cd						3	44		2			
Ar						3	3	47			1	4
Ae						9		1	20			
Ai		1	6	1	7	1		4		9	2	
PI		1	5	2	2	1					14	
SI						14		1				13
												783

$(3+78+45+20+38+268+44+47+20+9+14+13)/783*100=76.5\%$ Exactitud total.

Ag= Agua; Pi= Pino, Ab= Abies; Pa= Pino-Abies; Pe= Pino-Encino; At= Agricultura temporal; Cd= Ciudad; Ar= Agricultura riego; Ae= Suelo con degradación física; Ai= Aile; PI= Pino-Aile; SI= Suelo con degradación química

Para efecto de la construcción de la matriz de error real, en lo que se refiere a la identificación de las clases en la realidad (lo cual se hizo mediante fotointerpretación, recorridos de campo y consulta cartográfica), las áreas de humedad y riego fueron consideradas como agricultura de riego

De esa manera la matriz de error real se construyó para 12 clases de información y en la cual, en general, se observó un comportamiento similar en cuanto a los errores de omisión y comisión, es decir los pixeles que fueron omitidos de una clase de bosque fueron considerados en otras clases de bosque también, por ejemplo, para el caso del bosque de pino, la mayor parte de los pixeles omitidos fueron considerados en el bosque de pino-encino, para el caso del bosque de oyamel, ocho pixeles que fueron omitidos de esa clase, fueron considerados en el bosque de pino-oyamel (Tabla 4.7)

Para el caso de la agricultura de temporal, se puede decir que una gran cantidad de pixeles de esta clase fueron correctamente clasificados, al igual que las clases agricultura de riego, ciudad y agua. Con respecto a los suelos con degradación física y química, la mayor cantidad de pixeles omitidos de estas categorías fueron considerados dentro de agricultura de temporal.

El estadístico Kappa, el cual es estimado por κ ("KHAT") es una medida de la diferencia entre el resultado efectivo entre los datos reales y una clasificación automática y el resultado al azar entre los

datos reales y una clasificación aleatoria. Este estadístico sirve como un indicador del porcentaje de valores correctos de una matriz de error debidos a resultados "verdaderos" contra resultados "al azar".

Cuando los resultados "verdaderos" alcanzan el valor de 1, los resultados "al azar" toman el valor de 0, y el estadístico κ es igual a 1, este es el caso ideal. En realidad, κ usualmente varía entre 1 y 0. Un κ de 0 sugiere que una clasificación dada no es mejor que una asignación aleatoria de píxeles a clases espectrales. En casos en donde los resultados "al azar" son muy grandes, κ puede tomar valores negativos, lo cual es un indicativo de una clasificación muy pobremente realizada. A continuación se presenta el cálculo del estadístico κ , usando la fórmula presentada en la sección 2.4.4.1:

$$\kappa = \frac{783(599) - 119,357}{(783) - 119,357} = 0.71$$

Donde:

783 = número total de píxeles considerados

599 = número de píxeles correctamente clasificados

119,357 = suma de los productos del número de píxeles en cada hilera y cada columna

El resultado anterior puede ser interpretado como que la clasificación supervisada llevada a cabo fue 71% mejor que si se hubiese realizado una asignación al azar de los valores de los píxeles.

4.3.3 Aplicación de reglas de decisión y obtención del mapa de uso/cobertura de suelo

Como se explicó en la sección 2.4.5 del capítulo de Metodología, una vez obtenido el mapa producto de la clasificación supervisada, le fueron aplicadas al mismo, reglas de decisión sucesivas hasta llegar al mapa final que cumpliera con el objetivo planteado para el procesamiento de la imagen Landsat.

Las clases espectrales que fueron mejoradas mediante el procedimiento ya descrito fueron: ciudades, suelos con degradación física, suelos con degradación química, bosque sombreado, bosque de pino-aile, bosque de pino-oyamel, agricultura de humedad y riego, y agricultura de temporal.

Con el propósito de contar con una sola clase de información que incluyera aquellas áreas con problemas de degradación (tanto física como química) y que resaltara el hecho de son áreas con limitantes para la producción agrícola, se decidió unir a las clases suelos con degradación física y química, en una sola clase llamada suelos degradados. Asimismo, la mayor parte de la clase bosque sombreado fue convertida a la clase de bosque que de acuerdo a la fotointerpretación y el análisis del relieve, fuera el tipo de bosque dominante en el área.

Tomando en consideración algunos factores tales como: el número de píxeles de cada clase espectral, los resultados obtenidos en cuanto a la exactitud del algoritmo y del usuario, y sobre todo su localización geográfica, las clases de bosque pino-aile y pino-oyamel, fueron convertidas a aile y oyamel respectivamente, mejorando de esa manera el mapa de uso/cobertura de suelo, sobre todo en lo que concierne a la vegetación boscosa

La clase agricultura de humedad y riego, fue mejorada mediante el análisis del relieve (altitud), la fotointerpretación y los recorridos de campo. De esa manera se obtuvieron las siguientes clases de información: a) agricultura de humedad, que son áreas con humedad disponible para producir cultivos de ciclo corto y que se encuentran en la planicie del DDR Toluca; b) agricultura de riego, que son áreas que disponen de agua aún en épocas fuera del ciclo de lluvias, generalmente se ubican al sur del DDR Toluca aunque también existen áreas (ranchos o explotaciones agropecuarias) dentro de la planicie del área de estudio; c) pastizal, que son áreas de pastizales naturales o inducidos y que se localizan generalmente en las partes altas del DDR, aunque también se ubicaron algunas pequeñas áreas en la planicie. La característica común de las tres clases de información anterior, fue su respuesta espectral típica de presencia de clorofila, aún en tiempo de secas (recordar que la fecha de la imagen utilizada para la clasificación, fue Marzo de 1996)

La clase agricultura de temporal, fue mejorada, derivando de ella una clase llamada áreas sin vegetación, las cuales se ubicaban en las partes altas del Volcán Nevado de Toluca y en la Sierra de las Cruces. Estas áreas presentaron una respuesta espectral similar a la de los suelos dedicados a la agricultura, sin embargo por su localización altitudinal, no fueron consideradas en la clase anterior.

Las clases de información que fueron obtenidas directamente de la digitalización en pantalla fueron: a) cumbre volcánica, la cual es una área ubicada en la parte más alta del Volcán Nevado de Toluca, con una respuesta espectral heterogénea debido a la presencia de cenizas volcánicas, cuerpos de agua y arena; b) áreas inundables, que son áreas con cuerpos de agua estacionales y que debido al movimiento del espejo de agua producen una respuesta espectral muy heterogénea, razón por la cual se decidió usar el procedimiento descrito, para mejorar el mapa de uso/cobertura de suelo; y c) áreas de recreación, que son pequeñas áreas como el zoológico de Zacango y el campo de golf, los cuales presentaban respuesta a clorofila en el compuesto de color utilizado, pero que sus fines de uso, son diferentes a la clase agrícola

Del modo antes descrito se obtuvo el mapa final de uso/cobertura de suelo que se muestra en la Figura 4 1. En dicho mapa se observa que en general el color verde fue utilizado con diferentes

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

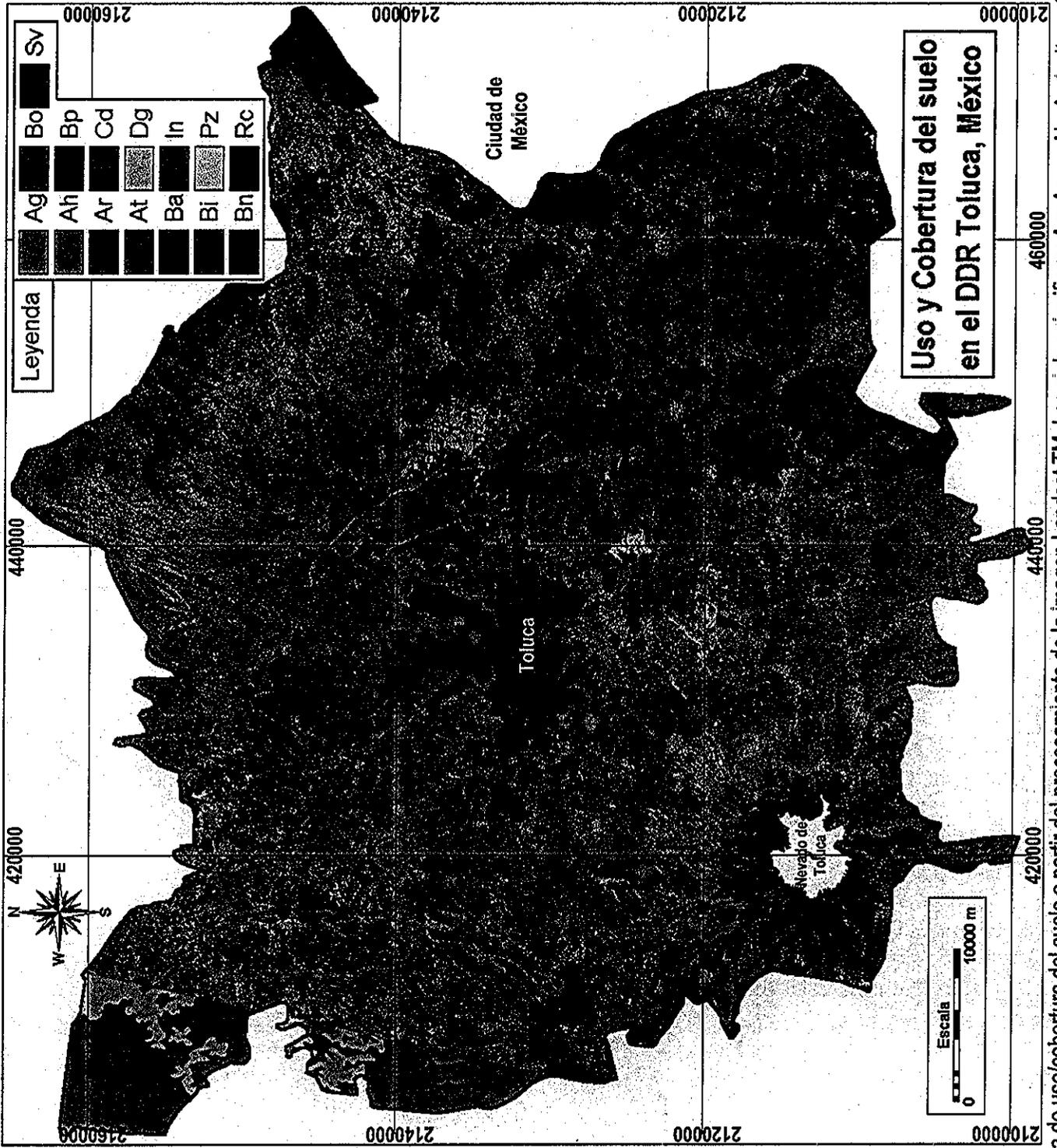


Figura 4.1. Mapa de uso/cobertura del suelo a partir del procesamiento de la imagen Landsat TM. Las siglas significan: Ag=Aguá; Ah=Agricultura de humedad residual; Ar=Agricultura de riego; At=Agricultura de temporal; Ba=Bosque de Abies, Bi=Bosque de aile; Bn=Bosque no determinado; Bo=Bosque de Pino-encino; Bp=Bosque de Pino; Cd=Ciudad; Dg=Suelos degradados; In=Áreas de inundación; Pz=Pastizal; Rc=Áreas de recreación; Sv=Áreas sin vegetación.

tonalidades para la vegetación boscosa y áreas de inundación, el azul para cuerpos de agua y agricultura de riego, ocre para agricultura de temporal, tonos de grises para ciudades y suelos degradados, amarillo para pastizal, y rojo y naranja para áreas sin vegetación y recreación

Asimismo en la Tabla 4.8, se muestra la superficie en ha por clase de uso/cobertura del suelo en el área de estudio. De acuerdo con los resultados obtenidos en nuestra investigación, el área total del DDR Toluca es de: 303,660 ha, de las cuales: 156,383 ha (51.5%) son de agricultura de temporal; 4,092 ha (1.3%) de agricultura de humedad; 666 ha (0.2%) de agricultura de riego; 87,122 ha (28.6%) de bosques; 4,812 ha (1.5%) de pastizal; 29,770 ha (9.8%) son de ciudades; 8,937 ha (2.9%) corresponden a suelos degradados; 2,170 ha de cuerpos de agua (0.7%); y el resto (3.5%) a otros usos/coberturas de suelo incluyendo áreas sin vegetación, cumbre volcánica, zonas de inundables y áreas de recreación

De acuerdo con las estadísticas gubernamentales (SAGAR 1998), el área total del DDR es de 302,603.6 ha, de las cuales: 153,167 ha (50.6%) son de agricultura de temporal (incluyendo las áreas de producción de forraje); 81,124.1 ha (26.8%) son de uso forestal; 8,530.2 ha (2.8%) corresponden a áreas erosionadas; y 15,268.1 ha (5.0%) de zonas urbanas (incluyendo uso industrial)

Tabla 4.8. Superficie por clase de información del mapa de uso/cobertura de suelo en el DDR Toluca, México

Clase de información	Superficie (ha)
Cuerpos de agua	2,170
Bosque de Pino	38,558
Bosque de Abies	27,183
Bosque de Pino-Encino	16,707
Bosque de Aile	4,483
Bosque no determinado	191
Agricultura de temporal	156,383
Agricultura de humedad	4,092
Agricultura de riego	666
Pastizal	4,812
Ciudad	29,770
Suelos degradados	8,937
Áreas de inundación	3,700
Cumbre volcánica	1,791
Áreas sin vegetación	4,089
Áreas de recreación	128
Total DDR Toluca	303,660

4.3.4 Comparación de uso/cobertura entre imagen 1996 y 2000

Para que el mapa anterior cumpliera con su función, éste debía reflejar de la manera más exacta y actual posible la realidad en cuanto al uso/cobertura de suelo en el área de estudio. Por lo anterior se realizó una comparación entre la fecha de la imagen (1996) con información más reciente (2000), para evaluar los cambios relevantes ocurridos durante ese periodo. En la Tabla 4.9, se muestran los resultados de dicha comparación para tres áreas inundables cercanas a los poblados de Sn Pedro Tultepec, (Figura 4 2), Almoloya del Río (Figura 4 3) y Santa María Atarasquillo para las dos fechas consideradas (Figura 4 4)

En el área de Tultepec, hubo un incremento en la zona de inundación del 23% en el 2000, con respecto a 1996, lo cual se corroboró con los recorridos de campo (Figura 4 2). Lo anterior posiblemente se debe a que esa zona no tenga una salida natural que permita el desagüe de las aguas estancadas y a incremento en las lluvias.

El caso de Almoloya del Río es diferente, porque esa zona tiene una salida natural, la cual es el Río Lerma, de hecho esa área está considerada como el inicio de dicho cauce (Figura 4 3). Con respecto a la zona de Atarasquillo, el área entre una fecha y otra se mantuvo prácticamente estable.

En cuanto a esta clase de información (áreas inundables) en general se puede decir que, después de haber realizado tanto la inspección visual, de campo y la comparación de áreas de la Tabla 4 9, no hubo una diferencia significativa entre ambas fechas y por lo tanto la información obtenida para 1996 se puede considerar como veraz y confiable a la escala de este estudio.

Otra clase de información que se utilizó para esta comparación fue la de Ciudad. En la Tabla 4 10, se muestran superficies en ha de cuatro ciudades representativas del área de estudio para ambas fechas. El área del 2000 siempre fue mayor que la de 1996 (Figura 4 5), lo cual resulta hasta cierto punto lógico de acuerdo al crecimiento normal de una población. Los resultados muestran la menor diferencia con respecto al tiempo en la ciudad de Capulhuac-Tianguistenco y la mayor en la ciudad de Ixtlahuaca. La diferencia en el crecimiento entre ambas ciudades se puede deber a factores tales como dinámica poblacional, actividad económica, tamaño del municipio, entre otros. La diferencia media de todas las ciudades, entre ambas fechas expresada en % fue de 14.7 y expresada en ha; fue de 26.3. Al igual que en el caso de áreas inundables, los resultados de la comparación obtenidos para esta clase de información indican que los cambios ocurridos entre ambas fechas no modifican sustancialmente los resultados del mapa de uso/cobertura de suelo obtenido para 1996 y que éstos se pueden considerar confiables y veraces.

Tabla 4.9. Comparación de superficie entre dos fechas para tres áreas inundables en el DDR Toluca, México

Área	Área Marzo de 1996 (ha)	Área Marzo de 2000 (ha)	Comportamiento del 2000 con respecto al 1996 (%)
Sn Pedro Tultepec	1738.71	2143.08	+ 23
Almoloya del Río	1583.73	956.79	- 40
Sta Ma Atarasquillo	374.67	361.26	- 4

Tabla 4.10. Comparación de superficie entre dos fechas para cuatro ciudades en el DDR Toluca, México

Ciudad	Área 1996 (ha)	Área 2000 (ha)	Comportamiento del 2000 con respecto al 1996 (%)
Tenango del Valle	163.96	185.76	+ 13
Capulhuac-Tianguistenco	369.81	392.22	+ 6
Xonacatlan	171.36	194.13	+ 13
Ixtlahuaca	141.48	179.82	+ 27

Tabla 4.11. Comparación de superficie entre dos fechas en cinco sitios con áreas quemadas en el DDR, Toluca, México

Sitio	Área 1996(ha)	Área 2000(ha)	Comportamiento del 2000 con respecto al 1996 (%)
Uno	199.71	314.64	+ 57
Dos	331.65	302.22	- 9
Tres	52.47	237.06	+ 451
Cuatro	68.49	191.07	+ 279
Cinco	267.66	557.37	+ 208



Figura 4.2. Área inundable cercana a San Pedro Tultepec, México.

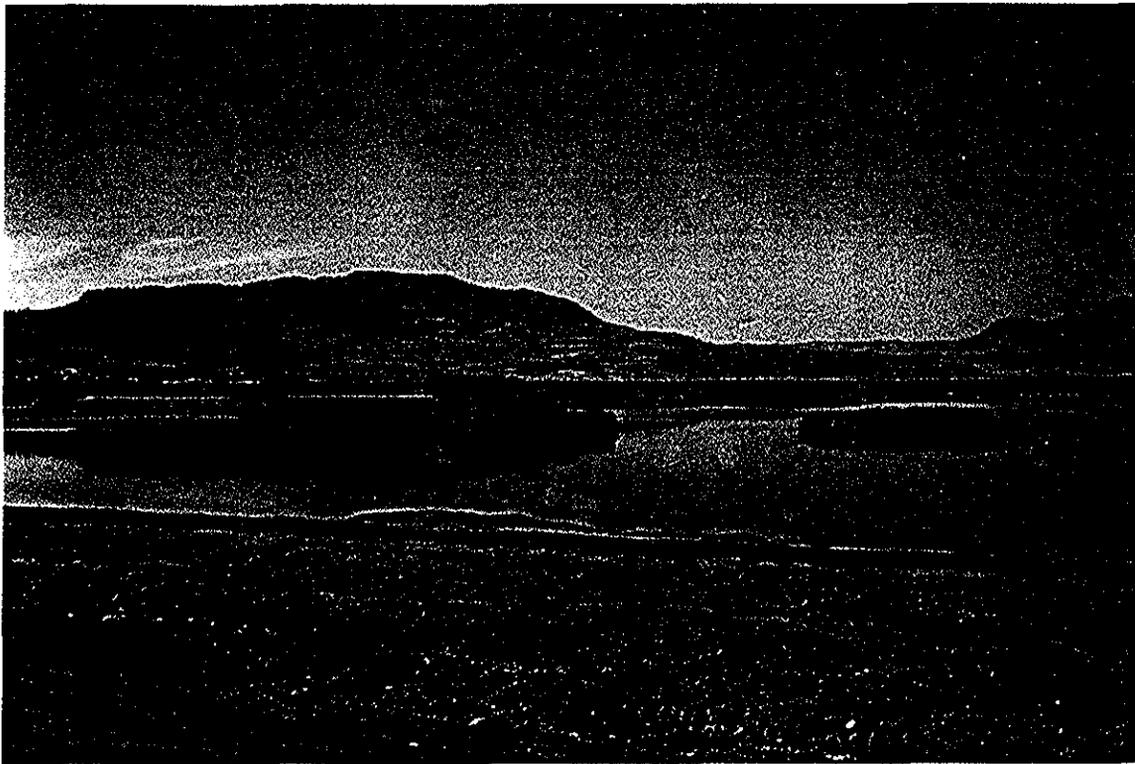


Figura 4.3. Área inundable cercana a Almoloya del Río, México

TESIS CON
MILLA DE C

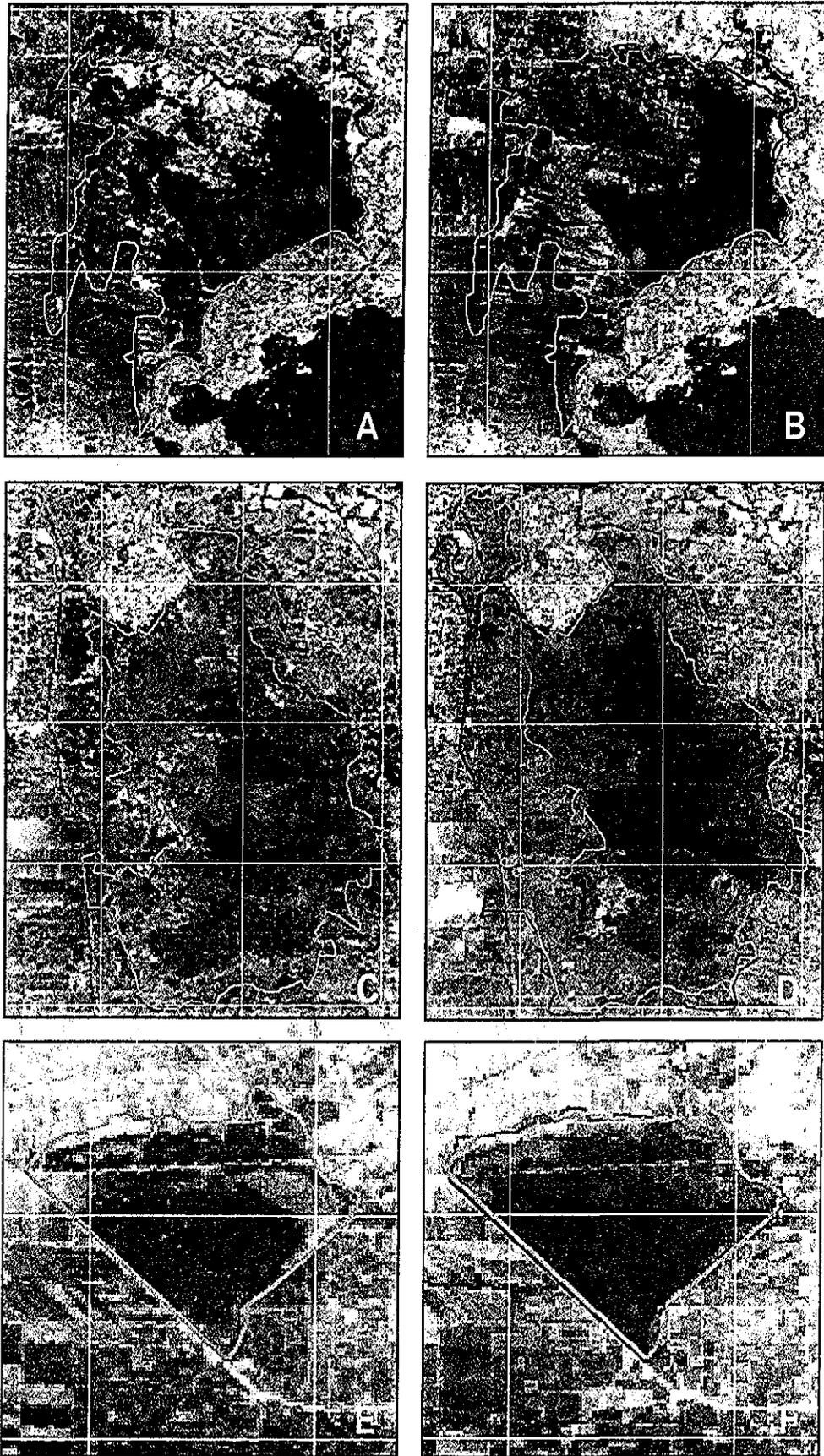
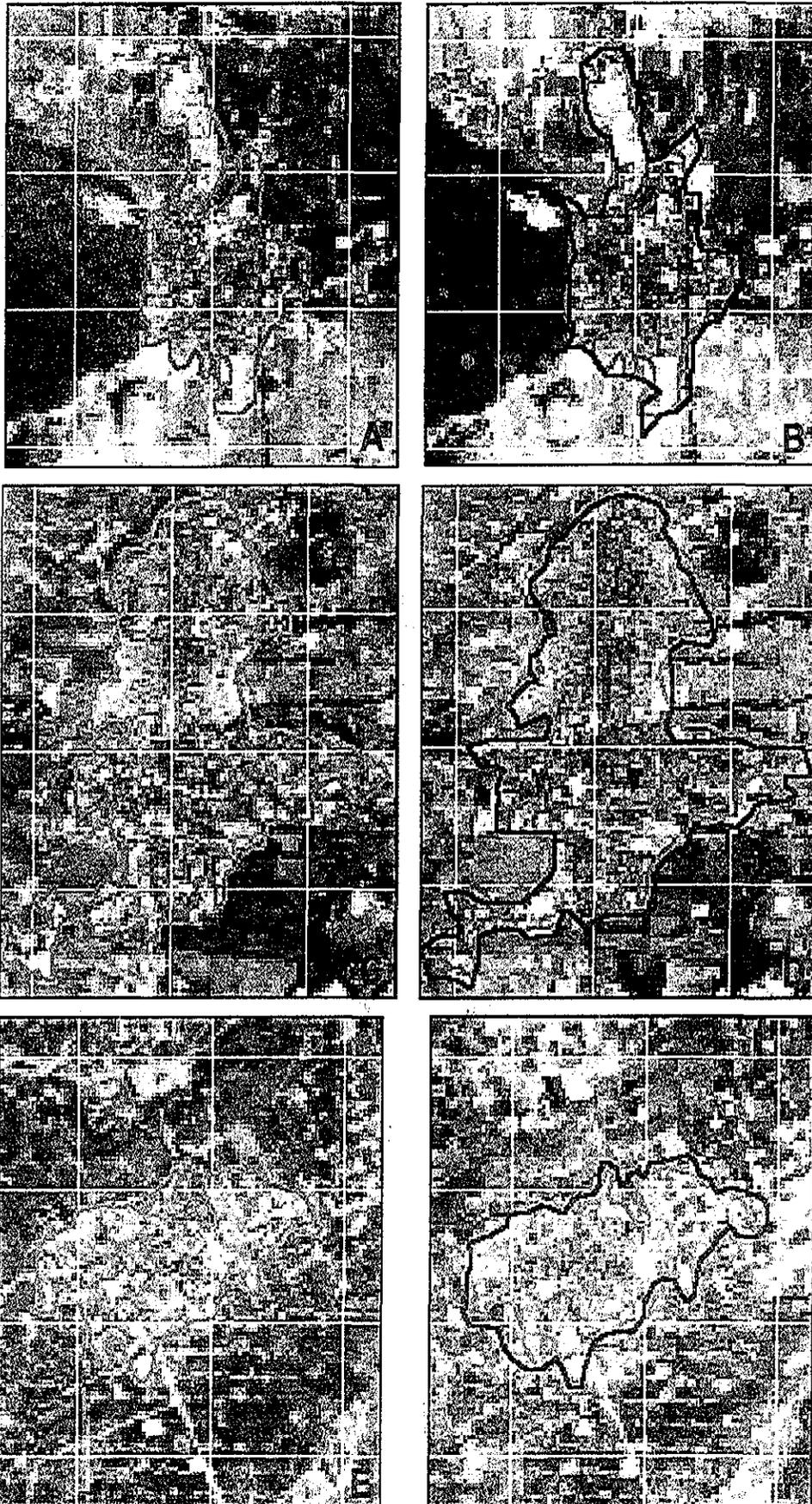


Figura 4.4. Vista de tres áreas inundables en dos fechas diferentes (Marzo 1996, lado izquierdo y Marzo 2000, lado derecho). Las vistas A y B se localizan al Oeste de Almoloya del Río, las vistas C y D se localizan al Suresse de San Pedro Tultepec y las vistas E y F se localizan al Noroeste de Santa María Atarasquillo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.5. Comparación entre áreas urbanas de tres ciudades en dos fechas diferentes (Marzo 1996, lado izquierdo y Marzo 2000, lado derecho) Las vistas A y B corresponden a Tenango del Valle, las vistas C y D corresponden a Capulhuac-Tianguistenco, y las vistas E y F corresponden a Xonacatlán.

La comparación de lo que ocurrió en cinco diferentes sitios en cuanto a áreas quemadas, se muestra en la Tabla 4.11. En dicha Tabla se muestra que los mayores incrementos en número de ha en el 2000 con respecto a 1996, se observaron en los sitios Tres, Cuatro y Cinco, que corresponden en general a sitios con uso forestal y lo cual habla de la magnitud de los incendios forestales ocurridos en esos sitios, en los cuales se observaron incrementos de más del 100% (Figura 4.6). El comportamiento del sitio Dos fue prácticamente el mismo en términos de número de ha quemadas, el uso del suelo en dicho sitio es agrícola, lo cual habla que en esa zona la quema de los residuos de la cosecha anterior es una práctica regular. En el sitio Uno, hubo un incremento de más de 100 ha en el área quemada y dado que se trata de una zona limítrofe entre el uso agrícola y el forestal, es posible que ese incremento se debió a un incendio forestal (Figura 4.6). La comparación de áreas quemadas entre ambas fechas permitió caracterizar lo que ocurrió en términos de manejo parcelario (sitio Dos) y también en términos de eventuales siniestros forestales (sitios Tres, Cuatro y Cinco). La comparación entre ambas fechas sobre todo en algunos sitios como Uno, Cuatro y Cinco permitió obtener indicios en el sentido de que la frontera entre el uso agrícola y el forestal (al menos en lo que respecta a áreas circundantes a esos sitios) prácticamente no se ha modificado en este lapso estudiado y que los resultados de la clasificación supervisada de 1996, son vigentes en cuanto al uso/cobertura del suelo.

4.4 Evaluación Multicriterio (EMC)

A continuación se describen los resultados de la Evaluación Multicriterio por cultivo en el orden descrito en la Introducción, es decir, maíz, papa, avena, haba, amaranto y nopal. Para cada cultivo se incluye la revisión de los requerimientos ambientales y los niveles generales por variable definidas a partir de la revisión bibliográfica especializada y por el conocimiento experto. Lo anterior sirvió para fortalecer la decisión de considerar sólo las variables relevantes, las cuales se convirtieron en criterios en la EMC y por otro lado para ayudar a la definición precisa de los niveles óptimos y no óptimos por variable, los cuales fueron la base para la estandarización de los mapas factor utilizados en la EMC.

Para el caso de maíz y avena se describen los resultados de la prueba de no redundancia (independencia) entre todas las variables usadas en cada evaluación.

Posteriormente se describen los resultados de la construcción de la matriz de comparación pareada, así como la ponderación de cada criterio. Después se muestran los niveles de los requerimientos ambientales usados para estandarizar todos los mapas factor. Dichos mapas sirvieron de entrada para llevar a cabo la EMC y obtener así, el mapa de áreas adecuadas para cada cultivo.

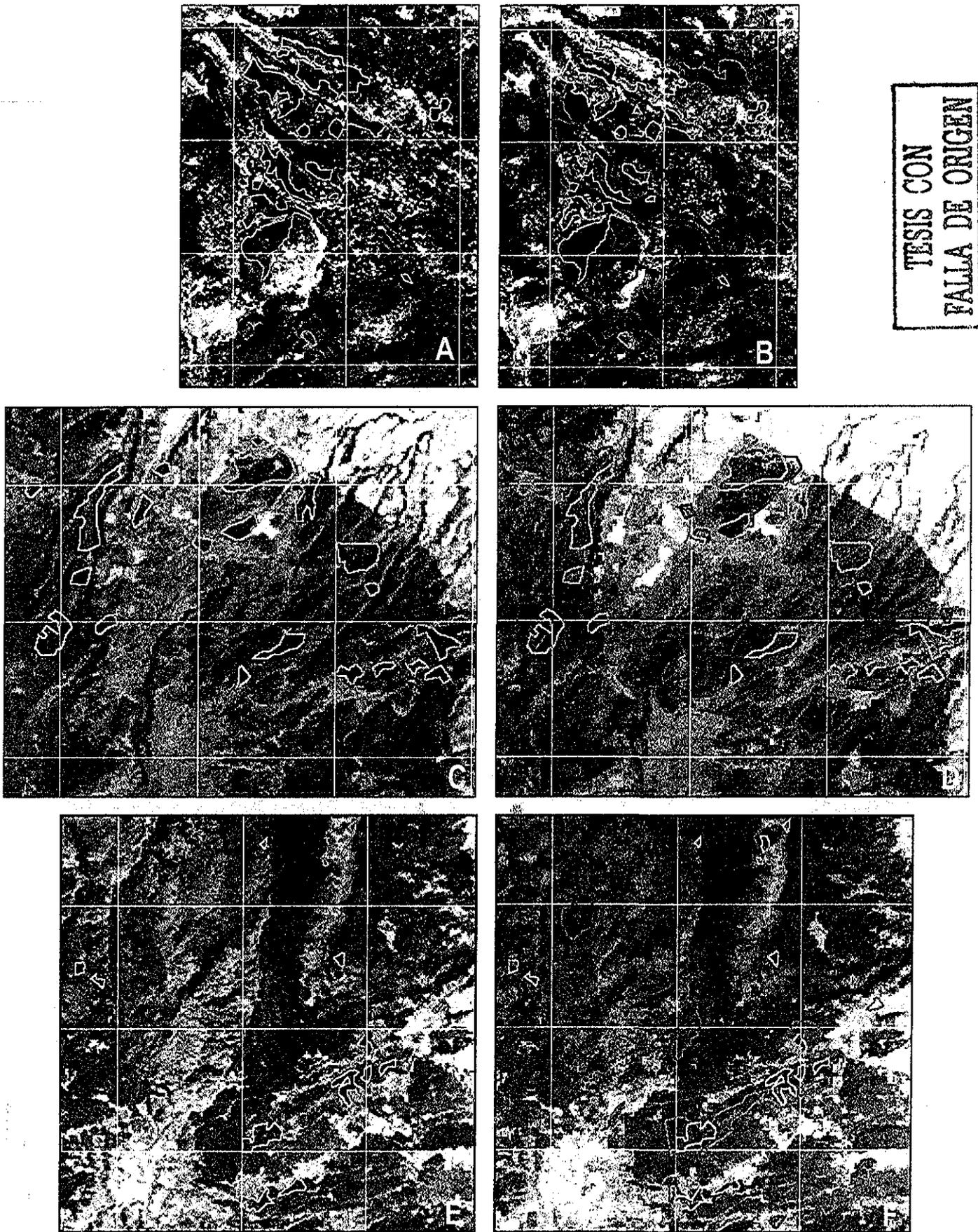


Figura 4.6. Vista de tres sitios con áreas quemadas en dos fechas diferentes (Marzo 1996, lado izquierdo y Marzo 2000, lado derecho). Las vistas A y B corresponden a la ladera Oeste del Volcán Nevado de Toluca, las vistas C y D corresponden a la ladera Noreste del Volcán Nevado de Toluca y las vistas E y F corresponden al Norte de Huixquilucan

Finalmente, se describen los resultados del proceso de realimentación después del cual y una vez que se alcanzaron resultados satisfactorios, se detalla el cruzamiento del mapa de áreas adecuadas por cultivo con el mapa de uso/cobertura de suelo, proveniente del procesamiento de la imagen Landsat de 1996

4.4.1 Maíz

4.4.1.1 Requerimientos ambientales del cultivo

El maíz es una planta capaz de una amplia respuesta a las oportunidades que ofrece el medio ambiente, esta cualidad ha sido explotada por el hombre para conseguir variedades adaptadas a condiciones muy dispares. Debido a lo anterior, existen una gran diversidad de tipos y razas de maíz útiles para su cultivo bajo condiciones naturales muy distintas a las de su hábitat original (Llanos 1984). De este modo esta planta está siendo cultivada en un amplio rango de condiciones climáticas, algunos tipos crecen muy poco, mientras que otros crecen más de 5 m; algunos requieren de 70 días de ciclo vegetativo y otros requieren de más de 30 semanas (Shaw 1988) El cultivo se produce en climas que varían desde la zona templada hasta la tropical, asimismo la adaptabilidad de las variedades a distintos climas varía mucho (Dorembos y Kassam 1979)

Debido al amplio rango de condiciones climáticas en las que el maíz puede ser producido, es difícil establecer las condiciones precisas para el desarrollo de este cultivo, sin embargo en la Tabla 4.12, se muestran los requerimientos del medio físico que resultaron relevantes de la revisión bibliográfica

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. Estas dos últimas variables tienen distinta influencia sobre el rendimiento final según la etapa fenológica en que se presentan. La temperatura es más importante en el mes de junio que la lluvia; en julio, lo que más influye es la precipitación y en agosto vuelve a ser la temperatura la variable más influyente sobre el rendimiento del cultivo (Llanos 1984). La luz es una variable importante para este cultivo, sin embargo no se consideró para la evaluación realizada ya que no se dispone de información suficiente en el área de estudio para estimarla, además de que no existen evidencias experimentales en el DDR, para definir los niveles óptimos y no óptimos

En la Tabla 4.13, se muestran los niveles generales por variable, encontrados en la bibliografía, como adecuados o limitantes para la producción de este cultivo.

Tabla 4.12. Requerimientos ambientales para el cultivo de Maíz.

Variable	Descripción
Humedad	Las condiciones climáticas óptimas para el cultivo del maíz, implican una cantidad limitada de lluvias que humedezcan bien el suelo cada cuatro o cinco días, desde el final del primer mes hasta unas tres semanas después de la floración ¹⁰ . Este cultivo puede desarrollarse bien en climas húmedos sin riego, siempre y cuando el suelo sea profundo y con buena capacidad de retención de humedad. Aunque también puede desarrollarse en climas áridos pero con riego ¹ . Se adapta a climas tropicales húmedos y secos, subtropicales y templados ^{9,10} y también a climas semiaridos ¹¹ . Un factor muy importante para el rendimiento de este cultivo, no solo es la cantidad de lluvia durante el ciclo vegetativo, sino también su distribución ^{6,3} . Si la cantidad de lluvia es inferior a las necesidades de la planta se estiman pérdidas del 86% en la producción de grano y del 71% en la producción de forraje ⁶ . Por el otro lado, si se presentan lluvias excesivas durante el desarrollo vegetativo, sobre todo en suelos arcillosos, inciden perjudicialmente en el desarrollo de las plantas y el rendimiento ⁹ ya que se puede propiciar también la aparición y diseminación de enfermedades ^{6,3} .
Temperatura	La temperatura es el elemento del clima que regula la distribución de las plantas sobre la tierra, cuando el agua no es deficiente ² . Para este cultivo los periodos secos son más perjudiciales para el rendimiento, si coinciden con temperaturas superiores a la media sobre todo si lo anterior ocurre en fechas cercanas a la floración ⁶ . Aunque parece no haber un límite de temperatura máxima, los rendimientos usualmente decrecen con las altas temperaturas sobre todo en el verano ⁹ .
Suelo	El suelo tiene una gran importancia para la producción de plantas, ya que es en éste, en donde las plantas usando la energía solar combinan el bióxido de carbono de la atmósfera con los nutrientes y agua del suelo para producir tejidos vivos ⁷ . El cultivo prefiere suelos bien drenados para permitir un adecuado desarrollo radicular, con alta capacidad de retención de humedad que permita que el cultivo tenga disponibles los nutrientes necesarios para su desarrollo, de textura media y con alto contenido de materia orgánica ¹³ . El maíz crece en suelos con propiedades ampliamente diferentes, desde texturas arenosas hasta arcillosas y desde suelos fuertemente ácidos hasta fuertemente alcalinos, sin embargo en estas condiciones también hay una gran diferencia en los niveles de productividad ^{8,6} . El maíz se adapta a una amplia variedad de suelos donde puede producir buenas cosechas siempre y cuando se empleen las variedades y técnicas de cultivo adecuadas ⁶ .
Luz	El cultivo es una de las plantas cultivadas de más alto nivel de respuesta a los efectos de la luz, de lo anterior depende principalmente su elevado potencial productivo, una disminución de un 90% de la intensidad lumínica por un período de unos pocos días produce reducción severa en el rendimiento en grano si se produce durante la fase de polinización ⁶ . Con respecto a la duración del día, el maíz es una planta neutral o de día corto ⁴ .

¹Shrader y Pierre (1967), ²Grimaldi (1969), ³Jugenheimer (1970), ⁴Doorenbos y Kassam (1979), ⁵Félix (1984), ⁶Llanos (1984), ⁷Foth (1987), ⁸Olson y Sander (1988), ⁹Shaw (1988), ¹⁰Aragón (1995), ¹¹FAO(1998)

Tabla 4 13. Niveles generales por variable para el cultivo de Maíz

Variable	Niveles
Humedad	La lluvia durante el ciclo de cultivo debería ser mayor de 300 mm uniformemente distribuida, con lluvia mínima anual de 500 ¹⁰ y óptima anual de 800 mm ^{11,4} . Comúnmente el rango de agua usada por el cultivo es entre 410 y 640 mm, pero cantidades menores a 300 mm y mayores a 840 mm han sido reportadas. El umbral mínimo de precipitación desde el cual puede esperarse producción de grano es de 150 mm ^{6,9} . Aunque debido al amplio rango de condiciones climáticas en las cuales este cultivo se desarrolla, es difícil construir las condiciones específicas limitantes ⁹
Temperatura	El ciclo de cultivo debe ser de al menos 130 días ¹ , con una temperatura oscilando entre 21 y 32°C, durante ese período ^{1,9,6,10,5} , con una óptima de 25°C ¹¹ , aunque este umbral depende del estado de desarrollo de la planta ¹⁰ y de 22°C durante el verano ⁶ . Parece no haber un límite superior de temperatura, pero la producción usualmente disminuye con altas temperaturas ⁹ , temperaturas por encima de 26°C durante el verano pueden producir deficiencias de humedad, además temperaturas mayores de 35°C reducen el rendimiento y determinan un cambio cualitativo en la composición de las proteínas de este cereal ⁶ . Las temperaturas mayores de 32°C durante la polinización pueden reducir drásticamente la viabilidad del polen ⁵ . Para este cultivo la temperatura mínima, por debajo de la cual el crecimiento puede llegar a detenerse, es 12°C ⁶
Suelos	El cultivo prefiere los suelos profundos > 1.8m ^{8,10} o moderadamente profundos, > 0.6m ^{11,8} con alta capacidad de retención de humedad ^{1,6} , de textura media y con alto contenido de materia orgánica y adecuadas cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio ^{3,6} , tal suelo debería tener una textura franca o franca limosa en la superficie y franco arcillo limosa a 30cm o más de profundidad ^{11,8} . Los peores suelos son los excesivamente pesados (arcillosos) ¹⁰ y los muy sueltos (arenosos) ^{6,4} . El suelo ideal debería tener un pH alrededor de 6.5 ^{1,11,6} , aunque este cultivo es tolerante a la salinidad y a la acidez del suelo ^{6,10} .
Altitud	El maíz crece desde cerca del nivel del mar hasta varios miles de metros arriba de este nivel ^{9,10} . En los trópicos, el cultivo crece desde el nivel del mar hasta casi los 4000 m, sin embargo a grandes altitudes (> 3000 m) las plantas apenas llegan al medio metro de altura ⁶ .

¹Shrader y Pierre (1967), ²Grimaldi (1969), ³Jugenheimer (1970), ⁴Doorenbos y Kassam (1979), ⁵Félix (1984), ⁶Llanos (1984), ⁷Foth (1987), ⁸Olson y Sander (1988), ⁹Shaw (1988), ¹⁰Aragón (1995), ¹¹FAO(1998)

4.4.1.2 Identificación de las variables relevantes y prueba de no redundancia

La identificación de las variables relevantes se realizó mediante el análisis objetivo de la información disponible de la revisión bibliográfica y tomando en cuenta la opinión experta de los investigadores del programa de maíz del INIFAP, adscritos al Campo Experimental Valle de Toluca. De ese modo las variables relevantes del medio físico se convirtieron en criterios que intervinieron en la evaluación realizada, en este caso identificar las áreas adecuadas para el cultivo de maíz. Con los criterios (factores) relevantes se realizó la matriz de correlaciones (Tabla 4.14), con el fin de confirmar el requisito de no redundancia (independencia) entre ellos.

Los resultados indican que: en el 33% se observó una correlación menor a 0.10, en el 13% se obtuvo una correlación entre 0.10 y 0.20, el 47% mostró una correlación entre 0.20 y 0.40, y el resto (7%) mostró una correlación mayor de 0.40. Es decir, en el 93% de los casos se obtuvo un coeficiente de correlación menor a 0.40, lo cual consideramos adecuado en términos de la no redundancia.

Valores de correlación medios se obtuvieron entre la altitud y la temperatura mínima ($r=-0.27$) y entre la altitud y la temperatura máxima ($r=-0.40$). Asimismo, sabemos que ambas temperaturas (mínima y máxima) están altamente correlacionados ($r=0.73$), de hecho fue el coeficiente de correlación más alto.

4.4.1.3 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos

Las variables que se identificaron como relevantes para la evaluación que se realizó (en este caso, la identificación de áreas adecuadas para maíz), se convirtieron en los criterios (factores) que se usaron en la construcción de la matriz de comparación pareada y cuya importancia fue valorada mediante la obtención de sus pesos específicos.

Dos de los criterios que fueron identificados para la evaluación de áreas adecuadas para este cultivo, fueron la precipitación y la evaporación, los cuales fueron usados en forma de Índice Precipitación/Evaporación (Índice P/E). Este Índice refleja el aporte total de agua de lluvia, en comparación con la demanda atmosférica evaporativa durante el período de crecimiento del cultivo, y asume valores entre 0.10 y 7.0 de manera continua en la República Mexicana. Si el lector está interesado en los aspectos metodológicos para la obtención y cálculo de este Índice P/E se recomienda la lectura de Turrent (1986).

Del modo en que se describió en el capítulo de Metodología, fue construida la matriz de comparación pareada, la cual se muestra en la Tabla 4.15. Analizando la estructura interna de la matriz y de acuerdo con las valoraciones pareadas otorgadas por los expertos, se puede decir que con respecto al criterio columna Índice P/E, todos los criterios hilera son menos importantes, variando de Ligeramente (como en los casos de Textura y Profundidad del suelo) hasta Extremadamente (como en el caso de la

Tabla 4.14. Matriz de correlaciones de los criterios (factores) de Maíz. Valores de correlación (r)

	Temp mínima	Temp. máxima	Precipita ción	pH suelo	Altitud	Pendiente
Temp Mínima	1					
Temp máxima	0.73	1				
Precipitación	0.23	-0.29	1			
pH suelo	0.09	-0.02	0.24	1		
Altitud	-0.27	-0.40	0.18	-0.07	1	
Pendiente	0.13	-0.07	0.33	0.0	0.4	1

Tabla 4.15. 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

Tabla 4.16. 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 consistencia = 0.03

Altitud), la excepción de lo anterior fue el criterio hilera Temperatura mínima, la cual fue valorada como Ligeramente más importante (valoración 3) que el Índice P/E

Analizando el siguiente criterio columna Temperatura mínima, se puede decir que todos los criterios hilera fueron valorados como menos importantes, variando desde Ligeramente (Índice P/E y Textura del suelo) hasta Extremadamente (Temperatura máxima y Altitud)

Con respecto al criterio columna Textura del suelo, los criterios hilera pH del suelo y Temperatura máxima fueron menos importantes con valoraciones de 1/3 y 1/9 respectivamente, asimismo el criterio hilera Profundidad fue valorada como igualmente importante, sólo los criterios Índice P/E y Temperatura mínima fueron Ligeramente más importantes (valor 3)

En relación al siguiente criterio columna pH del suelo, el criterio hilera Pendiente fue valorado como Igualmente importante, los criterios hilera Altitud y Temperatura máxima fueron valorados como menos importantes (1/3 y 1/7 respectivamente) y los criterios hilera Profundidad y Textura del suelo fueron valorados como Ligeramente más importantes (valoración de 3), además los criterios Índice P/E y Temperatura mínima fueron valorados como Moderadamente y Fuertemente más importantes (Tabla 4.15)

Con respecto al criterio columna Profundidad del suelo, los criterios hilera Temperatura máxima, Pendiente y Altitud fueron valoradas como menos importantes, variando de Extremadamente a Ligeramente, el criterio hilera Textura del suelo, fue valorada como igualmente importante y sólo los criterios Índice P/E y Temperatura mínima fueron valorados como Ligeramente y Moderadamente más importantes

Con respecto al criterio columna Temperatura máxima, los criterios hilera Altitud y Pendiente fueron valorados como Ligeramente y Moderadamente más importantes, el resto de los criterios hilera fueron valorados como Fuertemente y Extremadamente más importantes. Es decir este es un criterio con poca importancia relativa. Lo mismo sucedió con el criterio columna Altitud, casi todos los criterios hilera (excepto Temperatura máxima) fueron valorados como más importantes

Con respecto al criterio columna Pendiente, algunos criterios hilera como Índice P/E, Temperatura mínima, Textura y Profundidad del suelo fueron valorados como más importantes (variando de Ligeramente a Fuertemente), el criterio hilera pH del suelo fue igualmente importante y sólo los criterios Temperatura máxima y Altitud fueron valorados como menos importantes (Tabla 4.15)

En resumen se puede decir que los criterios mejor valorados fueron: Índice P/E, Temperatura mínima y Textura del suelo, mientras que los criterios menos valorados fueron: Temperatura máxima y

Altitud Lo anterior se corroboró con el cálculo de los pesos En la Tabla 4.16, se muestra el eigenvector de pesos para cada uno de los criterios utilizados en la EMC de maíz. El índice de consistencia obtenido para esta evaluación fue de 0.03, el cual se encuentra dentro de los límites aceptables (Saaty 1980)

De acuerdo a la Tabla anterior, 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 (0.3775), Índice P/E (0.2390), Textura del suelo (0.1275) y Profundidad del suelo (0.1106) Por otra parte, los criterios que fueron menos valorados y por consecuencia tienen menos importancia en la evaluación llevada a cabo fueron: pH del suelo y Pendiente con la misma valoración (0.0501) y Temperatura máxima y Altitud también con la misma valoración (0.0225)

4.4.1.4 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Los niveles específicos de los factores fueron definidos en base al análisis de los niveles reportados en la revisión de bibliografía disponible, y tomando en cuenta la opinión del conocimiento experto local. Estos niveles fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de maíz, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4.17)(Figura 4.7, mapas 1 a 8). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas

Tabla 4.17. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Maíz

Grado de membresía	No membresía	Membresía
Fuzzy	0.0	completa
Factor		1.0
Temperatura mínima (°C)	< 2	> 6.5
Temperatura máxima (°C)	< 16 o > 33	22-27
Índice P/E	< 1.2*	1.4-2.0*
Profundidad suelo (m)	< 0.1*	> 1.0
pH suelo	< 5.4 o > 7.5	6.0-7.0
Textura suelo	Arcilla, arcilla limosa, franco arcillo limoso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco
Altitud (msnm)	< 2450 o > 3000	2500-2650
Pendiente (%)	> 15	< 3

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2. Ver Figura 4.7.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

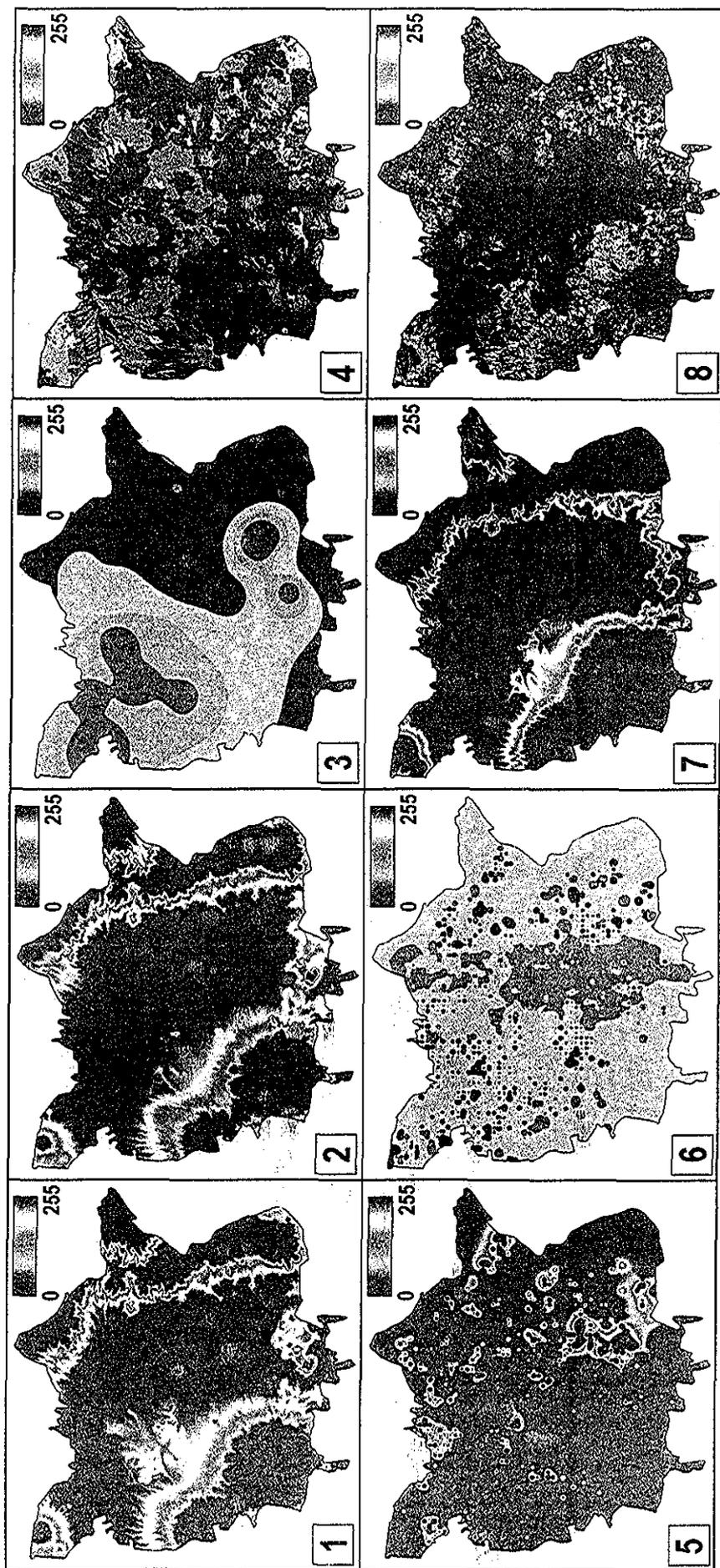


Figura 4.7. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de maíz. 1 = Temperatura máxima, 2 = Temperatura mínima, 3 = Índice P/E, 4 = Profundidad de suelo, 5 = pH de suelo, 6 = Textura de suelo, 7 = Altura, 8 = Pendiente. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto. Ver niveles específicos de membresía en la Tabla 4.17.

De acuerdo a los niveles mostrados en la Tabla anterior, se puede resumir que las áreas con condiciones adecuadas para el maíz, están caracterizadas por: temperaturas mínimas no extremas; con condiciones de humedad favorables, mayor de 1.4 en el Índice P/E, es decir la precipitación es 0.4 veces más que la evaporación y por lo tanto teóricamente habría humedad disponible para el cultivo durante el periodo de Junio a Septiembre (período para el cual se calculó dicho índice); con suelos profundos y de textura franca; terrenos prácticamente planos; con pH neutros; con temperaturas máximas entre 20 y 27°C; y altitudes entre 2,500 y 2,800 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, es decir áreas muy frías (< 16°C como máxima) o muy calientes (> 27°C como máxima); y altitudes menores a 2,500 o mayores a 3,000 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.

4.4.1.5 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo

A la par de la obtención de los mapas factor ya descritos, también se obtuvieron los mapas restricción que se utilizaron para la EMC. Uno de esos mapas consideró como áreas fuera de evaluación (código 0), ciudades, zonas de inundación temporal, cuerpos de agua permanentes y la cumbre del Volcán Nevado de Toluca. Otro mapa restricción consideró como áreas fuera de evaluación (código 0) a las altitudes mayores a 3,500 msnm, ya que a dichas altitudes se consideró que puede haber crecimiento biológico de la planta de maíz, sin embargo no existe potencial desde el punto de vista productivo. Los mapas factor y restricción fueron indispensables para realizar propiamente la EMC, tal y como fue explicado en la sección respectiva de Metodología.

Del modo anterior se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de maíz en el DDR Toluca (Figura 4.8). De acuerdo al mapa, el 71.6% del total de píxeles considerados (246,851 ha, esta cantidad representa el total del área del DDR, menos las áreas de restricción ya explicadas anteriormente) que representan 176,746 ha, se ubicaron con niveles de potencial que variaron de bueno a muy malo, además se obtuvo que el 28.4% de los píxeles (Anexo 4), que representan 70,106 ha se ubicaron en el nivel más alto de potencialidad.

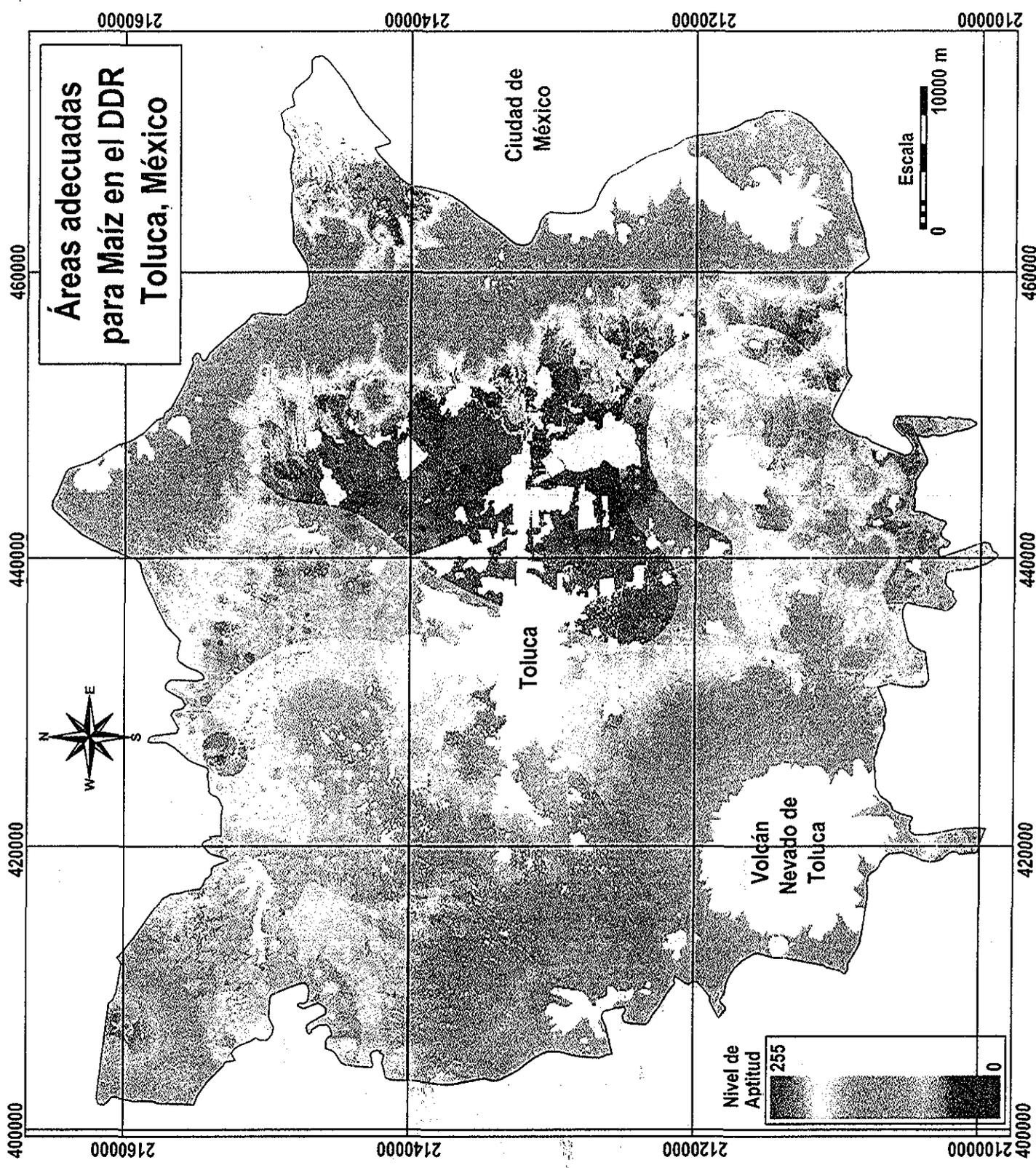


Figura 4.8. Mapa de áreas adecuadas para maíz en el DDR Toluca, México.

En general estas áreas con alta potencialidad estuvieron localizadas en el Valle de Toluca, abarcando parte de los municipios de Metepec, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Santiago Tianguistenco, Chapultepec, Mexicalcingo, San Antonio la Isla, Rayon, Calimaya, Toluca, Tenango del Valle, San Mateo Atenco y Xonacatlan (Figura 1 1). De acuerdo a la cartografía del INEGI (varias fechas), en estas áreas las unidades de suelo son: Feozem háplico, Andosol húmico y Cambisol crómico. La textura del suelo es media, de acuerdo a la fuente ya citada.

De acuerdo a los niveles usados de los factores, las áreas con potencial muy bueno para maíz están caracterizadas por: temperaturas mínimas (durante el ciclo de cultivo) mayores de 6.5°C, disponibilidad de agua (Índice P/E) mayor de 1.4 durante junio a septiembre, suelos profundos y de textura media (Ceballos-Silva y López-Blanco En prensa, ver Anexo 5), con pendientes bajas (menos de 3%), pH del suelo de 6.0 a 7.0, temperaturas máximas (durante el ciclo de cultivo) variando de 22 a 27°C y con altitudes de entre 2,500 y 2,650 msnm.

En el proceso de realimentación se analizaron junto con los expertos de cultivos, los resultados obtenidos en la definición de áreas adecuadas para maíz. Primeramente se revisaron los resultados en cuanto a las valoraciones otorgadas por ellos, para cada uno de los factores en la construcción de la matriz de comparación pareada y se concluyó que los pesos obtenidos de los factores eran consistentes con su experiencia en cuanto a la importancia de ellos, en la definición de áreas adecuadas para el cultivo.

Posteriormente se analizaron los niveles específicos de cada factor y se concluyó que dichos niveles eran consistentes por un lado, con los requerimientos ambientales óptimos para el desarrollo del cultivo reportados por la bibliografía y por otro lado con su conocimiento y experiencia local de este cultivo en el DDR Toluca. Asimismo, se revisó el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de maíz y se concluyó que esas áreas estaban bien definidas en cuanto a su ubicación y en cuanto a su cantidad. De este modo, mediante el proceso de realimentación, de algún modo también se llevó a cabo una especie de 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, generándose la Tabla 4 18, en la cual se observó que las áreas con uso actual de agricultura de temporal y a su vez con potencial muy bueno (niveles 9 y 10) fueron 55,303 ha, cifra que representa el 46.7% de la superficie sembrada con este cultivo (118,305 ha) en el ciclo Primavera-Verano (SAGAR 2000). El resto de la superficie con uso actual de agricultura de temporal (100,831 ha), presentó diferentes niveles de potencialidad, que van desde el nivel 1 hasta el nivel 8.

Tabla 4.18. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Maíz

Uso/cobertura	Nivel de Potencial (ha)									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Bosque de Pino	---	63	2531	7677	3598	2242	3208	3596	454	
Bosque de Abies	---	524	3830	11725	5092	2351	1316	892	109	
Bosque Pino-encino	5	639	1136	3050	2555	3234	2884	2279	192	
Agricultura temporal	---	364	3666	8506	12271	31246	44778	36942	18361	
Agricultura de humedad	---	2	12	143	287	546	1095	1222	784	
Agricultura riego	---	---	---	---	---	42	68	434	121	
Suelos degradados	.8	2	84	156	710	2298	2606	1670	913	

Las áreas con Agricultura de humedad y con nivel de potencial muy bueno (niveles 9 y 10) fueron 2,006 ha (Tabla 4 18). Con respecto a la superficie actual de agricultura de riego, la mayor superficie actual se ubicó en un nivel de potencial muy bueno (555 ha), aunque en general se puede decir que, dado la superficie actual de áreas con riego, el potencial de este cultivo en el DDR, es más bien en las áreas con Agricultura de temporal. Además, en áreas identificadas como de muy buen potencial para el maíz, se ubicaron relativamente pocas áreas con suelos actualmente degradados (2,583 ha; Tabla 4 18)

4.4.2 Papa

4.4.2.1 Requerimientos ambientales del cultivo

Las variables que son consideradas como importantes y que han sido investigadas por varios autores se pueden resumir en: A) lluvia, riego y humedad del suelo; B) temperatura; y C) intensidad de la luz (Ora 1977). El cultivo de papa puede cultivarse en muchas regiones debido a su extraordinaria capacidad de adaptación a diferentes condiciones de clima y suelo, aunque las condiciones óptimas para un cultivo exitoso de papa son: clima templado, frío y húmedo (Christiansen 1967). El cultivo prefiere los ambientes frescos, sufre en condiciones cálidas-áridas y no soporta las heladas" (Fabiani 1967). En la Tabla 4 19, se muestran los requerimientos ambientales relevantes para el cultivo de papa.

En general algunos de los requerimientos del cultivo de papa están asociados a la humedad disponible y temperatura tanto máxima como mínima, 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, el cual es una de las etapas más críticas en cuanto al desarrollo y producción del cultivo. Otros requerimientos importantes están asociados al tipo de suelo que necesita el cultivo para desarrollarse, en cuanto a este requerimiento se pone especial énfasis en la aireación y el contenido de materia orgánica.

Tabla 4.19. Requerimientos ambientales para el cultivo de Papa.

Variable	Descripción
Humedad	La disponibilidad de agua en el suelo influye en los procesos de crecimiento, fotosíntesis y absorción de minerales por la planta de papa, en tierras de temporal hay una estrecha relación entre la lluvia y el rendimiento final de tubérculos ⁷ , una escasa precipitación produce bajos rendimientos y una alta precipitación muchas veces es dañina especialmente si los suelos no tienen buen drenaje ^{4,2} . Una precipitación muy elevada y una humedad relativa alta provoca el rápido desarrollo de enfermedades ⁷ . La sequía o las condiciones de humedad del suelo inferiores a las óptimas tienen efectos negativos similares a la temperatura alta sobre el conjunto del follaje, la fotosíntesis y la tuberización ⁷ .
Temperatura	Este cultivo se produce en varios tipos de clima como el Tropical húmedo y seco, Subtropical con verano seco y Semiárido ^{9,8} , es el cultivo tropical más ampliamente extendido ⁵ . La temperatura es el factor no controlado más importante para el cultivo. En muchas áreas la producción y la calidad de las papas es determinada por este factor, a medida que aumenta la temperatura, se incrementa la tasa de crecimiento hasta un óptimo después del cual, el aumento en la temperatura puede ser perjudicial ¹ . El principal efecto de altas temperaturas sobre las plantas es la desnaturalización de las proteínas ⁷ . El número de tubérculos por planta, las tasas de crecimiento del tubérculo y el índice de cosecha disminuyen a temperaturas altas ⁶ . Los requerimientos de temperatura son diferentes en cada etapa de crecimiento del cultivo y la temperatura óptima puede estar influenciada por otros factores como el suministro de agua y la intensidad de la luz ² . La papa no tolera las heladas, pero requiere de climas frescos, desarrollándose mejor a temperaturas medias de 18°C, lo que es usual en los trópicos en las partes altas de las cordilleras hasta 4,000 msnm ⁷ .
Suelo	La papa se adapta a una gran variedad de suelos ^{5,1} , siempre que estos posean una buena estructura y un buen drenaje ⁴ . Aunque los tubérculos son sensibles a condiciones de insuficiente aireación en el suelo ⁵ , por lo que el suelo debe estar provisto de materia orgánica ² .
Luz	La longitud mínima del ciclo de cultivo es de 80 días ⁹ . Cuando la planta ha emergido, necesita luz para su desarrollo, aunque los rayos solares fuertes durante mucho tiempo reducen la producción ⁸ .
Altitud	Diferentes alturas sobre el nivel del mar afectan el metabolismo de los carbohidratos en el cultivo de papa ² .

¹Christiansen (1967), ²Ora (1977), ³Doorenbos y Kassam (1979), ⁴Montaldo (1984), ⁵Bouwkamp (1985), ⁶Midmore (1988), ⁷Lara (1993), ⁸Aragón (1995), ⁹FAO (1998).

como elementos importantes para permitir la brotación de las yemas, la formación del sistema radicular y la eventual formación de tubérculos, los cuales en el cultivo de papa, son el principal producto

Además, otros requerimientos ambientales para el cultivo son la iluminación solar y la altura sobre el nivel del mar. Los niveles generales para cada uno de los requerimientos importantes para este cultivo, se muestran en la Tabla 4.20. Destaca que los niveles generales de los requerimientos, ponen especial atención en las condiciones del clima y suelo que permitan una adecuada brotación de yemas y el desarrollo del sistema radicular, que permitan la producción de los tubérculos. Asimismo se pone énfasis en que no sólo la cantidad de lluvia es importante, sino también su distribución a lo largo del ciclo de cultivo, y su adaptación a diversas condiciones de altura sobre el nivel del mar

4.4.2.2 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos

Al igual que para el cultivo de maíz y de los otros cultivos aquí considerados, la construcción de la matriz de comparación pareada para la papa se llevó a cabo tomando en cuenta sólo aquellas variables relevantes del medio físico. La identificación de las variables relevantes se realizó tomando en cuenta la opinión experta de los investigadores del programa nacional de papa del INIFAP, adscritos al Campo Experimental Valle de Toluca. La matriz de comparación pareada se muestra en la Tabla 4.21, en donde se observa que las puntuaciones en la diagonal de la matriz son siempre igual a uno. Esto es porque la valoración de la importancia de un criterio en columna con respecto al mismo criterio en hilera siempre será igual a 1 (Tabla 2.4)

Analizando la estructura interna de la matriz en cuanto a las valoraciones otorgadas para cada comparación pareada entre criterios, se puede decir que con respecto al primer criterio columna Profundidad del suelo, todos los criterios hilera fueron menos importantes variando desde 1/3 (Ligeramente) para el caso de Textura de suelo y Precipitación, hasta 1/9 (Extremadamente menos importante), para el caso de Temperatura máxima

Con respecto al segundo criterio columna Textura de suelo, solamente el criterio hilera Profundidad del suelo fue Ligeramente más importante (valor 3), el resto de los criterios fueron menos importantes variando desde 1/3 (Ligeramente), en el caso del criterio Precipitación, hasta 1/7 (Fuertemente) en el caso de Pendiente y Temperatura máxima

En relación al criterio columna Precipitación, los criterios hilera Profundidad del suelo y Textura de suelo fueron Ligeramente más importantes que éste, asimismo los demás criterios hilera fueron menos importantes variando de 1/5 (Moderadamente) a 1/7 (Fuertemente). Con respecto al criterio columna Temperatura mínima, se observó que los criterios hilera Profundidad del suelo, Textura del suelo y

Tabla 4.20. Niveles generales por variable para el cultivo de Papa

Variable	Niveles
Humedad	Las condiciones más favorables son 500-600 mm ⁹ de Mayo a Septiembre ^{2,8} Precipitación entre 700 y 800 mm se ha asociado con alta producción ^{5,3,7,1} siempre y cuando esté bien distribuida en el ciclo del cultivo ¹
Temperatura	La temperatura óptima para la formación de tubérculos es entre 15 y 17°C ^{1,2,4,9} Correlaciones negativas con el rendimiento se han reportado con temperaturas diarias mayores a 29°C en Julio ^{2,1} o menores a 8°C en Junio Las condiciones óptimas para alta producción son 20-23°C de temperatura máxima ^{2,7} o de 21 a 25°C ^{5,6} Una planta de papa ya no crece a 38°C ⁵ Si la temperatura fuera constante a 29°C en la época de formación de tubérculos, estos no se formarían ⁷ y los rendimientos serían pobres ¹ La papa no tolera las heladas, pero requiere de climas frescos, desarrollándose mejor a temperaturas medias cercanas a los 19°C Por otra parte temperaturas menores a menos 1°C son letales ⁷ .
Suelos	El cultivo prefiere suelos de textura media ¹ y profundidad moderada (> 50 cm ⁵ , o > 35 cm ^{4,8}), con un pH cercano a 6.0 ^{9,5,3,1} o entre 5.5 y 7 ⁸ o entre 5.0 y 5.4, lo anterior no significa que no puedan cultivarse papas fuera de esos límites ⁴ . La papa puede producirse exitosamente en suelos de textura arenosa o migajon arenosa, aunque más importante que la textura es mantener un buen nivel de aereación ⁵ , la cual es muy importante en el inicio de la brotación de semilla y para la pronta formación del sistema radical ¹ Los mejores suelos son los porosos, bien drenados ³ y derivados de materia orgánica ^{4,1} .
Altitud	La papa puede prosperar hasta elevaciones mayores de 3000 msnm ^{8,4} .

¹Christiansen (1967), ²Ora (1977), ³Doorenbos y Kassam (1979), ⁴Montaldo (1984), ⁵Bouwkamp (1985), ⁶Midmore (1988), ⁷Lara (1993), ⁸Aragón (1995), ⁹FAO (1998)

Tabla 4.21. 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

Precipitación fueron más importantes (Fuertemente y Moderadamente, respectivamente) y el resto de los criterios hilera fueron menos importantes que éste (Temperatura mínima)(Tabla 4.21).

En relación al criterio columna Pendiente se observó que todos los criterios hilera fueron más importantes que éste (Pendiente), variando desde 3 (Ligeramente) en el caso de Temperatura máxima y Altitud, hasta 7 (Fuertemente) en el caso de Profundidad del suelo, Textura del suelo y Precipitación. En relación al criterio columna Temperatura máxima, solo el criterio Altitud fue valorado como Igual en importancia, el resto de los criterios fueron valorados como más importantes variando desde Ligeramente (valor 3) en la caso de la Temperatura mínima, hasta Extremadamente (valor 9) en el caso de la Profundidad del suelo.

Finalmente y en relación al criterio columna Altitud, éste fue valorado como de Igual importancia al criterio Temperatura máxima, solo el criterio Pendiente fue valorado como menos importante (1/3 Ligeramente) y el resto de los criterios fueron valorados como más importantes, variando desde Ligeramente en el caso de Temperatura mínima, hasta Moderadamente en los casos de Profundidad del suelo, Textura del suelo y Precipitación (Tabla 4.21).

Se observa en la Tabla 4.22, que de acuerdo a las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada, los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas para papa fueron: la Profundidad del suelo (0.3847), la Textura del suelo (0.2549), seguidos de la Precipitación (0.1767) y la Temperatura mínima (0.0765). Además los criterios con menor importancia fueron: la Altitud (0.0448), la Temperatura máxima (0.0384) y finalmente la Pendiente del terreno (0.239). El índice de consistencia obtenido para esta evaluación fue de 0.09 (Tabla 4.22), el cual se encuentra dentro de los límites aceptables (Saaty, 1980).

4.4.2.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Las condiciones ambientales asociadas a los niveles de alta potencialidad para el cultivo están caracterizadas por suelos profundos (>0.5 m), suelos con textura Franca, con niveles altos de precipitación, con temperaturas mínimas que no bajen de 0°C y que no excedan los 22°C, en un rango altitudinal de 2,800 a 3,100 msnm y con pendientes de terreno de menos del 10%.

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 0.5m), texturas o muy arenosas o muy arcillosas, con temperaturas mínimas extremas (<0°C), altitudes menores a 2,500 o mayores a 3,300 msnm, temperaturas máximas mayores de 21°C y con pendientes mayores al 50%.

Tabla 4.22. 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 consistencia = 0.09

Los niveles anteriores fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de papa, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4.23)(Figura 4.9, mapas 1 a 7). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas.

4.4.2.4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo

Al mismo tiempo que se obtuvieron los mapas factor, también se obtuvieron los mapas restricción. En dichos mapas se consideraron como áreas fuera de evaluación (código 0), las ciudades, cuerpos de agua, cumbre volcánica y zonas de inundación, además para el caso de este cultivo, también se consideraron fuera de evaluación las áreas con altitudes mayores a los 3,700 msnm, ya que a pesar de haber reportes en la bibliografía (Montaldo 1984; Aragón 1995) del crecimiento de esta planta en esas condiciones, se consideró en este trabajo, y de acuerdo con las condiciones locales, que no existe ningún potencial desde el punto de vista productivo en tales altitudes.

Una vez que se obtuvieron tanto los mapas factor, como los mapas restricción se realizó la EMC, de este modo se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de papa en el DDR Toluca, México (Figura 4.10). De acuerdo al mapa anterior el número de ha asociadas al nivel más alto de potencialidad fue de 27,278. Asimismo el 80% del área considerada, que represento 209,389 ha se ubicaron en niveles de potencialidad que variaron de bueno a muy malo (Anexo 4).

En general, el nivel de potencial más alto (Figura 4.10), se ubicó dentro de los límites (si bien no cubriendo la totalidad) de los municipios de: Toluca, Calimaya, Tenango del Valle, Joquicingo, Santiago Tianguistenco, Xalatlaco, Ocoyoacac, Huixquilucan, Lerma, Xonacatlan, Oztolotepec (Figura 1.1). Dentro de esos municipios, las áreas se ubicaron en las laderas de las partes altas del Volcán Nevado de Toluca,

Tabla 4.23. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Papa

Factor	Grado de membresía Fuzzy	No membresía	Membresía completa
		0 0	1.0
Temperatura mínima (°C)		< 0	4-6
Temperatura máxima (°C)		< 16 o > 21	18-20
Precipitación		< 700*	> 850
Profundidad suelo (m)		< 0 1*	> 1.0
Textura suelo		Arcilla, arcilla limosa, franco arcillo limoso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco arenoso
Altitud (msnm)		< 2500 o > 3300	2800-3100
Pendiente (%)		> 50	< 10

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0 2 Ver Figura 4.9.

Sierra las Cruces y Cerro San Antonio Los tipos dominantes de suelos en esas áreas con Andosoles húmicos y Andosoles mólicos ambos con textura media (INEGI varias fechas)

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 de la revisión de las valoraciones otorgadas por los expertos, para cada uno de los criterios en la construcción de la matriz de comparación pareada, se observó que los pesos obtenidos de los criterios fueron consistentes con el conocimiento experto en cuanto a la importancia que tuvieron (los factores), en la definición de áreas adecuadas para el cultivo

Se analizaron también los niveles específicos de cada factor y se analizó que dichos niveles eran consistentes por un lado, con los requerimientos ambientales óptimos para el desarrollo del cultivo reportados por la bibliografía y por otro lado se encontraban dentro de los rangos de los niveles generales, así 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 cuanto a su ubicación y en cuanto a su cantidad. De esta manera, mediante el proceso de realimentación 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 (Tabla 4 24) En cuanto a las áreas usadas actualmente para agricultura de temporal, en 8,568 ha de ellas se ubicó el nivel más alto de potencialidad, lo cual refleja la

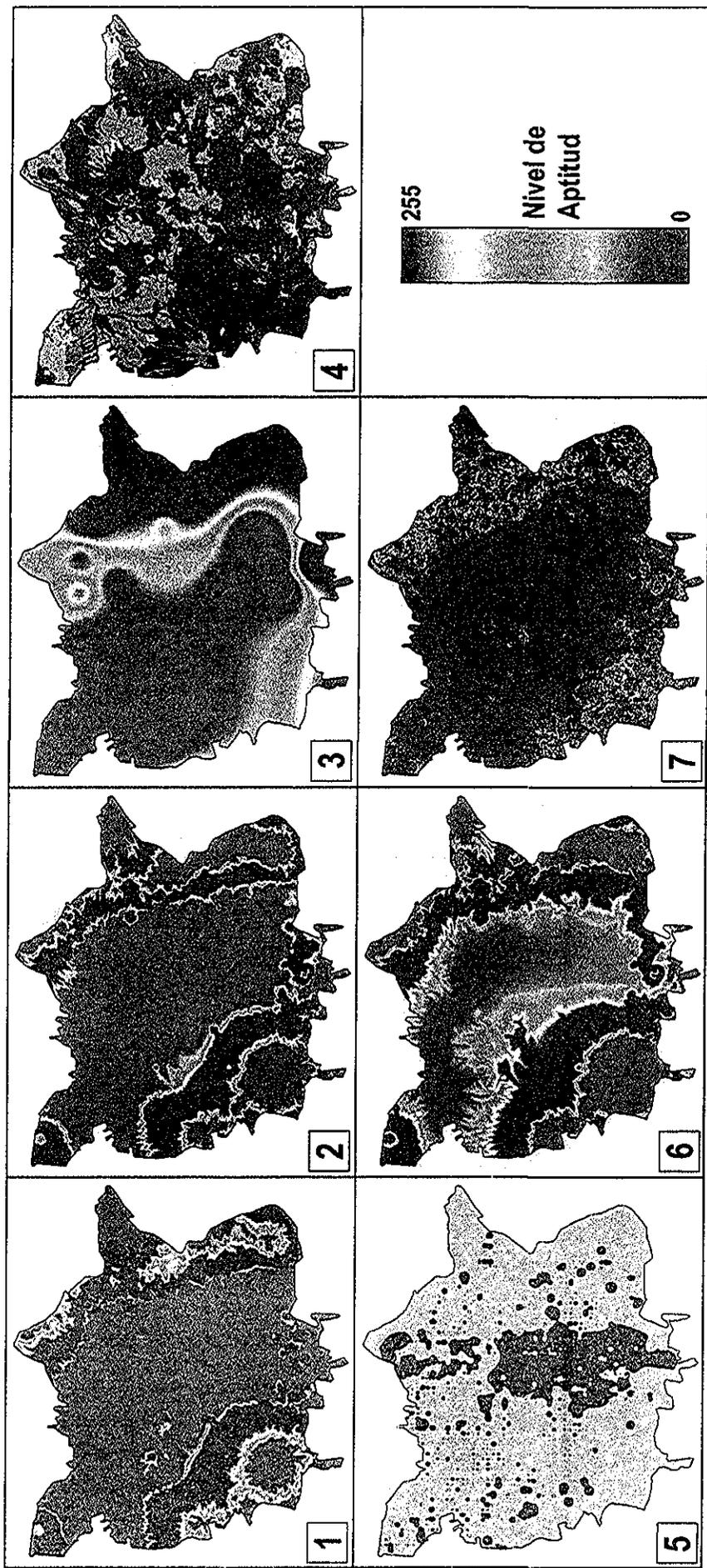


Figura 4.9. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de papa. 1 = Temperatura máxima, 2 = Temperatura mínima, 3= Precipitación, 4 = Profundidad de suelo, 5 = Textura de suelo, 6 = Altitud, 7 = Pendiente. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto Ver niveles específicos de membresia en la Tabla 4.23.

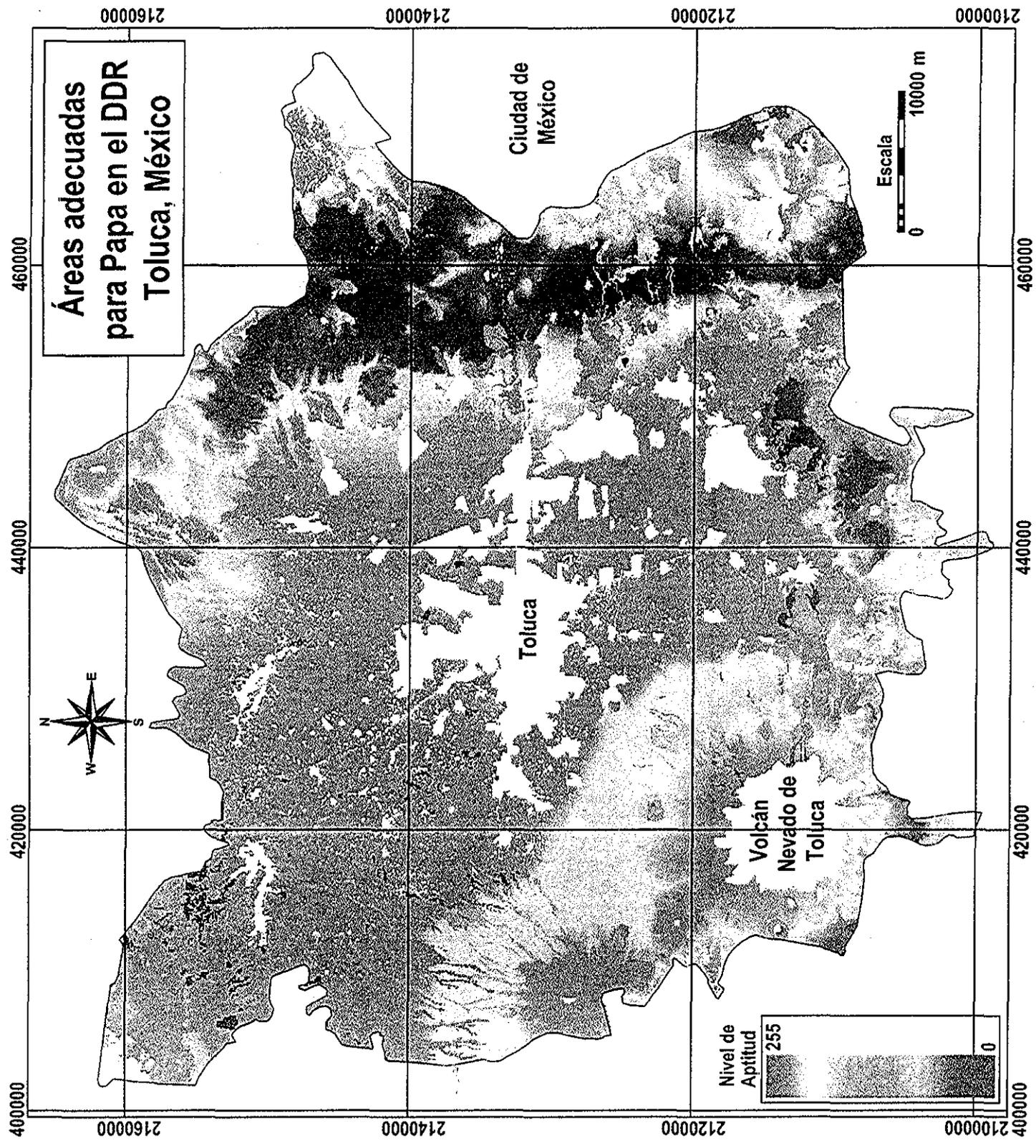


Figura 4.10. Mapa de áreas adecuadas para papa en el DDR Toluca, México.

capacidad del medio físico en esas áreas para la producción de este cultivo. La información anterior, difiere sustancialmente de la superficie actualmente sembrada de este cultivo, ya que de acuerdo con SAGARPA (2000), para ese año agrícola se cultivaron 2,092 ha considerando riego y temporal. En cuanto a las áreas actuales de agricultura de riego, prácticamente no se identificó potencial para la producción en esas condiciones (Tabla 4.24). Es de esperarse que una planta produzca mejor si sus necesidades hídricas están cubiertas. Sin embargo, los resultados anteriores indican que, de acuerdo a la evaluación del medio físico realizada, las mejores condiciones no se encontraron en donde actualmente existe disponibilidad de agua para riego. Por otra parte, áreas con nivel de potencial alto, no se ubicaron en suelos que tienen actualmente problemas de degradación (42 ha; Tabla 4.24).

Tabla 4.24. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Papa

Nivel de Potencial (ha)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Uso/cobertura										
Bosque de Pino	36	163	434	1085	629	2291	7044	10285	6441	4937
Bosque de Abies	----	39	150	199	305	1669	3779	5869	7443	7692
Bosque Pino-encino	7	801	1222	1205	1187	961	2265	3285	2668	3072
Bosque de Aile	6	7	57	83	45	134	382	1486	1084	1193
Agricultura temporal	535	957	402	3663	12841	58813	27779	32238	10558	8568
Agricultura riego	----	----	2	2	----	457	40	164	----	----
Suelos degradados	67	309	105	452	1353	3774	1562	654	122	42

4.4.3 Avena

4.4.3.1 Requerimientos ambientales del cultivo

En general este cultivo es viable en regiones áridas y semiáridas, subhúmedas y húmedas con estación seca, con climas cálido, semicálido, templado y semifrío, pudiéndose sembrar en invierno en climas cálido y semicálido (Aragón 1995). Para este cultivo las variables ambientales más importantes están asociadas a la humedad del suelo, la temperatura ambiente y las condiciones propias del suelo como el pH, aireación y contenido de materia orgánica. El viento, puede llegar a ocasionar pérdidas en el cultivo por el acame. Asimismo, la luz no es un factor limitante, sin embargo tiene influencia sobre todo en la etapa fenológica de floración. Los requerimientos ambientales para este cultivo se muestran en la Tabla 4.25. Los niveles generales para cada variable ambiental considerada para el cultivo de avena se muestran en la Tabla 4.26. Se puede observar que el cultivo puede prosperar en climas con temperaturas

más bien frescas, con una cantidad no muy elevada de precipitación, en suelos de preferencia con texturas medias, medianamente profundos y con pH neutros.

4.4.3.2 Identificación de las variables relevantes y prueba de no redundancia

En esta etapa se tomó en cuenta la opinión experta de los investigadores del programa de cereales del INIFAP, adscritos al Campo Experimental Valle de México. Con los criterios (factores) relevantes se realizó la matriz de correlaciones (Tabla 4.27), con el fin de confirmar el requisito de no redundancia (independencia) entre ellos.

Los resultados indicaron que: en el 33% se observó una correlación menor a 0.10, en el 20% se obtuvo una correlación entre 0.10 y 0.20, el 40% mostró una correlación entre 0.20 y 0.40, y el resto (7%) mostró una correlación mayor de 0.40. Es decir, en el 93% de los casos se obtuvo un coeficiente de correlación menor a 0.40, lo cual consideramos adecuado en términos de la no redundancia. Se obtuvieron valores de correlación medios entre la altitud y la temperatura mínima ($r=-0.29$) y entre la altitud y la temperatura máxima ($r=-0.40$). Asimismo, ambas temperaturas (mínima y máxima) estuvieron altamente correlacionados ($r=0.73$), de hecho fue el coeficiente de correlación más alto.

4.4.3.3 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos

Al igual que para los otros cultivos aquí considerados, para el caso de la avena, la construcción de la matriz de comparación pareada se llevó a cabo tomando en cuenta solo aquellas variables relevantes (factores) del medio físico. La matriz de comparación pareada se muestra en la Tabla 4.28.

Analizando la estructura interna de la matriz en cuanto a las valoraciones otorgadas para cada comparación pareada entre factores, se encontró que con respecto al factor columna Precipitación, todos los demás factores hilera fueron menos importantes variando desde Ligeramente (1/3) en el caso de Altitud, hasta Extremadamente (1/9) para el caso de Pendiente. Con respecto al factor columna Altitud se observó que solo el factor Precipitación (valor 3; Ligeramente) fue más importante que este, el resto de los factores hilera fue menos importante que la Altitud, variando desde Ligeramente (Profundidad de suelo y pH del suelo) hasta Fuertemente (Textura de suelo, Temperatura máxima y Pendiente) (Tabla 4.28).

En relación al factor columna Profundidad de suelo los factores hilera Precipitación y Altitud fueron Moderadamente y Ligeramente más importantes respectivamente, el resto de los factores hilera fueron menos importantes en un rango de Ligeramente (1/3) en los casos de pH del suelo, hasta Extremadamente (1/9) para el caso del factor hilera Pendiente.

En relación al factor columna pH del suelo, los factores hilera Precipitación, Altitud y Profundidad del suelo, fueron Moderadamente (valor 5) y Ligeramente más importantes (valor 3) y todos los demás

Tabla 4.25. Requerimientos ambientales para el cultivo de Avena

Variable	Descripción
Humedad	<p>La avena requiere de más humedad por unidad de materia seca, que ningún otro cereal excepto arroz¹. Este cultivo necesita agua durante la época de germinación, después necesita bastante agua durante el período de floración y la primera etapa de la maduración del grano^{1,2}, pero en la segunda etapa de la maduración y durante la cosecha la precipitación debe ser mínima². En Norteamérica crece en lugares con precipitación media anual de 381 hasta 1143 mm. El cultivo en Norteamérica está más extendido en lugares donde la precipitación no exceda a 770 mm. Aunque los límites inferiores y superiores no están bien definidos¹.</p>
Temperatura	<p>Entre los factores más importantes para la producción, la temperatura es de los primeros¹. El cultivo es viable en regiones áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas con climas cálido, semicálido, templado y frío^{1,2,3}. Sin embargo el cultivo puede crecer en áreas con alta temperatura, a condición que no haya alta humedad, dado que estas condiciones propician el desarrollo de enfermedades². Las semillas y plántulas de este cereal soportan las temperaturas mínimas³.</p>
Suelo	<p>Si las condiciones de humedad y temperatura son favorables, cualquier suelo razonablemente fértil y bien drenado es adecuado^{1,3}. Se adapta a un amplio rango de texturas y tipos de suelos^{4,3}, siempre y cuando no se formen costras que dificulten la germinación y aireación y el suelo tenga suficiente materia orgánica^{2,3}. Los cereales en general requieren un suelo que no presente problemas de salinidad, ya que específicamente todas las variedades de avena son sensibles a esta condición^{2,3}.</p>
Luz	<p>La luz no es un factor limitante, sin embargo en un cultivo denso (alta densidad de población), las hojas inferiores reciben poca luz y en esa situación la eficiencia fotosintética es baja. En la época de crecimiento y floración los cereales requieren un período con días largos, es decir con más de 12 horas de luz por día. Cuando la duración del día no es suficiente en la época de la floración, ésta se tardará o el cultivo no florecerá. Sin embargo algunas variedades son relativamente insensibles a la duración del día².</p>
Viento	<p>Los vientos demasiado fuertes provocan el acame de los cereales, como la avena, especialmente en las variedades de tallo largo. En áreas donde soplan vientos fuertes, las variedades deben de ser no muy altas o enanas².</p>

¹Coffman y Frey (1961), ²SEP (1987), ³Aragón (1995), ⁴FAO (1998).

Tabla 4.26. Niveles generales por variable para el cultivo de Avena

Variable	Niveles
Humedad	Este cereal necesita entre 250 y 1,300 mm de agua al año ^{4,2,3} Con una precipitación de abril a septiembre de más de 450 mm ¹ .
Temperatura	Para el crecimiento de este cultivo, la temperatura media de Junio debe estar por debajo de 19°C Siendo la temperatura mínima de crecimiento 4-5°C y la temperatura máxima 31-37°C ^{4,2,3} Los periodos críticos para el crecimiento de avena son: mínimo 0-4 8 °C ¹ , óptimo de 25-31°C ^{1,2,3} y máximo de 31-37°C ^{1,2,3} .
Suelos	En Norteamérica la avena crece en suelos franco arcilloso y franco arenoso ¹ También se reporta que la avena rinde más en suelos de textura limosa ² El cultivo crece bien en suelos de profundidad moderada (0.5-1.5 m), con pH mínimo de 4.5 y máximo de 7.5 ^{4,2,3} , ya que la avena no crece bien en suelos con pH mayor de 7 ² .

¹Coffman y Frey (1961), ²SEP (1987), ³Aragón (1995), ⁴FAO (1998).

Tabla 4.27. Matriz de correlaciones de los criterios (factores) de Avena Valores de correlación (r)

	Temp mínima	Temp máxima	Precipitación	pH suelo	Altitud	Pendiente
Temp Mínima	1					
Temp Máxima	0.73	1				
Precipitación	0.35	-0.20	1			
pH suelo	0.09	-0.03	0.23	1		
Altitud	-0.29	-0.40	0.12	-0.07	1	
Pendiente	0.11	-0.08	0.37	-0.0	0.4	1

Tabla 4.28. Matriz de comparación pareada de criterios para Avena

	Precipitación	Altitud	Prof suelo	pH suelo	Temp Mínima	Textura suelo	Temp Máxima	Pendiente
Precipitación	1	3	5	5	5	7	7	9
Altitud	1/3	1	3	3	5	7	7	7
Prof. Suelo	1/5	1/3	1	3	5	7	7	9
pH suelo	1/5	1/3	1/3	1	3	7	7	7
Temp Mínima	1/5	1/5	1/5	1/3	1	3	5	7
Textura suelo	1/7	1/7	1/7	1/7	1/3	1	1	3
Temp Máxima	1/7	1/7	1/7	1/7	1/5	1	1	3
Pendiente	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1/3	1/3	1

fueron menos importantes, desde Ligeramente en el caso del factor en hilera Temperatura mínima hasta Fuertemente

Para el factor columna Temperatura mínima, tres factores hilera (Precipitación, Altitud y Profundidad de suelo) fueron Moderadamente más importantes, el factor hilera pH de suelo fue valorado como Ligeramente más importante, el resto de los factores hilera Textura de suelo, Temperatura máxima y Pendiente fueron valorados como menos importantes, desde Ligeramente (1/3) hasta Fuertemente (1/7)

En relación al factor columna Textura del suelo, todos los factores hilera fueron valorados como más importantes que ese, variando desde Ligeramente (valor 3), hasta Fuertemente (valor 7). Solamente el factor hilera Temperatura máxima fue valorado como igualmente importante. La única excepción de lo anterior fue el factor hilera Pendiente, el cual fue valorado como Ligeramente menos importante (1/3). Un caso muy parecido al anterior, se observó con respecto al factor columna Temperatura máxima, la mayor parte de los factores hilera fueron valorados como más importantes. El factor hilera Textura de suelo, fue valorado como igualmente importante. Hay que recordar que la matriz de comparación pareada de factores, es simétrica y que las valoraciones son recíprocas y si con relación al factor columna Textura de suelo, el factor hilera Temperatura máxima es igualmente importante, entonces, en relación al factor columna Temperatura máxima, el factor hilera Textura de suelo es también igualmente importante. Sólo el factor hilera Pendiente fue valorado como Ligeramente menos importante (Tabla 4 28).

Finalmente, en relación al factor columna Pendiente, todos los factores hilera fueron valorados como más importantes, desde Ligeramente (valor 3), hasta Extremadamente (valor 9)

De la Tabla 4 28, los factores con mejores valoraciones en cuanto a su importancia para la evaluación realizada, fueron Precipitación, Altitud y Profundidad de suelo, y con un poco de menor importancia el pH del suelo. Además, los factores con menor importancia fueron: Pendiente del terreno, temperatura máxima así como la Textura del suelo. Lo anterior concuerda con la bibliografía, ya que para este cultivo, las variables ambientales más importantes están asociadas a la humedad del suelo, la temperatura ambiente y las condiciones propias del suelo (Aragón 1995)

En la matriz de comparación pareada se observó que los factores Textura de suelo y Temperatura máxima, fueron valoradas como igualmente importantes, lo cual se reflejó en el eigenvector de pesos (Tabla 4 29), ya que la Textura del suelo y la Temperatura máxima tienen valoraciones muy cercanas entre sí. El índice de consistencia obtenido en esta comparación pareada fue de 0.09, el cual está dentro del límite establecido como aceptable (Saaty 1980)

4.4.3.4 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de avena, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4.30) (Figura 4.11, mapas 1 a 8). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas.

4.4.3.5 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo

Para el cultivo de avena, se consideraron fuera de evaluación las áreas con altitudes mayores a los 3,500 msnm, ya que se consideró que para este cultivo no existe potencial desde el punto de vista productivo a tales altitudes.

Una vez que se obtuvieron tanto los mapas factor estandarizados, como los mapas restricción, se realizó la EMC. De este modo se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de avena en el DDR Toluca, México (Figura 4.12). De acuerdo al mapa anterior las áreas con mayor potencial corresponden a áreas no planas, con altitudes mayores a 2,800 msnm, pero menores a 2,900 msnm, es decir en general fuera del valle de Toluca, además pueden ser áreas agrícolas que colindan con áreas de bosque. Las áreas con potencial muy malo se ubicaron tanto en zonas planas del valle de Toluca altitudes inferiores de 2,750 msnm, como el caso de las partes más altas de la Sierra de las Cruces y el Volcán Nevado de Toluca, a altitudes mayores a 3,050 msnm. De la figura anterior, se obtuvo que el 80% del área considerada (197,481 ha), se clasificaron como de potencial medio a muy bajo, asimismo el 6.2% del área, 15,305 ha, se identificaron como áreas con el nivel más alto de potencialidad para este cultivo (Anexo 4).

Las áreas con el nivel más alto de aptitud se localizaron en parte de los municipios de: Ocotlán, Xonacatlán, Lerma, Huixquilucan, Ocoyoacac, Xalatlaco, Santiago Tianguistenco, Joquicingo y Tenango del Valle (Figura 1.1).

En el proceso de realimentación de la EMC con los expertos de este cultivo, se analizaron varios aspectos: por un lado la distribución espacial de las áreas potenciales. Estos resultados fueron corroborados y revisados conjuntamente con los expertos del cultivo y éstos aprobaron dichos resultados. Por otro lado también se analizaron los resultados en cuanto a la superficie, sobre todo con potencial muy bueno y al igual que los resultados anteriores, éstos fueron aprobados por los expertos.

Los resultados anteriores fueron afinados al cruzar el mapa de áreas adecuadas de avena (el cual fue reclasificado en 10 clases de aptitud), con el mapa de uso/cobertura actual de suelo, proveniente del procesamiento de la imagen Landsat. Los resultados de dicho cruzamiento se muestran en la Tabla 4.31.

Tabla 4.29. Eigenvector de pesos de los criterios para Avena.

Criterio	Peso
Precipitación	0.3668
Altitud	0.2268
Profundidad suelo	0.1700
pH suelo	0.0867
Temperatura mínima	0.0745
Textura suelo	0.0306
Temperatura máxima	0.0276
Pendiente	0.0170

Índice de consistencia = 0.09

Tabla 4.30. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Avena

Factor	Grado de membresía Fuzzy	No membresía 0.0	Membresía completa 1.0
Temperatura mínima (°C)		<2 o >6.5	5-6
Temperatura máxima (°C)		<12 o >21	18-20
Precipitación (mm)		< 700	> 850
Profundidad suelo (m)		< 0.1*	> 1.0
pH suelo		<4.5 o >7.5	5.5-6.5
Textura suelo		Arcilla, arcilla limosa, franco arcillo limoso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco
Altitud (msnm)		< 2650 o > 3050	2800-2900
Pendiente (%)		<3 o >25	5-10

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2. Ver Figura 4.11

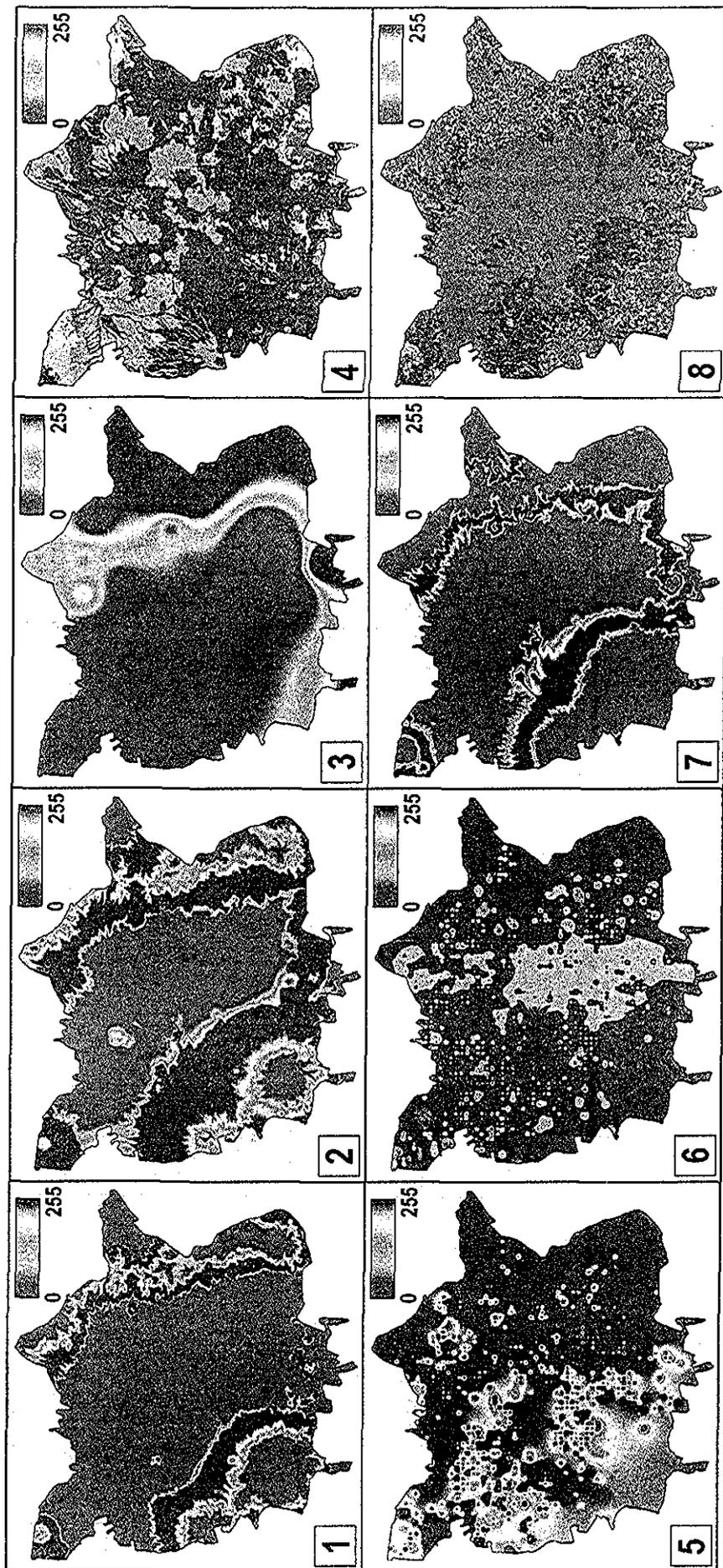


Figura 4.11. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de avena. 1 = Temperatura mínima, 2 = Temperatura máxima, 3= Precipitación, 4 = Profundidad de suelo, 5 = pH de suelo, 6 = Textura de suelo, 7 = Altitud, 8 = Fertilidad. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto. Ver niveles específicos de membresía en la Tabla 4.30.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

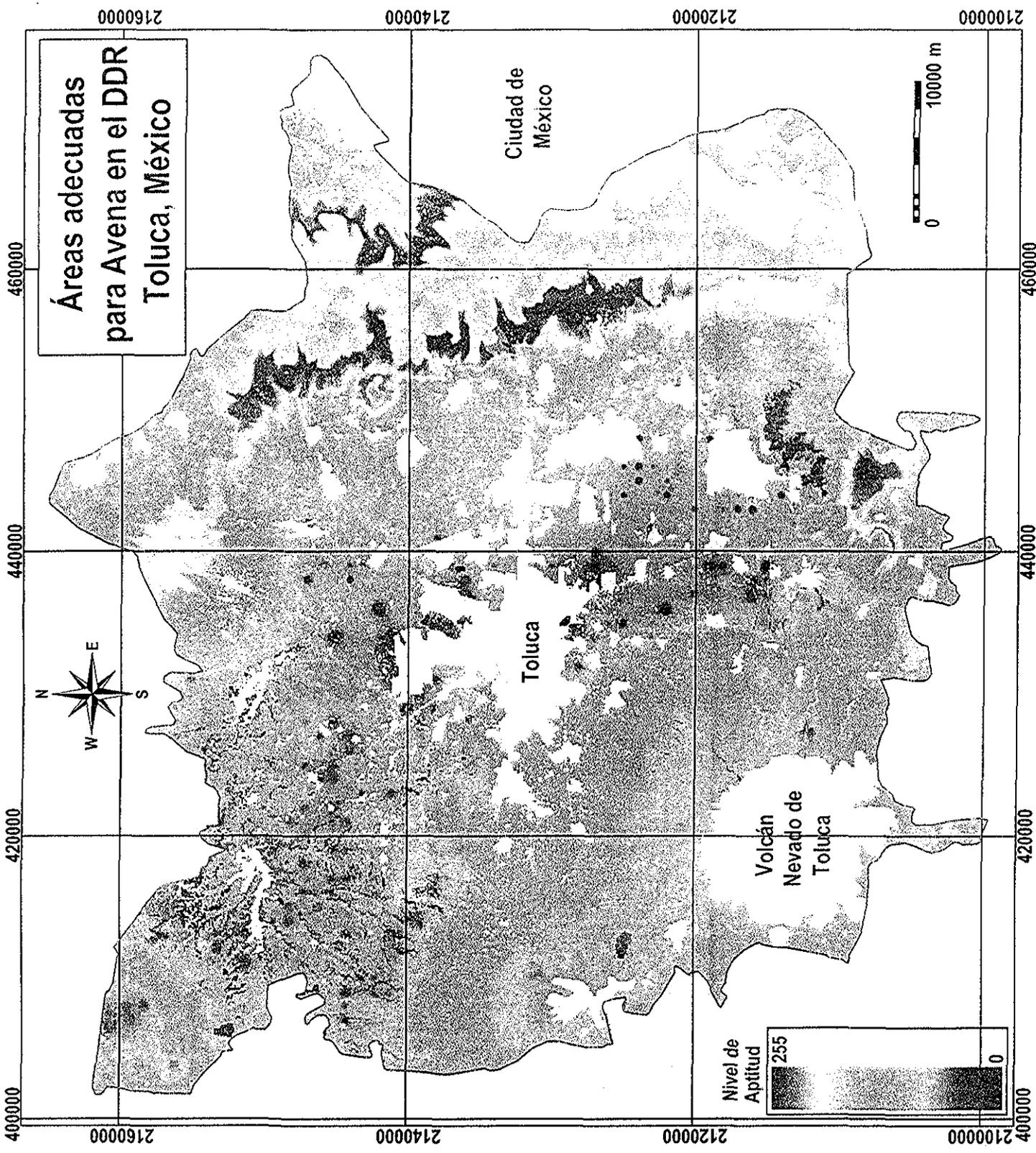


Figura 4.12. Mapa de áreas adecuadas para avena en el DDR Toluca, México.

Tabla 4.31. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Avena

Uso/cobertura	Nivel de Potencial (ha)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bosque de Pino	4	157	692	3766	3159	3193	5759	4430	1322	1383
Bosque de Abies	----	6	631	3866	2407	2377	8089	6348	1057	1055
Bosque Pino-encino	----	465	1565	2313	1980	2003	2963	2629	1064	989
Bosque de Aile	0 8	9	89	755	434	513	888	870	413	457
Agricultura temporal	107	2147	51312	31384	19657	21968	13858	9034	3552	3111
Agricultura de humedad	2	43	995	889	464	540	629	315	134	77
Agricultura riego	----	----	344	96	18	49 4	157	----	----	----
Pastizal	6	38	481	693	296	368	597	1063	375	611
Suelos degradados	5	308	2948	2348	1218	1119	341	96	33	20
Areas sin vegetación	---	----	44	1161	459	572	229	56	4	0.8

De la Tabla anterior, se puede resaltar que las áreas con el potencial más alto (niveles 9 y 10) y que se destinan actualmente a la agricultura de temporal fueron 6,663 ha (Ceballos-Silva y López-Blanco En prensa, ver Anexo 5), dichas áreas representan más del 57% de la superficie actualmente sembrada con este cultivo (4,324 ha, SAGARPA 2000). En el resto de las áreas destinadas actualmente a la agricultura de temporal, la potencialidad para este cultivo se ubicó entre los niveles 1 y 8. Además se puede decir que el potencial de este cultivo en áreas de agricultura de humedad o de riego es prácticamente nulo.

En cuanto al potencial en áreas ocupadas actualmente con Pastizal, se ubicó principalmente en los niveles muy malo y medio (niveles 3 al 8), lo cual resultó lógico, ya que esta clase de cobertura se encuentra en las partes bajas del DDR, es decir en la planicie o bien en las partes muy altas que colindan con bosques y de acuerdo a los niveles de los factores utilizados para este cultivo, esas condiciones son de niveles de potencial muy malo para avena.

Con respecto a suelos actualmente degradados, éstos no se ubicaron en áreas con potencial muy bueno. Lo mismo ocurrió con la clase de Areas sin vegetación ya que esta clase se encuentra localizada en partes muy altas, sobre todo en el Volcán Nevado de Toluca, en donde el potencial de avena no es promisorio.

4.4.4 Haba

4.4.4.1 *Requerimientos ambientales del cultivo*

Los elementos ambientales relevantes para este cultivo, están relacionados con la humedad disponible en el suelo, la temperatura ambiente y el tipo de suelo (el cultivo prospera bien en varios tipos de suelos), lo cual concuerda con el conocimiento agronómico general para el desarrollo de los cultivos. En la Tabla 4.32, se muestran los requerimientos ambientales relevantes para el cultivo de haba. En general se puede decir que este cultivo requiere para su desarrollo y fructificación, un clima templado o frío y temperaturas uniformes. En zonas tropicales muy cálidas o muy húmedas el desarrollo vegetativo se ve limitado, además de que el cultivo prospera bien en varios tipos de suelo (Aragón 1995). Los niveles generales por variable se muestran en la Tabla 4.33, en la cual destaca que un aspecto importante en este cultivo, es que soporta las bajas temperaturas a condición de que el cultivo no se encuentre en la etapa fenológica de floración, además de que el cultivo puede desarrollarse tanto en suelos francos como en aquellos con texturas arcillosas (Aragón 1995).

4.4.4.2 *Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos*

En esta etapa la participación de los investigadores del Campo Experimental Valle de Toluca del INIFAP fue muy importante para construir la matriz de comparación pareada, la cual se muestra en la Tabla 4.34. Analizando la estructura interna de la matriz en cuanto a las valoraciones otorgadas para cada comparación pareada entre criterios, se puede decir que con respecto al criterio columna Precipitación, todos los demás criterios hilera fueron menos importantes variando desde Ligeramente (1/3) hasta Fuertemente (1/7), con excepción del criterio hilera de Altitud, el cual fue valorado como Igualmente importante.

Con respecto al criterio columna Altitud, tanto el criterio hilera Precipitación como el criterio hilera Temperatura mínima, fueron valorados como Igualmente importantes, el resto de los criterios hilera fueron valorados como menos importantes en un rango de Ligeramente (Textura de suelo y Temperatura máxima) a Moderadamente (Profundidad de suelo, pH de suelo y Pendiente) (Tabla 4.34).

En relación al criterio columna Temperatura mínima, solamente el criterio hilera Precipitación fue valorado como Ligeramente (valor 3) más importante, el criterio hilera Altitud fue valorado como Igualmente importante y el resto de los criterios fueron valorados como menos importantes variando de Ligeramente (Textura de suelo) a Moderadamente.

Tabla 4.32. Requerimientos ambientales para el cultivo de Haba

Variable	Descripción
Humedad	La agricultura está estrechamente relacionada con las condiciones naturales, particularmente con las climáticas, de éstas cabe destacar la importancia de la precipitación y la temperatura para el óptimo rendimiento de los cultivos ⁵ El agua es un elemento esencial para la vida de las plantas, es un factor limitante para éstas, cuando desciende a valores mínimos independientemente de la acción debida a los otros factores climáticos ¹
Temperatura	La temperatura es el elemento del clima que regula la distribución de las plantas sobre la tierra, cuando el agua no es deficiente ¹ Para su desarrollo y fructificación, el cultivo de haba necesita un clima templado o poco frío y temperaturas uniformes, en zonas tropicales muy cálidas o muy húmedas vegeta mal El cultivo es viable en regiones áridas y semiáridas y húmedas con estación seca, con clima cálido, semicálido, templado y semifrío. Las zonas productoras de haba se localizan en donde predomina el clima templado y en menor proporción se ubican en climas de tipo cálido húmedo ⁴ .
Suelo	El suelo tiene una gran importancia para la producción de plantas, ya que es en él, en donde las plantas, usando la energía solar, combinan el bióxido de carbono de la atmósfera con los nutrientes y agua del suelo para producir tejidos vivientes Además, el suelo debe proporcionar un ambiente en el cual puedan funcionar las raíces, libres de concentraciones tóxicas de sales solubles, temperaturas extremas o patógenos ² El cultivo prospera bien en varios tipos de suelos ^{4,3,6} .

¹Grimaldi (1969), ²Foth (1987), ³Solorzano (1993), ⁴Aragón (1995), ⁵Reyna et al (1997), ⁶FAO (1998)

Tabla 4.33. Niveles generales por variable para el cultivo de Haba

Variable	Niveles
Humedad	La precipitación en las zonas productoras varía de 275 a 1,631 mm ¹ . La precipitación mínima puede ser de 200 mm y la máxima de 2,000 ³
Temperatura	En las zonas productoras el clima predominante es templado húmedo con temperatura del mes más frío entre 3 y 13 °C, con lluvias en verano, de ahí que la mayoría de las zonas inicien sus siembras con el temporal. En menor proporción se encuentran zonas productoras en climas de tipo cálido húmedo, en los cuales la temperatura promedio del mes más frío es mayor a los 18 °C ¹ . La temperatura media anual fluctúa entre 12.7 y 20.9 °C ^{1,3} . El cultivo soporta bien temperaturas de -2 a -4°C siempre que el cultivo no se encuentre en la etapa fenológica de floración, ya que heladas tardías de primavera pueden comprometer la producción esperada ²
Suelos	El cultivo prefiere los suelos de textura mediana (francos) con profundidad de 25 a 35 cm. Aunque se ha visto que en tierras arcillosas el cultivo se produce con gran vigor y lozanía. Es un cultivo tolerante ligeramente a la salinidad y acidez de los suelos ² . El pH óptimo del suelo es de alrededor de 7.0 ³
Altitud	Las comunidades productoras de haba en los Valles Altos se ubican entre los 1700 y 2800 msnm ¹ .

¹ Solorzano (1993), ² Aragón (1995), ³ FAO (1998)

Tabla 4.34. Matriz de comparación pareada de criterios de Haba

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

En cuanto al criterio columna Textura de suelo los criterios hilera Precipitación, Altitud y Temperatura mínima fueron valorados como Ligeramente más importantes que ese (Textura de suelo) Los criterios hilera Temperatura máxima, Profundidad de suelo y pH de suelo fueron valorados como Ligeramente menos importantes (1/3) y sólo el criterio hilera Pendiente fue valorado como Moderadamente menos importante (Tabla 4 34)

Con respecto al criterio columna Temperatura máxima los criterios hilera Precipitación, Altitud, Temperatura mínima y Textura de suelo fueron valorados como más importantes variando de Ligeramente a Moderadamente (Tabla 4.34). Además el criterio hilera Profundidad de suelo fue igualmente valorado en términos de importancia y sólo los criterios hilera pH de suelo y Pendiente fueron valorados como menos importantes (1/3 y 1/5 respectivamente)

Con respecto al criterio columna Profundidad de suelo, los criterios hilera Precipitación, Altitud, Temperatura mínima y Textura de suelo fueron valorados como más importantes (desde Ligeramente hasta Moderadamente) Los criterios hilera Temperatura máxima y pH de suelo fueron valorados como igualmente importantes que el criterio columna Profundidad de suelo y sólo el criterio hilera Pendiente fue valorado como Ligeramente menos importante (1/3) (Tabla 4 34)

Con relación al criterio columna pH de suelo, todos los criterios hilera fueron valorados como más importantes, variando desde Ligeramente hasta Fuertemente (Tabla 4 34), excepto el criterio hilera Profundidad de suelo, el cual fue valorado como igualmente importante y el criterio hilera Pendiente el cual fue valorado como Moderadamente menos importante Finalmente y con respecto al criterio columna Pendiente, todos los demás criterios hilera fueron valorados como más importantes variando desde Ligeramente (Profundidad de suelo) hasta Fuertemente (Precipitación), por lo que este criterio obtuvo el menor peso en el eigenvector de pesos por criterios (Tabla 4 35)

Los cuatro criterios más importantes para este cultivo están relacionadas con la disponibilidad de humedad, el ambiente (en especial la temperatura mínima) y el tipo de sustrato en el que debe desarrollarse este cultivo Los criterios con menos importancia fueron: pH del suelo y la pendiente Lo anterior concuerda con la bibliografía consultada, ya que los elementos ambientales relevantes para este cultivo están relacionados con la humedad disponible en el suelo, la temperatura ambiente y el suelo (Solorzano 1993; Aragón 1995) El eigenvector de pesos mostró un Índice de Consistencia de 0.07, dicho valor se encuentra entre los límites satisfactorios (Saaty 1980), lo cual refleja la aleatoriedad con el que fueron hechas las valoraciones

4 4 4.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Las condiciones ambientales asociadas al nivel de potencialidad más alto para el cultivo de haba, están caracterizadas por niveles de precipitación entre 700 y 800 mm, altitud entre 2,800-2,900 msnm, temperaturas mínimas entre 5.5 y 7°C, suelos profundos (>0.5m) con texturas Francas y pH neutros y terrenos con pendientes de 5-10%

Por otra parte las condiciones ambientales asociadas al nivel bajo en cuanto a potencialidad para el cultivo, están caracterizadas por suelos delgados (menos de 0.5m), texturas o muy arenosas o muy arcillosas, con temperaturas mínimas extremas (<2.5°C), altitudes menores a 2,600 o mayores a 3,000 msnm, temperaturas máximas mayores de 24°C y con pendientes menores de 4% o mayores al 25%

Estos niveles fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de haba, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4.36)(Figura 4.13, mapas 1 a 8). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas.

4 4 4 4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo

Para la EMC de este cultivo se consideraron fuera de evaluación las áreas con altitudes mayores a los 3,500 msnm, ya que de acuerdo a las condiciones locales no existe potencial desde el punto de vista agronómico a tales altitudes para el cultivo de haba.

Una vez que se obtuvieron tanto los mapas factor estandarizados, como los mapas restricción se realizó la EMC, de este modo se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de haba en el DDR Toluca, México (Figura, 4.14). Se puede observar en la figura anterior, que las áreas de potencial muy bueno, se presentaron en zonas no planas, fuera del valle, con alturas entre 2,800-2,900 msnm y pendientes entre 5-10%. Las áreas con potencial muy malo, se ubicaron tanto en el valle como en zonas altas ocupadas actualmente con bosque.

Las áreas con mayor potencial se ubicaron en parte de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca, Temoaya, Oztolotepec, Lerma, Xalatlaco, Santiago Tianguistenco, Tenango del valle, Calimaya y Joquicingo(Figura 1.1)

El 80% del área considerada, es decir 197,481 ha se ubicaron en niveles de potencial de bueno a muy malo. Asimismo el 10.5% (25,919 ha) se ubicaron como áreas con el nivel más alto de potencialidad para haba (Anexo 4)

Tabla 4.35. Eigenvector de pesos de los criterios de Haba

Criterio	Peso
Precipitación	0.3574
Altitud	0.2683
Temperatura mínima	0.1537
Textura suelo	0.0816
Temperatura máxima	0.0491
Profundidad de suelo	0.0370
pH suelo	0.0350
Pendiente	0.0178

Índice de consistencia = 0.07

Tabla 4.36. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Haba

Grado de membresía Fuzzy	No membresía 0.0	Membresía completa 1.0
Factor		
Temperatura mínima (°C)	< 2.5 o > 8.0	5.5-7
Temperatura máxima (°C)	< 17 o > 24	21-23
Precipitación (mm)	< 600 o > 850	700-800
Profundidad suelo (m)	< 0.1*	> 1.0
pH suelo	< 4.5 o > 7.5	6-7
Textura suelo	Arcilla, arcilla limosa, franco arcillo arenoso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco arenoso
Altitud (msnm)	< 2,650 o > 3,000	2,800-2,900
Pendiente (%)	< 4 o > 25	5-10

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2. Ver Figura 4.13

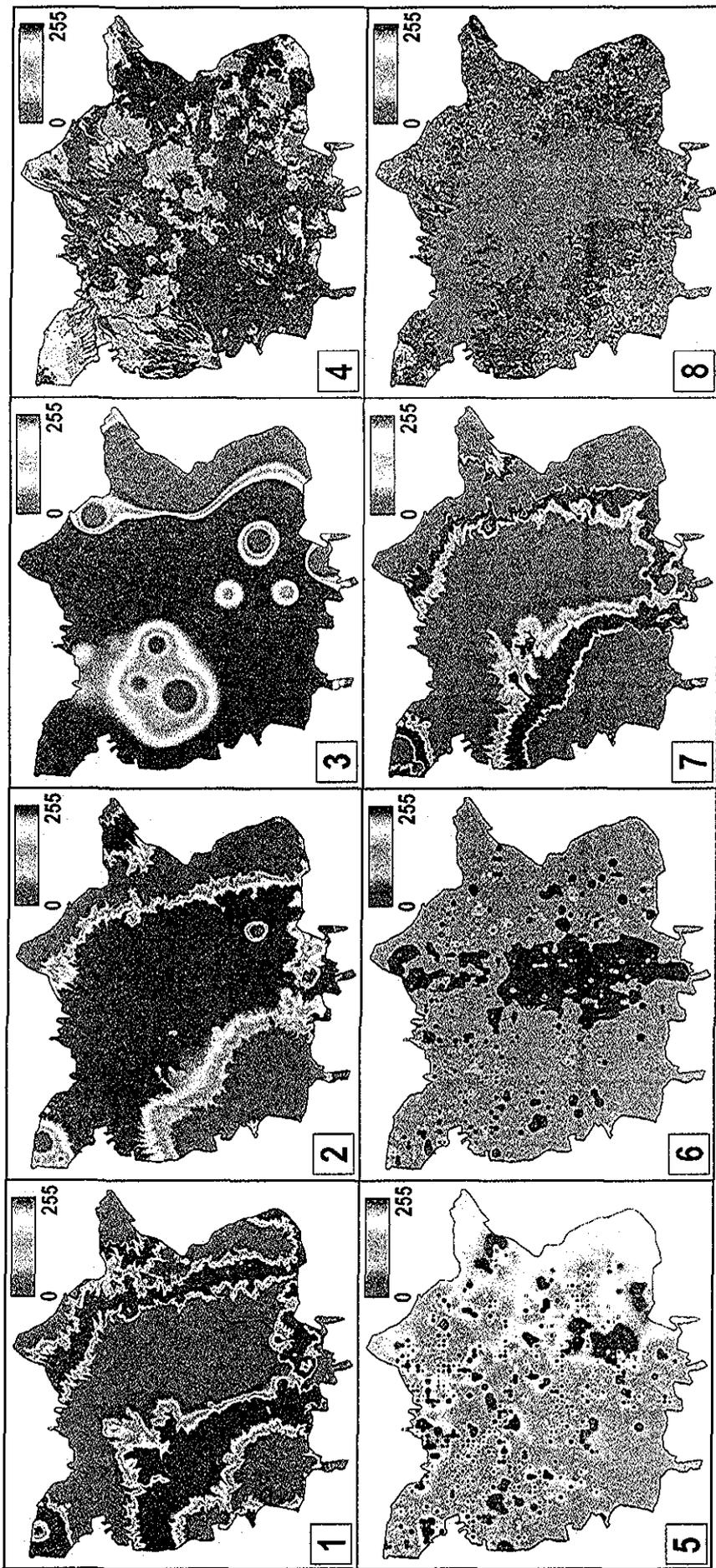
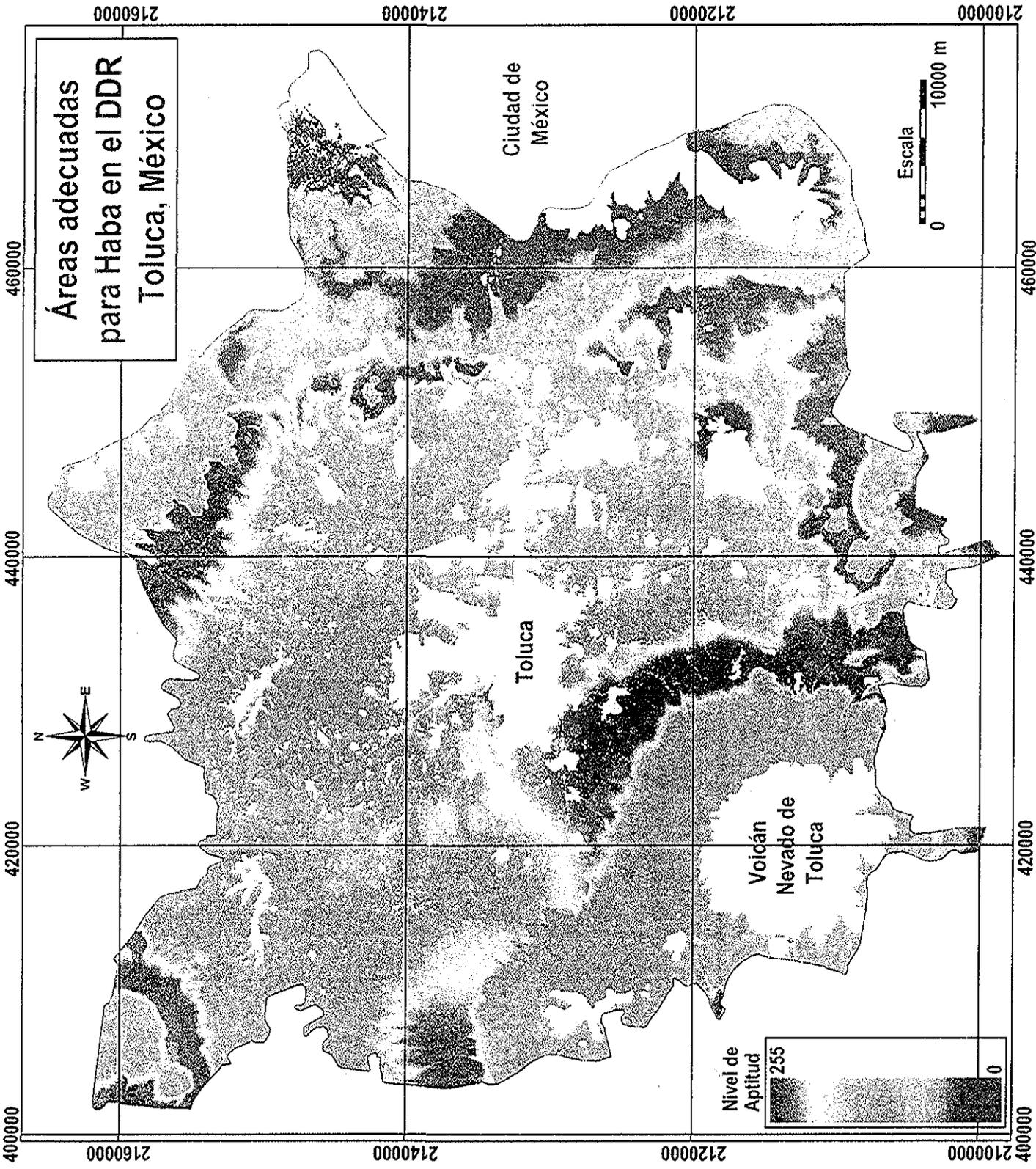


Figura 4.13. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de haba. 1 = Temperatura mínima, 2 = Temperatura máxima, 3= Precipitación, 4 = Profundidad de suelo, 5 = pH de suelo, 6 = Textura de suelo, 7 = Altitud, 8 = Pendiente. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto. Ver niveles específicos de membresía en la Tabla 4.36.



Áreas adecuadas
para Haba en el DDR
Toluca, México

Figura 4.14. Mapa de áreas adecuadas para haba en el DDR Toluca, México.

En el proceso de realimentación con el experto de este cultivo, se analizó que las áreas por nivel de potencialidad se encuentran bien determinadas. Las áreas del nivel muy bueno, mostraron una adecuada distribución acorde con el conocimiento experto local. También se analizó que el número de ha del nivel muy bueno es considerablemente mayor que el dato de superficie actual.

Los resultados anteriores fueron afinados al cruzar el mapa de áreas adecuadas de haba (el cual fue reclasificado en 10 clases de aptitud), con el mapa de uso/cobertura actual de suelo, proveniente del procesamiento de la imagen Landsat. Los resultados de dicho cruzamiento se muestran en la Tabla 4.37.

De la Tabla anterior se puede comentar que, en áreas actualmente destinadas a la agricultura de temporal, se ubicaron 17,550 ha (Tabla 4.37) del nivel de potencial muy bueno para el cultivo de haba. Además de acuerdo con nuestros resultados, se confirma que las posibilidades de este cultivo, se encuentran en las áreas de temporal.

Otro resultado es que en suelos con algún problema de degradación ya sea física (erosión) o química (salinidad), se ubicaron 1,237 ha del nivel de potencial muy bueno.

Tabla 4.37. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Haba.

Uso/cobertura	Nivel de Potencial										
	(ha)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bosque de Pino	2	3284	2437	1213	2270	6450	2866	1271	1524	2552	
Bosque de Abies	2	4546	4560	2116	3397	7054	2311	486	414	952	
Bosque Pino-encino	---	971	1393	675	1197	3708	2348	1125	1510	3044	
Bosque de Aile	2	181	403	313	326	1430	957	228	178	413	
Agricultura temporal	74	3106	3101	4659	12370	67330	23653	12417	11822	17550	
Agricultura de humedad	12	648	104	112	245	1754	640	351	340	470	
Agricultura riego	---	62	648	234	11	411	33	59	---	---	
Suelos degradados	2	117	44	155	730	3759	1101	681	618	1238	

4.4.5 Amaranto

4.4.5.1 Requerimientos ambientales del cultivo

El amaranto tiene una amplia distribución en todas las geoformas: en montañas, planicies, desiertos, riberas de ríos, orillas de lagos, playas y pantanos. En comparación con otros cultivos, la producción de este cultivo es aceptable aún bajo condiciones ambientales desfavorables (Granados 2000), aunque resulta difícil determinar los requerimientos climáticos óptimos para el amaranto (Reyna y Flores 1987). En la Tabla 4.38 se muestran los requerimientos ambientales para este cultivo.

Por su adaptación a condiciones geográficas diversas y por su aparente resistencia a situaciones adversas como sequía y otros siniestros climáticos (Reyna y Granados 1987), puede ser una alternativa para mejorar la producción en zonas temporaleras destinadas a maíz y frijol (Reyna y Flores 1988). Además, su alta rusticidad, gran poder de adaptación a diferentes climas, suelos, temperaturas y bajos requerimientos de humedad, han despertado gran interés por este cultivo (Vázquez 1988). El amaranto tiene la característica de producir abundante biomasa en corto tiempo, por lo que supera a los cereales básicos en rendimiento de biomasa, en contenido proteínico, y es poco exigente a condiciones ambientales, por lo que debe ser incluido en los lineamientos de planeación para ampliar la frontera agrícola (Reyna y Granados 1987). El cultivo se caracteriza por ser sumamente resistente a la sequía y adaptable a suelos pobres, teniendo una gran ventaja sobre otros granos, al contener un alto porcentaje de proteína, que por su valor biológico alcanza casi el 100% de la proteína perfecta (Turriza et al 1987), la cual es rica en lisina y triptofano, que es muy similar a la proteína ideal propuesta por la FAO (Suárez 1988). En la tabla 4 39 se muestran los niveles generales por variable ambiental para el amaranto.

Los requerimientos ambientales están relacionados con la humedad disponible en el suelo, la temperatura ambiente que determina las características climáticas de las diferentes zonas aptas para el cultivo y el tipo de suelo (diferentes texturas y pH). Otro factor importante es la altitud, así como la pendiente del terreno y el contenido de materia orgánica.

4 4 5 2 Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos

Para este cultivo, en la construcción de la matriz de comparación pareada participó el personal investigador del Campo Experimental Tecamachalco del INIFAP. La matriz de comparación pareada se muestra en la Tabla 4 40.

Analizando la estructura interna de la matriz en cuanto a las valoraciones otorgadas para cada comparación pareada entre criterios, se puede decir que con respecto al criterio columna Temperatura mínima, todos los demás criterios hilera fueron menos importantes variando desde Ligeramente (1/3) hasta Fuertemente, con excepción del criterio hilera Precipitación, el cual fue valorado como igualmente importante (1). En relación al criterio columna Precipitación, todos los criterios hilera fueron valorados como menos importantes en un rango de Ligeramente (Altitud) hasta Fuertemente (Temperatura máxima), con excepción de los criterios hilera Temperatura mínima y Pendiente, los cuales fueron valorados como igualmente importantes que el criterio columna Precipitación.

Tabla 4.38. Requerimientos ambientales para el Amaranto

Variable	Descripción
Humedad	La agricultura está estrechamente relacionada con las condiciones naturales, particularmente con las climáticas, de éstas cabe destacar la importancia de la precipitación y la temperatura para el óptimo rendimiento de los cultivos ¹² . Al amaranto se le observan posibilidades de adaptación con estación de lluvias irregular ⁷ , por ser una planta C4 con patrones altamente fotosintéticos por lo que tiene posibilidades de adaptarse a regiones con precipitación escasa ^{11,3} . Cuando la planta se cultiva requiere de buena humedad en el suelo durante la germinación y crecimiento inicial, pero una vez establecida puede soportar deficiencias de humedad ¹³ .
Temperatura	Macroclimáticamente el amaranto es una planta con grandes perspectivas de éxito aún en regiones áridas ² y semi-áridas ¹ . El cultivo se ha probado en climas cálido, semicálido y subhúmedo ¹⁰ . Tiene amplia distribución desde climas fríos hasta cálidos ¹³ . Soporta cambios drásticos de clima ⁸ , por lo que el cultivo ha mostrado alto grado de adaptación a diversas regiones climáticas ^{5,3} .
Suelo	El cultivo se desarrolla exitosamente en un amplio rango de parámetros edáficos tanto físicos como químicos ^{8,9} . Se ha observado buena producción en suelos regosol y vertisol ⁹ , aunque también se señala que los regosoles y litosoles son limitantes no sólo para este cultivo sino para la agricultura en general ⁴ . También se han detectado zonas potenciales con suelos Feozems ⁶ y reportado trabajos experimentales con buenos resultados en suelos Luvisoles ⁵ . Cuando la lluvia es abundante y el suelo no presenta buen drenaje el cultivo es afectado seriamente ¹³ .
Altitud	Soporta cambios drásticos en altitud ⁸ .
Latitud	Latitudinalmente en el país, se distribuye de los 16° a los 28° norte, es decir en niveles muy amplios ² .

¹Gómez (1986), ²Reyna (1986), ³Reyna y Flores (1987), ⁴Reyna y Granados (1987), ⁵Turriza *et al* (1987),

⁶Reyna y Flores (1988), ⁷Barrales, *et al* (1991), ⁸López de Juambelz y López (1991), ⁹Oliver *et al* (1991),

¹⁰Reyna, *et al* (1991), ¹¹Reyna y Carmona (1994), ¹²Reyna *et al* (1997), ¹³Granados (2000)

Tabla 4.39. Niveles generales por variable para el Amaranto.

Variable	Niveles
Precipitación	Se ha observado que se cultiva en condiciones de temporal aún con menos de 400 mm de lluvia al año recibidas durante el verano (de mayo a octubre), también es factible encontrarlo en zonas donde la precipitación es mayor de 1,300 mm ² y en zonas con 600 mm de precipitación media anual ^{1 12} . Los valores óptimos parecen estar entre 700 y 1,200 mm ^{2 13 14} . Se ha reportado que, precipitación menor a 300 mm están asociados a malos rendimientos (menos de 600 kg/ha) ¹³ . Además al cultivo se le observan posibilidades de adaptación a temporales irregulares ⁸
Temperatura	En cuanto a este factor, la planta ha mostrado buen desarrollo en lugares muy cálidos con temperaturas altas (29°C) y uniformes todo el año y también en localidades templadas con temperatura media anual de entre 12° y 18°C ^{1 12} , inviernos definidos y con presencia de heladas tempranas que afectan principalmente al follaje, pero poco al grano ² . Las temperaturas más propicias varían entre los 16 y 35°C ¹⁵ . Se cultiva en zonas cuya temperatura promedio oscila de 18 a 24°C ¹ . Si la temperatura disminuye a 4°C la planta sufre daños, llegando a tolerar hasta 34°C como máxima ¹⁶
Suelos	Los suelos en los que se ha reportado el cultivo son arenosos ¹² y poco pedregosos ¹ , así como suelos con textura mediana y profundidad de 15 a 40 cm ⁶ . Se han reportado trabajos experimentales en suelos con texturas: migajón arcilloso y migajón arenoso ⁴ . El cultivo se ha encontrado en suelos con textura arena migajonosa, arena y arcilla ¹¹ y presenta adaptabilidad a suelos con textura desde arcillosa a arenosa ^{4 3} . Según FAO ¹⁵ se adapta a un amplio rango de texturas, sin embargo es recomendable sembrar el cultivo preferentemente en suelos ligeros ¹⁷
Altitud	Las zonas de México donde se cultiva esta planta tienen características altitudinales muy contrastantes, se le encuentra en un rango de 100 a 2,800 msnm ^{2 13 1 12} y aún hasta 3,500 msnm ^{16 7} , aunque también se ha reportado que altitudes mayores a 2,800 msnm hacen difícil el desarrollo del amaranto ³ . Se han generado variedades mejoradas ¹⁷ , para zonas templadas con altitudes de 1,400 a 2,400 msnm ⁹ .
Pendiente	Las parcelas se encuentran en general en sitios con poca pendiente ¹ , entre 0 y 6% ⁶
pH suelo	El suelo es de pH cercano a la neutralidad (6.5-7.5) ^{1 11} , aunque el cultivo soporta suelos desde salinos hasta extremadamente salinos ¹⁰ . También se cultiva en suelos de moderadamente ácidos a ligeramente ácidos (5.7-6.8) ¹¹ . Se han reportado trabajos experimentales en suelos con pH de 5.5 a 5.6. Asimismo presenta alta resistencia a suelos con pH desde muy ácidos hasta muy alcalinos ^{3 15} . También se han reportado trabajos experimentales en suelos con pH de 7.4 a 8.8, esto es de ligero a fuertemente alcalino ¹²
Materia orgánica	El cultivo se ha encontrado en suelos con poca materia orgánica ^{1 11 12}

¹Gómez (1986), ²Reyna (1986), ³Reyna y Granados (1987), ⁴Rodríguez (1987), ⁵Turriza *et al* (1987), ⁶Reyna y Flores (1988), ⁷Sánchez (1988), ⁸Barrales *et al* (1991), ⁹Espitia (1991), ¹⁰López de Juambelz y López (1991), ¹¹Oliver *et al* (1991), ¹²Reyna y Carmona (1991), ¹³Reyna y Carmona (1994), ¹⁴Reyna *et al* (1997), ¹⁵FAO (1998), ¹⁶Granados (2000), ¹⁷Estrada y Sahagún (2001).

Con relación al criterio columna Pendiente, el criterio hilera Temperatura mínima fue valorado como Ligeramente (1/3) más importante, después el criterio hilera Precipitación fue valorado como Igualmente (1) importante. El resto de los criterios hilera fueron valorados como menos importantes, desde Ligeramente (Altitud), hasta Extremadamente (Temperatura máxima). Con respecto al criterio columna Altitud, los criterios hilera Temperatura mínima, Precipitación y Pendiente fueron valorados como más importantes, desde Ligeramente hasta Moderadamente. Los otros criterios hilera fueron valorados como menos importantes con valoraciones de Ligeramente (Profundidad del suelo) hasta Fuertemente (Temperatura máxima)(Tabla 4 40).

En relación al criterio columna Profundidad de suelo, cuatro criterios hilera fueron valorados como más importantes (Temperatura mínima, Precipitación, Pendiente y Altitud), el resto de los criterios hilera fueron valorados como menos importantes, desde Moderadamente (Textura de suelo y pH de suelo) hasta Fuertemente (Temperatura máxima). Con respecto al criterio columna Textura de suelo, sólo los criterios hilera pH de suelo y Temperatura máxima fueron valorados como menos importantes (Ligeramente y Moderadamente respectivamente). El resto de los criterios hilera fueron valorados como más importantes que este criterio, variando de Moderadamente hasta Fuertemente. Un comportamiento similar al anterior se observó en el criterio columna pH del suelo, es decir, casi la totalidad de los criterios hilera fueron valorados como más importantes que este criterio. Finalmente, con respecto al criterio columna Temperatura máxima, todos los criterios hilera fueron valorados como más importantes, en un rango desde Ligeramente (pH suelo) hasta Extremadamente (Temperatura mínima, Precipitación y Pendiente)(Tabla 4 40).

En general de acuerdo a las valoraciones otorgadas, los criterios más importantes para la definición de áreas adecuadas para este cultivo, son: Temperatura mínima, Precipitación y Pendiente del terreno. Asimismo el criterio Temperatura mínima tuvo igual importancia que el criterio Precipitación (al ser valorado con 1, en su comparación correspondiente). Además el criterio Precipitación fue valorado como igualmente importante con respecto al criterio Pendiente. El eigenvector de pesos (Tabla 4 41), muestra que los criterios con mayor peso fueron precisamente: Temperatura mínima, Precipitación y Pendiente, y los criterios con menor importancia fueron: Temperatura máxima, pH del suelo y la Textura del suelo.

El eigenvector de pesos mostró consistencia en las valoraciones otorgadas en la construcción de la matriz pareada ya que el índice de consistencia reportado fue de 0.07, el cual se encuentra en los límites aceptables.

Tabla 4.40. Matriz de comparación pareada de criterios de Amaranto

	Temp Mínima	Precipi- tación	Pendiente	Altitud	Prof suelo	Textura suelo	pH suelo	Temp. Máxima
Temp Mínima	1	1	3	5	5	7	7	9
Precipitación	1	1	1	3	3	5	7	9
Pendiente	1/3	1	1	3	5	5	7	9
Altitud	1/5	1/3	1/3	1	3	5	5	7
Prof suelo	1/5	1/3	1/5	1/3	1	5	5	7
Textura	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1	3	5
pH suelo	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3
Temp. Máxima	1/9	1/9	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1

Tabla 4.41. Eigenvector de pesos de los criterios de Amaranto

Variable	Peso
Temperatura mínima	0.2904
Precipitación	0.2144
Pendiente	0.2098
Altitud	0.1217
Profundidad suelo	0.0769
Textura suelo	0.0439
pH suelo	0.0267
Temperatura máxima	0.0163

Índice de consistencia = 0.07

Tabla 4.42. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Amaranto

Grado de membresía Fuzzy	No membresía 0 0	Membresía completa 1 0
Factor		
Temperatura mínima (°C)	< 7.5	> 9.0
Temperatura máxima (°C)	< 17	> 23
Precipitación (mm)	< 650 o > 900	700-800
Profundidad suelo (m)	< 0.1*	> 1.0
pH suelo	< 5.5 o > 7.5	6-7
Textura suelo	Arcilla, arcilla limosa, franco arcilloso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco
Altitud (msnm)	> 2,650	< 2,550
Pendiente (%)	> 15	< 5

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2. Ver Figura 4.15

4 4 5 3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Las condiciones ambientales asociadas al nivel muy bueno, en cuanto a la potencialidad para el cultivo de amaranto, están caracterizadas por: temperaturas mínimas durante el posible ciclo del cultivo (Abril-Septiembre) mayores de 9 0°C, con un rango de precipitación de 700-800 mm también durante el ciclo antes mencionado, pendiente menor del 5%, rango altitudinal de menos de 2,550 msnm, suelos profundos de textura franca y con pH neutros y finalmente con una temperatura máxima entre 17 y 23°C

Por otra parte los niveles bajos en cuanto a potencialidad para este cultivo, están asociados a temperaturas mínimas menores de 7 5°C y temperaturas máximas menores de 17°C, es decir áreas muy frías, pendientes mayores de 15%, suelos poco profundos y texturas muy arenosas o muy arcillosas y con pH ácidos o alcalinos

Los niveles anteriores fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de amaranto, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4 42)(Figura 4 15, mapas 1 a 8). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas

4 4 5 4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo

Para este cultivo se consideraron fuera de evaluación las áreas con altitudes mayores a los 3,500 msnm. Una vez que se obtuvieron tanto los mapas factor, como los mapas restricción se realizó la EMC, usando IDRISI, de este modo se obtuvo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de amaranto en el DDR Toluca, México (Figura 4.16)

Se puede observar en la Figura anterior, que las áreas con mayor potencial, se ubicaron sobre la parte más baja del valle de Toluca, en áreas actualmente destinadas a la producción de maíz. Son áreas planas (< 5%), con alturas menores a 2,550 msnm y con buena precipitación durante el posible ciclo de desarrollo del cultivo, es decir de Mayo-Octubre (700-800 mm). Estas áreas corresponden a parte de los municipios de Atizapan y San Antonio la Isla y a las partes bajas del municipio de Santiago Tianguistenco, (Figura 1 1).

Las áreas con menor potencial se ubicaron en las partes altas, en las laderas de las montañas, con mayor pendiente con respecto al valle y con temperaturas mínimas más extremas.

El análisis del histograma (Anexo 4) del número de píxeles considerados, mostró que al 80% de los píxeles considerados les fue asignado un valor menor a 168, lo significó que un gran porcentaje del

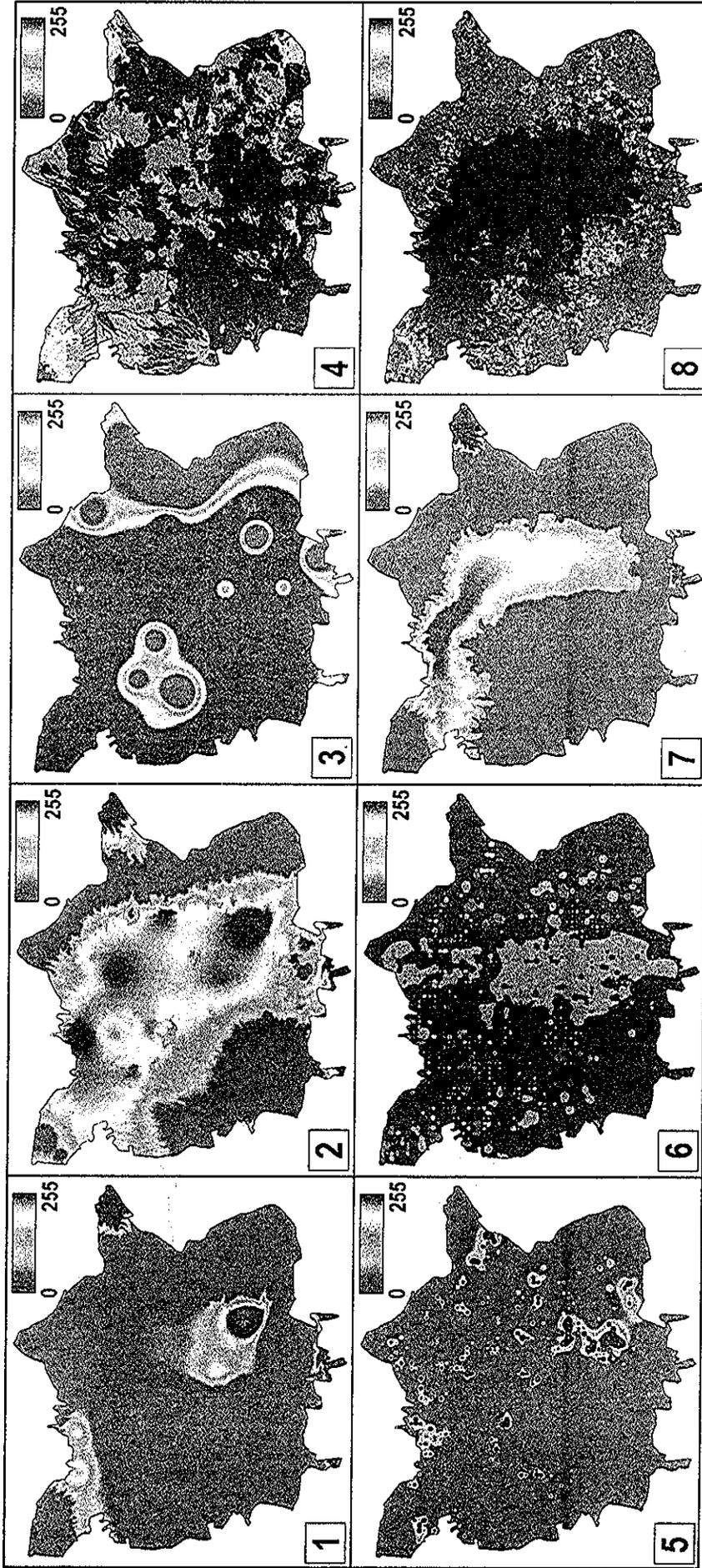


Figura 4.15. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de amaranto. 1 = Temperatura mínima, 2 = Temperatura máxima, 3= Precipitación, 4 = Profundidad de suelo, 5 = pH de suelo, 6 = Textura de suelo, 7 = Altitud, 8 = Fertilidad. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto. Ver niveles específicos de membresía en la Tabla 4.42.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

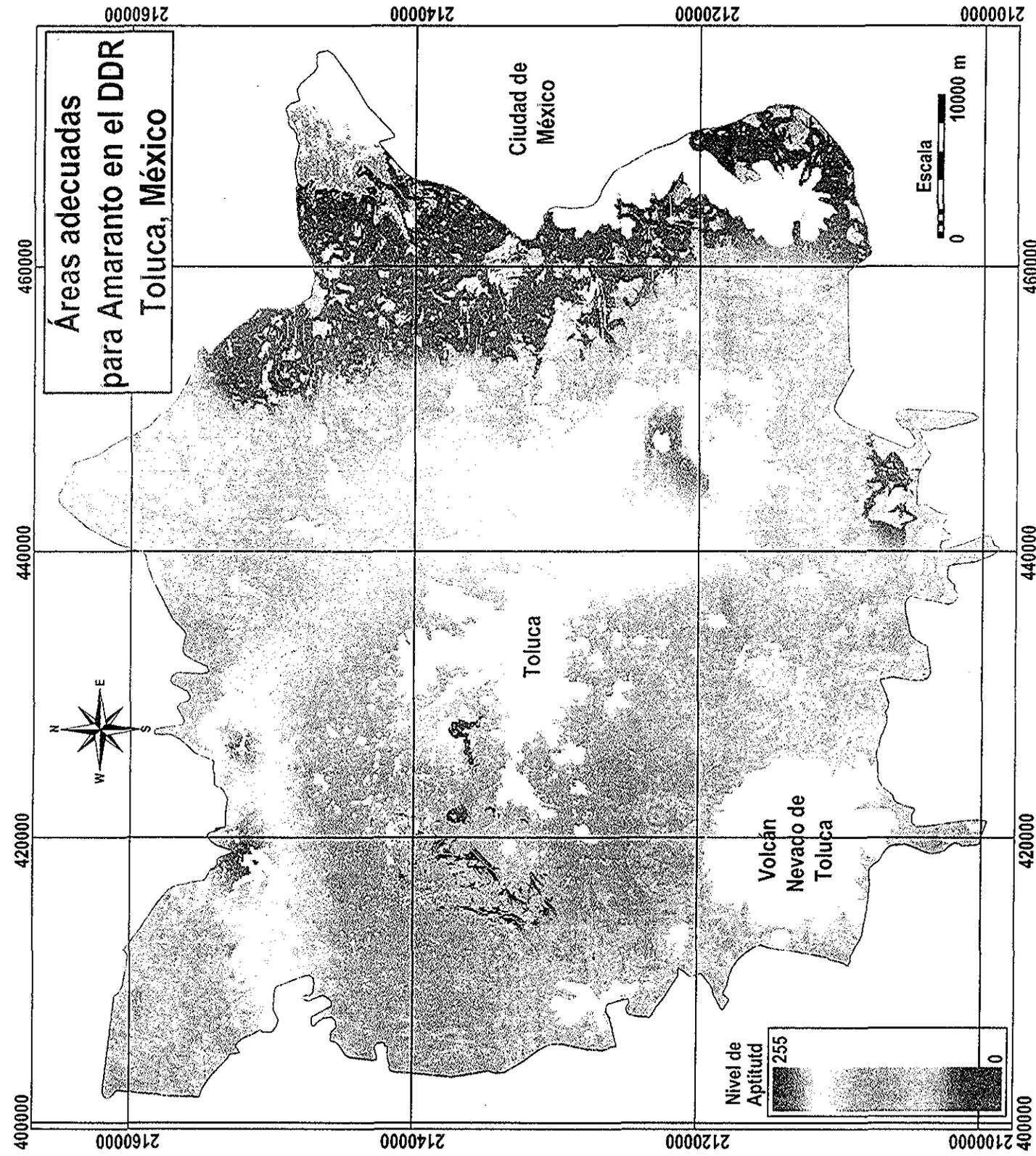


Figura 4.16. Mapa de áreas adecuadas para amaranto en el DDR Toluca, México.

área de estudio mostró niveles de aptitud de bueno a muy malo. El número de píxeles con los valores más altos (mayores a 231) fue de 1,294, que corresponden a 1,048 ha con potencial muy bueno para este cultivo, lo cual es promisorio tomando en cuenta que este es posible cultivo de alternativa en el área de estudio

En el proceso de realimentación con los expertos de este cultivo, se argumentó que el potencial del cultivo se podía ver limitado por la altitud del área, asociado obviamente con las bajas temperaturas que podían afectar al cultivo. Lo anterior podía ser atenuado utilizando variedades de ciclo corto (Mayo-Septiembre) y que las siembras se ubiquen en las áreas menos altas del DDR, ya que existen experiencias de siembras comerciales en sitios a más de 2,600 msnm, como en San Felipe Teotlalcingo, Puebla (Martínez González 2000 Comunicación personal). Por otro lado existen referencias bibliográficas (Sánchez 1988; Reyna y Carmona 1994; Granados 2000), que reportan la adaptación de este cultivo a altitudes incluso mayores a 2,800 msnm.

Los resultados anteriores fueron afinados al cruzar el mapa de áreas adecuadas de amaranto, con el mapa de uso/cobertura actual de suelo, proveniente del procesamiento de la imagen Landsat, los resultados de dicho cruzamiento se muestran en la Tabla 4.43.

Tabla 4.43. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Amaranto

Uso/cobertura	Nivel de Potencial										
	(ha)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bosque de Pino	172	5507	2940	8178	2881	3235	609	242	97	7	
Bosque de Abies	572	9582	3587	9719	1122	1110	73	79	---	---	
Agricultura temporal	241	5066	6757	24513	20644	40950	30631	18878	7496	959	
Agricultura de humedad	---	124	250	664	454	854	833	616	283	14	
Agricultura riego	---	---	---	2	63	58	237	179	127	---	
Suelos degradados	3	69	251	914	1300	2430	1685	1409	324	53	

De la tabla anterior se puede comentar que, un resultado interesante es que la clase de agricultura de temporal presentó el nivel de potencialidad muy bueno en 959 ha, lo cual resulta promisorio sobre todo si se toma en cuenta que es un cultivo que actualmente no se siembra, además dicha cantidad representa casi el 50% de lo que actualmente se siembra con papa (2,092 ha). También hay que destacar que el potencial de este cultivo se ubicó en áreas de temporal y no de riego. Asimismo, en suelos actualmente degradados el número de ha (53) con potencial muy bueno es bajo (Tabla 4.43).

4 4 6 Nopal

4 4 6 1 *Requerimientos ambientales del cultivo*

Los excesos de humedad pueden provocar enfermedades fungosas e incidencia de plagas que dañan al cultivo (Aragón 1995). Debido a que la apertura de los estomas de las cactáceas, ocurre predominantemente por la noche, la pérdida de agua tiende a ser menor en este tipo de plantas, por lo que la eficiencia en el uso del agua es 3 a 7 veces mayor para las cactáceas cultivadas que para otras plantas cultivadas (Nobel 1995). El nopal tunero tiene una gran capacidad de adaptación en cuanto a clima, altura sobre el nivel del mar, topografía y otros factores (González 1995). Los requerimientos ambientales de este cultivo se muestran en la Tabla 4 44

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. En suelos demasiados pedregosos con pendiente, se acostumbra colocar simplemente las pencas en estaciones lluviosas, pues en la estación seca, los cortes de las pencas se secan y no dan raíces. El cultivo es viable en regiones áridas y semiáridas, con climas cálido, semicálido, templado y semifrío (Aragón 1995). Las cactáceas que son altamente productivas, también tienden a ser sensibles a las bajas temperaturas, aunque la mayoría 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). En la Tabla 4 45, se muestran los niveles generales por variable ambiental para el nopal.

4 4 6 2 *Construcción de la matriz de comparación pareada y estimación de pesos*

Al igual que para el cultivo de amaranto, en este caso, en la construcción de la matriz de comparación pareada participó el personal investigador del Campo Experimental Tecamachalco del INIFAP. La matriz de comparación pareada se muestra en la Tabla 4 46.

En cuanto a las valoraciones otorgadas para cada comparación pareada entre criterios, se puede decir que con respecto al criterio columna Temperatura mínima, todos los demás criterios hilera fueron menos importantes variando desde Ligeramente (Altitud) hasta Extremadamente (pH de suelo y Temperatura máxima). En relación al criterio columna Altitud, solo el criterio hilera Temperatura mínima fue Ligeramente más importante, el criterio hilera Precipitación fue valorado como igualmente importante y el resto de los criterios hilera fueron valorados como menos importantes variando desde Ligeramente (Profundidad de suelo) hasta Extremadamente (Temperatura máxima). En relación al criterio columna Precipitación solo el criterio hilera Temperatura mínima fue valorado como Moderadamente más importante, el criterio hilera Altitud fue valorada como igualmente importante y el resto de los criterios

Tabla 4.44. Requerimientos ambientales para el cultivo de Nopal.

Variable	Descripción
Humedad	Los excesos de humedad pueden provocar enfermedades fungosas e incidencia de plagas que dañan el cultivo ² . Los empantanamientos de agua vuelven al cultivo enano, clorótico y muy susceptible al ataque de plagas. Cuando el terreno se afloja mucho por exceso de humedad, las raíces no pueden sostener a la planta y esta puede caer ¹ . La humedad relativa es un factor muy importante que afecta al nopal, en la medida que aumenta, la planta se encuentra en condiciones menos propicias para su desarrollo y fructificación, al contrario cuando es demasiado baja influye desfavorablemente al deshidratar los tejidos de las plantas ¹ .
Temperatura	El factor ambiental más importante que limita el cultivo de las cactáceas en muchos países, es la baja temperatura ⁴ . El nopal como la mayoría de las cactáceas es muy susceptible a las temperaturas bajas ^{1,4} , pero la mayoría de las especies estudiadas son relativamente tolerantes a las temperaturas altas, tales como aquellas que ocurren en la superficie del suelo en los desiertos ⁴ . El cultivo es viable en regiones áridas y semiáridas con climas cálido, semicálido, templado y semifrío, con lluvias en verano ² .
Suelo	El nopal se adapta bien a diversas texturas y composiciones de suelo, pero requiere preferentemente suelos areno-calcáreo de profundidad media y pedregosos ^{2,3} . Las nopaleras sembradas en terrenos no consolidados obran sobre ellos enriqueciéndolos y transformándolos en terrenos mejores ¹ . Las temperaturas extremas del suelo limitan el crecimiento de la raíz. El cultivo crece en la mayor parte de los terrenos, siempre que tengan alguna humedad aunque sea profunda ¹ .
Vientos	En virtud de la debilidad del sistema radicular de esta planta, le afecta mucho los vientos intensos y fuertes ¹ .

¹Borrego y Burgos (1986), ²Aragón (1995), ³Medina et al. (1995), ⁴Nobel (1995)

Tabla 4.45. Niveles generales por variable para el Nopal

Variable	Niveles
Humedad	Se han hecho trabajos experimentales y comerciales en sitios con precipitación media anual entre 340 y 680 mm ^{1,3,6} . Asimismo se le encuentra en zonas con lluvias cercanas a 125 mm al año ² , así como en zonas con lluvias entre 800 y 1,500 mm ³ .
Temperatura	Se han hecho trabajos experimentales en sitios con temperatura media anual de 22.4°C, mínima extrema de 5°C y máxima de 46°C. La mayoría de los cultivares comerciales de <i>Opuntia</i> se daña de -5 a -10°C ⁵ . La temperatura media óptima para el cultivo varía entre 15 a 26°C ^{1,3,2} . Existen evidencias de siembras de nopal en áreas con temperaturas medias entre 10-17°C y mínima de 6°C ⁴ .
Suelos	Se han reportado trabajos en suelos con profundidades de 30 a 90 cm y con textura de suelo franco, franco arcillo-arenoso, franco arcilloso y franco arenoso ¹ . El cultivo prefiere texturas medias ⁶ . El pH donde el cultivo crece es más bien alcalino ² , aunque se ha reportado creciendo en suelos con pH de 7.7 ¹ , así como también en suelos neutros (6.5-7.0) ⁴ . El cultivo posee una gran capacidad de adaptación a muy diversos tipos de suelos, pero refiere los arenosos, calcáreos, sueltos, poco profundos ¹ , y con pH entre 6 y 8 ^{2,4} . Se han reportado plantaciones comerciales en suelos Andosoles ³ .
Altitud	El Nopal prospera mejor en alturas de 800 a 2,500 msnm, pero se le encuentra hacia abajo y hacia arriba de esas alturas ^{1,3,2} , se han reportado siembras comerciales a 2,700 msnm ⁴ .

¹Borrego y Burgos (1986), ²Aragón, (1995), ³González (1995), ⁴Medina et al (1995), ⁵Nobel (1995), ⁶FAO (1998).

hileras fueron valorados como menos importantes en un rango de Ligeramente (Profundidad de suelo y Textura de suelo) hasta Extremadamente (Temperatura máxima)

En relación al siguiente criterio columna Profundidad de suelo, los criterios hileras Temperatura mínima, Altitud y Precipitación fueron valorados como más importantes con una valoración de Fuertemente y Ligeramente. El criterio hileras Textura de suelo fue valorado como igualmente importante y el resto de los criterios hileras fueron valorados como menos importantes, variando desde Ligeramente (Pendiente), hasta Fuertemente (Temperatura máxima)(Tabla 4 46)

En relación al criterio columna Textura de suelo, los criterios hileras Temperatura mínima, Altitud y Precipitación fueron valorados como más importantes, los criterios Profundidad de suelo y Pendiente fueron valorados como igualmente importantes, sólo los criterios hileras pH de suelo y Temperatura máxima fueron valorados como menos importantes, Ligeramente y Moderadamente respectivamente

Con respecto al criterio columna Pendiente, los criterios hileras Temperatura mínima y Altitud fueron valorados como Fuertemente más importantes, el criterio hileras Precipitación fue valorado como Moderadamente más importante, el criterio hileras Profundidad de suelo fue valorado como Ligeramente más importante, los criterios hileras Textura de suelo y pH de suelo fueron valorados como igualmente importantes que el criterio columna Pendiente y sólo el criterio hileras Temperatura máxima fue valorado como Fuertemente menos importante(Tabla 4 46)

En relación al criterio columna pH de suelo, todos los criterios hileras fueron valorados como más importantes variando desde Extremadamente (Temperatura mínima) hasta Ligeramente (Textura de suelo), con excepción de los criterios hileras Pendiente (valorado como igualmente importante) y el criterio hileras Temperatura máxima (valorado como Fuertemente menos importante)

Finalmente, en relación con el criterio columna Temperatura máxima, todos los criterios hileras fueron valorados como más importantes, variando de Extremadamente (Temperatura mínima, Altitud y Precipitación) a Ligeramente (Pendiente), por lo que este último criterio obtuvo la menor valoración en cuanto a los pesos de los criterios al calcular el eigenvector respectivo (Tabla 4 47)

Se observa en la tabla anterior que, de acuerdo a las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada, los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas para nopal fueron: Temperatura mínima (0 4056), Altitud (0 1947), Precipitación (0 1672) y Profundidad del suelo (0 0841) Además los criterios con menor importancia fueron: Textura del suelo (0 0563), seguido de Pendiente del terreno (0 0376), pH de suelo (0 0373) y finalmente Temperatura máxima (0 0172) El índice

Tabla 4.46. Matriz de comparación pareada de criterios para Nopal

	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

Tabla 4.47. 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 consistencia = 0.08

Tabla 4.48. Niveles usados para definir el grado de membresía fuzzy por factor para Nopal

Grado de membresía Fuzzy	No membresía 0 0	Membresía completa 1 0
Factor		
Temperatura mínima (°C)	< 3 0	> 6 0
Temperatura máxima (°C)	< 12	> 20
Precipitación (mm)	< 750 o > 950	800-900
Profundidad suelo (m)	< 0 1*	> 1 0
pH suelo	< 5 5 o > 7 5	6-7
Textura suelo	Arcilla, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arena, arena francosa y franco limoso*	Franco
Altitud (msnm)	> 2,800	< 2,550
Pendiente (%)	< 2 o > 14	3-5

* De acuerdo al enfoque de números fuzzy y variables lingüísticas (Malczewski 1999:133) el grado de no membresía fuzzy fue definido como 0.2 Ver Figura 4.17.

de consistencia obtenido en la asignación de los pesos de la matriz de comparación pareada (0.08), se encontró dentro de los límites recomendados para su aceptación (menor de 0.10)

4.4.6.3 Definición de niveles específicos de factores y construcción de mapas factor

Las condiciones ambientales asociadas al nivel muy bueno en cuanto a aptitud para el cultivo de nopal, están caracterizadas por temperaturas mínimas anuales (ya que se trata de un cultivo perenne) mayores de 6.0°C, con un rango altitudinal de menos de 2,550 msnm, precipitación de 800-900 mm (anuales), pendiente entre 3-5%, suelos profundos de textura franca y con pH neutros y finalmente con una temperatura máxima mayor a 20°C

Por otra parte, los niveles bajos en cuanto a potencialidad para este cultivo, están asociados a temperaturas mínimas menores de 3.0°C y temperaturas máximas menores de 12°C. Es decir áreas muy frías, pendientes menores de 2% o mayores de 14%, suelos poco profundos y texturas muy arenosas o muy arcillosas y precipitaciones muy bajas. Los niveles anteriores fueron la base para definir el grado de membresía (GM) fuzzy para cada uno de los factores en estudio. De tal modo que los niveles considerados como óptimos, para el desarrollo del cultivo de nopal, fueron asociados al GM fuzzy de 1 y los niveles considerados como no óptimos fueron asociados al GM de 0 (Tabla 4.48)(Figura 4.17, mapas 1 a 8). De esta manera se obtuvieron todos los mapas factor estandarizados que sirvieron de entrada para realizar la EMC y obtener el mapa de áreas adecuadas.

4.4.6.4 Obtención del mapa de áreas adecuadas y cruzamiento con el mapa de uso/cobertura de suelo.

Para este cultivo también se consideraron fuera de evaluación las áreas con altitudes mayores a los 3,500 msnm. Una vez que se obtuvieron tanto los mapas factor, como los mapas restricción se realizó la EMC, obteniendo el mapa de áreas adecuadas para el cultivo de nopal en el DDR Toluca, México (Figura 4.18)

Se puede observar en la Figura 4.18, que las zonas con alto potencial para el cultivo de nopal se localizaron en lo que se conoce como el Valle de Toluca, la cual es una zona plana, con suelos profundos y altitudes alrededor de 2,600 msnm. El análisis del histograma (Anexo 4) del número de píxeles considerados, arrojó que las áreas con muy buen potencial representan 1.7% del área considerada que equivale a 4,747 ha, lo cual es promisorio si se toma en consideración que es un cultivo actualmente no explotado en el DDR Toluca. Por otra parte, el 80% del área de estudio se ubicó con niveles de potencial que variaron de bueno a muy malo y que representaron 197,481 ha.

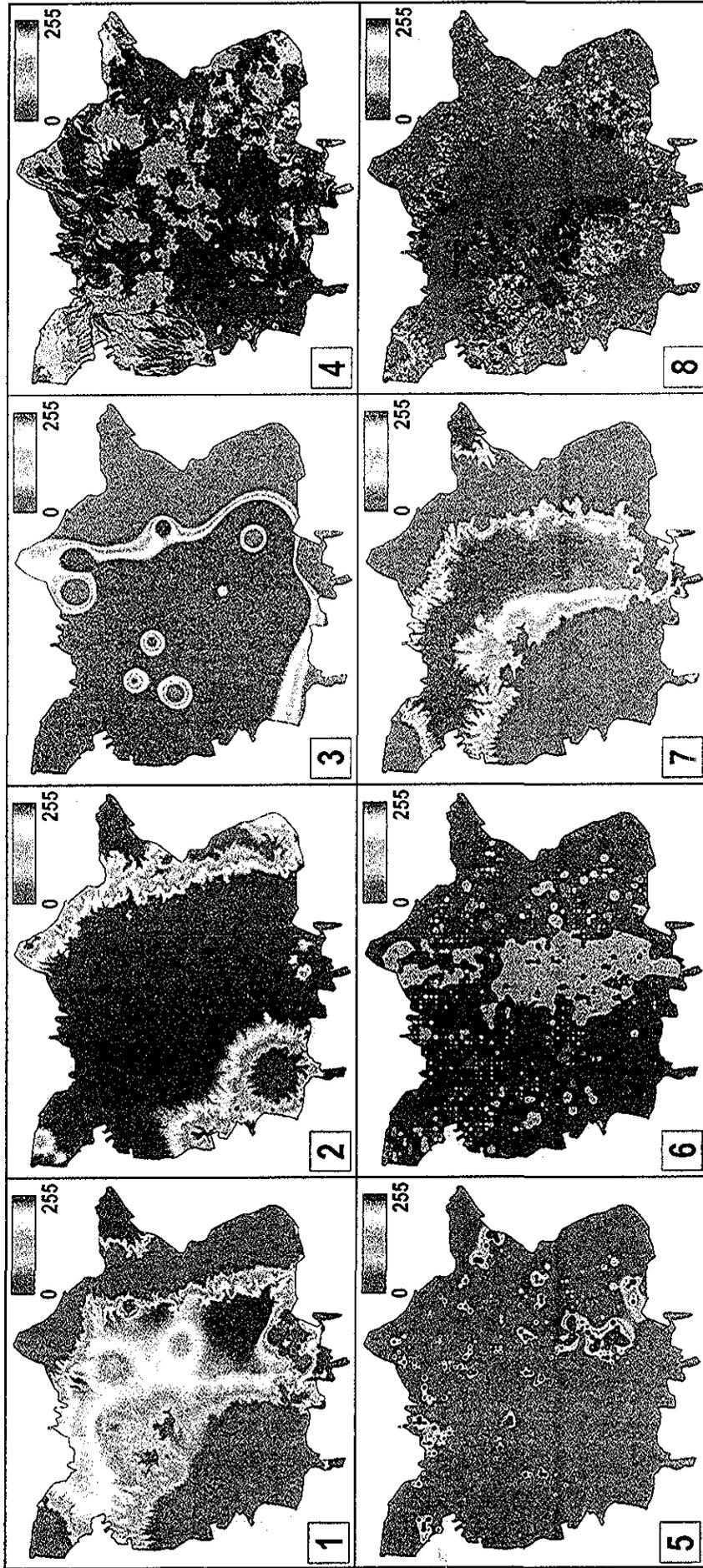


Figura 4.17. Mapas factor estandarizados utilizados para la Evaluación Multicriterio (EMC) de nopal. 1 = Temperatura mínima, 2 = Temperatura máxima, 3 = Profundidad de suelo, 4 = pH de suelo, 5 = pH de suelo, 6 = Textura de suelo, 7 = Altitud, 8 = Pendiente. La escala señala el nivel de aptitud, el valor 0 indica el nivel más bajo, el valor 255 indica el nivel más alto. Ver niveles específicos de membresía en la Tabla 4.48.

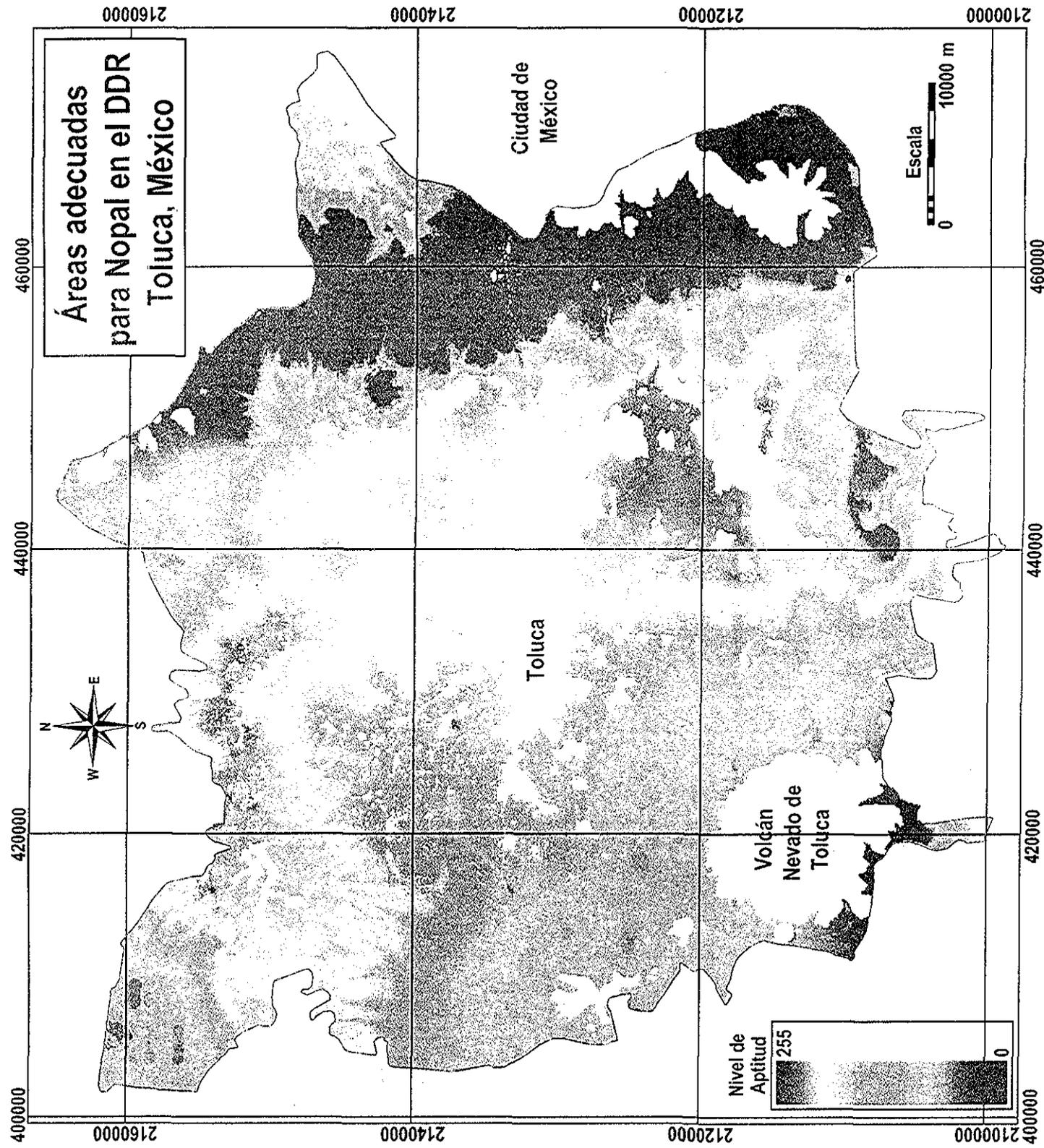


Figura 4.18. Mapa de áreas adecuadas para nopal en el DDR Toluca, México.

Las áreas con potencial muy malo se ubicaron en las partes altas de las montañas del área de estudio, las cuales son en general más frías (temperatura mínima entre $<3.5^{\circ}\text{C}$ y temperatura máxima menores a 12°C), con altitudes mayores a 2,800 msnm y pendientes mayores a 14%. Las áreas con mayor potencial (Figura 4.18), se ubicaron en parte de los municipios de Atizapan, Capulhuac, San Antonio la Isla, Rayón, Chapultepec y Temoaya y en la parte baja del municipio de Santiago Tianguistenco (Figura 1.1)

En el proceso de realimentación con el experto de este cultivo se analizaron varios aspectos, primeramente, el hecho de que se encontraron relativamente pocas áreas con potencial muy bueno, lo cual es razonable, debido al hecho de que las cactáceas en general son plantas sensibles a las bajas temperaturas (Borrego y Burgos 1986; Nobel 1995)

Posteriormente se analizó la distribución espacial de las áreas con potencial muy bueno, y éstas en general se ubicaron adecuadamente, de acuerdo a los niveles específicos para cada factor. Asimismo, en cuanto al número de ha que se ubicaron en el nivel de potencial muy bueno, se concluyó que eran adecuadas, 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 (erosión)

En general se analizó que los niveles específicos por factor estaban bien definidos, de acuerdo a las condiciones locales del área de estudio, y además eran consistentes con la revisión bibliográfica realizada. Finalmente también se puntualizó que el método usado fue útil y consistente para identificar áreas adecuadas para este cultivo, partiendo del análisis de solo las variables relevantes, las cuales se convirtieron en factores usados en esta evaluación.

Una vez hecho el proceso anterior y encontrados resultados satisfactorios, se realizó el cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas (Tabla 4.49). En la Tabla anterior se observa que de manera general, con respecto a las áreas con agricultura de temporal se obtuvo que 4,282 ha se ubicaron en el nivel de potencialidad muy bueno, lo cual es promisorio, si es que se piensa en un cultivo de alternativa al uso agrícola actual de suelo.

En cuanto a las áreas de agricultura de humedad, el gran porcentaje de éstas, se ubicó en niveles de potencial de bueno a medio, al igual que las áreas con agricultura de riego. Finalmente 2,189 ha de suelos degradados actualmente se ubicaron dentro de los niveles de potencial muy bueno. Además 4,803 ha de áreas con suelos degradados se ubicaron en los niveles de potencial de bueno a medio (niveles 5-8; Tabla 4.49), lo cual también plantea la posible utilización de estas áreas con este cultivo y de esta manera

Tabla 4.49. Cruzamiento de los mapas de uso/cobertura de suelo y áreas adecuadas de Nopal

Uso/cobertura	Nivel de Potencial										
	(ha)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bosque de Pino	71	1409	3272	6307	1448	1396	1113	1446	373	34	
Bosque de <i>Abies</i>	223	14597	3242	6497	369	346	285	279	1	1	
Agricultura temporal	12	7097	7360	28036	14571	15411	15451	29003	34912	4282	
Agricultura de humedad	1	160	183	653	356	377	339	904	919	202	
Agricultura riego	---	---	---	1	45	19	14	178	306	102	
Suelos degradados	---	25	282	1142	788	861	1248	1906	2076	113	

tratar de sacar el mejor provecho de áreas con limitantes para la producción de cultivos anuales (Ceballos-Silva y López Blanco En prensa, ver Anexo 5)

En general en relación a todos los cultivos, los criterios que fueron valorados como más importantes para la identificación de áreas adecuadas para los cultivos considerados fueron: precipitación, temperatura mínima y la profundidad del suelo. Para el caso de avena, un criterio importante fue el pH del suelo. Además los criterios que fueron valorados como menos importantes fueron: temperatura máxima, pendiente y pH del suelo con excepción de avena. Además se puede decir que las valoraciones otorgadas por los expertos a los criterios para la construcción de la matriz de comparación pareada fueron consistentes con los requerimientos óptimos de crecimiento reportados en la literatura especializada

CAPITULO 5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este capítulo se discuten algunos de los aspectos más relevantes de los resultados del procesamiento de las bases de datos de clima, suelo y relieve, así como del procesamiento de la imagen Landsat y de la EMC de los cultivos. Además, se incluyen algunas conclusiones específicas en cada sección. Al final del capítulo se presentan las conclusiones generales del presente trabajo

5.1 Base de datos de clima, suelo y relieve

En esta investigación la obtención de la base de datos de clima fue un proceso lento, ya que no toda la información proporcionada por la CNA estaba disponible en formato digital, por lo que parte de los datos tuvieron que ser capturados. Asimismo existe una gran heterogeneidad en cuanto al número de años con registro disponible entre las diferentes estaciones meteorológicas consideradas. Además, se considera que la distribución espacial de las estaciones meteorológicas, no es la "ideal" para este tipo de estudios de evaluación del medio físico para cuestiones agrícolas, ya que las estaciones están concentradas en las zonas urbanas y hay grandes áreas en las que no existe registro climático.

Tomando en cuenta las limitaciones anteriores y asumiendo que los datos originales son confiables, el proceso de depuración, revisión de inconsistencias y estimación de datos faltantes de la información de clima, fue muy importante, ya que permitió obtener una base de datos adecuadamente preparada, desde el punto de vista de la calidad de la información, lo cual es un requisito importante que se debe cumplir para la realización de estudios (sobre todo del medio físico) relacionados con la agricultura y los bosques (Doraiswamy et al 2000). De este modo a partir de dicha base de datos se obtuvieron diferentes productos en forma de mapas, necesarios para la EMC.

El procesamiento de la base de datos de clima para obtener la media decenal de todos los años considerados por estación y por variable, permitió generar mapas interpolados decenales por variable. Esta información decenal ha probado ser útil para obtener mapas temáticos usados en estudios de zonificación agro-ecológica (Corbett y Carter 1996). Los mapas así obtenidos, permitieron la flexibilidad suficiente para generar los mapas criterio tomando en cuenta las características específicas de cada cultivo, como ciclo de desarrollo. También fue posible tomar en cuenta algunas etapas fenológicas, como el caso del maíz cuyo mapa criterio de índice precipitación/evaporación, fue construido tomando en cuenta el período en el cual en este cultivo se lleva a cabo la floración (Junio-Septiembre en el área de estudio).

También es menester mencionar aquí que, dado que se usaron datos promedio, en esta investigación no se contemplaron situaciones extremas tales como sequía, inundaciones o algún otro. La evaluación de la ocurrencia de dichos eventos extremos, implicaría un estudio probabilístico detallado, lo cual queda fuera del alcance del presente trabajo.

Por otra parte, el procedimiento de interpolación usado fue adecuado para obtener los mapas de la base de datos de clima. Una vez obtenidos estos mapas, ajustes posteriores pudieron ser realizados, como en el caso de los mapas de temperatura mínima y máxima, mediante el gradiente altotérmico específico para el área de estudio.

El gradiente altotérmico obtenido coincide de manera general con lo reportado por García (1989) y Ortiz (1984) quienes señalan que a nivel de toda la Tierra la disminución es de 0.6°C para cada 100 m. Por medio del gradiente altotérmico se tomó en cuenta el hecho de que algunas variables climáticas, tales como la temperatura, dependen de la elevación (Corbett 1996), por lo que para la caracterización de ambientes adecuados para cultivos, esa dependencia se tomó en cuenta. De este modo el ajuste altotérmico realizado a los mapas interpolados de temperatura mínima y máxima, sirvió para preparar adecuadamente dichos mapas en forma que pudieran ser utilizados posteriormente como mapas criterio en las EMC, de los diferentes cultivos considerados en esta investigación.

De acuerdo con Corbett (1996), uno de los requisitos esenciales para la implementación de lo que este autor llama "plataformas dinámicas" para la caracterización ambiental, es la precisión y exactitud de los mapas climáticos georeferenciados, éstos deben de reflejar por ejemplo, la dependencia de la elevación en la temperatura. Los resultados obtenidos en este trabajo, en cuanto a los mapas de temperatura mínima y máxima, cumplieron con los requisitos previamente planteados ya que fueron ajustados con el gradiente altotérmico obtenido específicamente para el área de estudio.

Mediante la interpolación estándar no estadística y a partir de información puntual proveniente del muestreo de suelos, fue posible generar mapas para caracterizar algunas propiedades del suelo, como pH y las clases de textura. Dicha interpolación puede ser usada cuando no se usen métodos geoestadísticos (Burrough 1991). Los mapas así generados fueron usados junto con otros mapas para llevar a cabo la EMC. Lo anterior concuerda con lo señalado por Burrough (1991), en el sentido de que los mapas de suelos generados pueden ser útiles para diferentes aplicaciones como: el manejo de recursos naturales, manejo de pastizales y evaluación de tierras, además de la degradación y productividad del suelo (Fernández y Rusinkiewicz 1993).

La información generada en términos de los mapas interpolados de clima y suelo, se convirtió en una parte fundamental, la cual Corbett (1996:119) llama, el corazón de cualquier base de datos orientada a la agricultura, a partir de la cual se caracterizó el medio ambiente físico para cada cultivo. Hay que resaltar la importancia que tuvo el hecho de contar con la información del muestreo de suelos (INIFAP 1994), ya que es poco frecuente tener disponible este tipo de información (Corbett 1996), sobre todo por los costos y el tiempo que implica su obtención, depuración y procesamiento.

Las "plataformas dinámicas" para la caracterización de ambientes de adaptación de cultivos están basadas en el conjunto de normales climáticas, el uso de algoritmos adecuados de interpolación y el uso del Modelo Digital del Terreno (MDT) (Corbett 1996). En esta investigación se usaron no solo los elementos anteriores, sino además información puntual del muestreo de suelos e información cartográfica (profundidad de suelos) todo bajo el ambiente de SIG, de tal modo que, para el nivel de escala usado, se construyó una base adecuada de variables del medio físico para realizar la EMC.

Toda la información anterior fue georeferenciada con la proyección UTM, para ubicar los resultados obtenidos en forma de mapas de áreas adecuadas de cultivos. Así, se pudieron integrar bases de datos con diferente resolución espacial y temporal, todo lo anterior lo menciona Corbett (1996) como uno de los beneficios de las "plataformas dinámicas".

El método geométrico usado para generar el mapa de clasificación textural de suelos fue útil ya que permitió asignar valores de clase textural a cada pixel de un mapa raster de forma rápida y precisa. El método puede ser particularmente conveniente, cuando se trate de asignar valores de clase textural a una gran cantidad de datos (tal vez miles), es decir cuando el hacer dichas asignaciones, en forma manual o con alguna hoja de cálculo, sea impráctico. A su vez, el mapa de clasificación textural generado estuvo acorde con los requerimientos de textura del suelo reportados en la bibliografía, para el óptimo desarrollo de los cultivos, ya que dichos requerimientos están definidos en términos del triángulo de texturas (FAO 1998), de tal modo que a partir de este mapa fue posible construir los diferentes mapas criterio para cada cultivo.

Los errores en los datos espaciales pueden ocurrir en varias etapas en el proceso desde la obtención de datos hasta la presentación de resultados. Definiendo la exactitud como la diferencia entre una medida registrada y su medida verdadera o real, es claro que para la mayoría de los casos prácticos, esa medida no va a ser conocida exactamente, sin embargo alguna indicación de la exactitud es requerida (Jones 1997). Asimismo, las bases de datos espaciales no tienen una escala explícita y raramente se informa al usuario de su exactitud (Goodchild 1993). Los errores en la medición de atributos (tales como, la

altitud) pueden ser debidos a la variación natural del fenómeno en cuestión, la exactitud del dispositivo de medición (tales como un sensor) o al sesgo del observador en la recolección inicial de los datos (Burrough y McDonnell 1998).

En esta investigación se evaluó la exactitud de la altitud con datos provenientes de dos fuentes distintas de información, la cual fue un factor de suma importancia en la EMC realizada para todos los cultivos. Los resultados mostraron un alto índice de asociación entre los datos provenientes del MDT (el cual fue generado con datos de escala 1:250,000) y los datos provenientes de la medición en las cartas topográficas a escala 1:50,000 del INEGI.

Las mayores discrepancias entre ambos conjuntos de datos se observaron en las áreas con mayor heterogeneidad del relieve a altitudes mayores a 3,000 msnm. En general se puede decir que la exactitud de la altitud fue suficiente, si se toma en cuenta por un lado, la escala de origen del MDT y la escala final de la EMC (90x90 m de tamaño de pixel) y por otro lado, los valores de R^2 , de la pendiente de la recta y el error estándar del análisis estadístico realizado. Lo anterior permitió generar a partir de esa información, productos confiables en forma de mapas, tales como el de pendiente (%) y altitud (msnm).

En cuanto al análisis geoestadístico realizado, se puede decir que la teoría estadística clásica basa sus modelos en la suposición de la independencia de las observaciones, sin embargo en la mayoría de las situaciones del mundo real, la independencia entre observaciones de una variable, es más una excepción que una regla. Así, el campo de la estadística espacial está basado en la suposición de que unidades cercanas están de alguna manera asociadas (Getis 1999) y que mientras más cercanos se encuentren dos puntos, su asociación va a ser más similar (Jones 1997).

La herramienta básica del análisis geoestadístico es el variograma, el cual contiene información que puede ser usada para llevar a cabo una interpolación óptima, para optimizar la densidad de los muestreos o simular la variación espacial del fenómeno en estudio (Burrough 1991; Burrough y McDonnell 1998), esta herramienta ha sido probada exitosamente en una gran cantidad de aplicaciones incluyendo la ciencia del suelo (Burrough 1991), problemas ambientales como, el estudio de contaminantes en el subsuelo (Cressie 1993), para mejorar el procesamiento de imágenes de satélite (Chappell et al 2001), agricultura, deposición de ácidos y otras (Getis 1999).

Dentro de este contexto y en nuestro caso, el análisis geoestadístico permitió obtener una evaluación de la base de datos de clima y algunos elementos de la base de datos de suelos, en cuanto a su variabilidad espacial. Asimismo fue posible obtener algunos parámetros que proporcionaron información de la variabilidad de los elementos considerados en función de la distancia. Dicha información puede ser

útil para futuros estudios para la determinación de la densidad óptima en un muestreo de suelos, lo cual sería muy conveniente para optimizar tiempo y recursos en ese tipo de estudios. De acuerdo a los parámetros obtenidos del análisis geoestadístico de la base de datos de suelo, en especial los valores de *range*, y dada la variabilidad espacial presente en el área de estudio, se puede decir que, el muestreo realizado cumplió con su objetivo, en cuanto a que fue representativo de las condiciones del área muestreada.

5.2 Procesamiento de la imagen Landsat

La realización del análisis de Componentes Principales (CP) tuvo como objetivo: llevar a cabo un análisis exploratorio para conocer la varianza explicada o contenida en cada banda considerada, de tal modo que si fuese necesario, entonces usar solamente las bandas que explicaran la mayor varianza y de ese modo reducir la dimensión de bandas a usar (Lillesand y Kiefer 1994). Para la clasificación supervisada, se realizaron una gran cantidad de intentos probando diferentes algoritmos, umbrales estadísticos y diferentes combinaciones de bandas usadas. En los primeros intentos se usaron preferentemente las bandas que mostraron mayor importancia dentro de los dos primeros CP, los cuales explicaron más del 95% de la varianza observada. Sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron usando todas las bandas disponibles de Landsat. En el contexto anterior, el análisis de CP fue muy útil ya que permitió conocer la naturaleza de la información disponible en términos de su varianza, por lo que en estudios de este tipo, sería conveniente siempre tener una valoración de que tipo de información se está manejando.

En el proceso de la clasificación supervisada se presentaron algunos problemas que estuvieron relacionados con la confusión espectral entre diferentes clases. Es decir, algunas clases de naturaleza diferente presentaban patrones de respuesta espectral similares, lo cual concuerda con Lillesand y Kiefer (1994), quienes comentan que los "patrones de respuesta" espectral en el mundo real pueden ser distinguibles, pero no necesariamente únicos. Dichas confusiones espectrales fueron evaluadas tanto con la matriz de error espectral, como con la matriz de error real para determinar la exactitud global de la clasificación.

Los mejores resultados en cuanto a la clasificación supervisada, se alcanzaron usando el algoritmo de Máxima verosimilitud. Este algoritmo realiza una gran cantidad de cálculos antes de clasificar cada pixel, ya que calcula la varianza y covarianza para estimar la probabilidad de que un pixel pertenezca a una clase determinada, de acuerdo a un umbral estadístico determinado por el usuario (Lillesand y Kiefer

1994) Este algoritmo ha sido usado para llevar a cabo la clasificación supervisada en diferentes estudios de clasificación como: bosques tropicales (Foody y Hill 1996), clasificación de tierras de cultivos (Ortiz et al. 1997), estimación de vegetación (Ramírez-García et al. 1998) y estimación de la dinámica de tierras de cultivos y degradación de suelos (Amissah et al. 2000), probando ser útil para lograr clasificaciones adecuadas en términos de la exactitud

La estimación de la exactitud en la clasificación supervisada de la imagen se realizó mediante la construcción tanto de la matriz de error espectral, como de la matriz de error real, las cuales deben de ser reportadas para cualquier evaluación de la exactitud de una clasificación (Campbell 1996) Ejemplos de su utilización en aplicaciones de mapeo de uso de suelo pueden ser consultados en Wilde et al. (1996) y Uboldi y Chuvieco (1997) Además fue calculado el estadístico *Kappa* (Lillesand y Kiefer 1994)

Con respecto a la matriz de error espectral, no hubo errores de comisión extremadamente contrastantes, ya que dichos errores se presentaron entre clases de información similares o relacionadas La exactitud general de la clasificación supervisada, calculada mediante la matriz de error espectral, se puede considerar aceptable, tomando en cuenta tanto el tamaño de la escena como la heterogeneidad espectral de las clases presentes en el área de estudio Además se ubicó dentro de los límites reportados por algunos autores como Campbell (1996)

Con respecto a la matriz de error real, se observó un comportamiento similar en cuanto a los errores de omisión y comisión en relación con la matriz de error espectral. Por ejemplo, los pixeles que fueron omitidos de una clase de bosque fueron considerados en otras clases también de bosque Asimismo, se puede decir que la exactitud general fue adecuada ya que alcanzó un 76.5%, dicho porcentaje concuerda con lo reportado en otros trabajos similares de análisis de cobertura del suelo, como lo cita Campbell (1996)

En relación al estadístico *Kappa*, se puede decir que ha sido usado en varios trabajos de investigación para evaluar la exactitud de las clasificaciones de imágenes provenientes de diferentes sensores remotos y condiciones: García y Alvarez (1994) lo usaron para evaluar la exactitud en el procesamiento de datos de Landsat TM en una región de bosque tropical; Ortiz et al. (1997) lo usaron para estimar la clasificación de tierras de cultivos con datos de Landsat TM; Zhang y Foody (1998) estimaron la exactitud mediante este estadístico de la clasificación fuzzy de un área sub-urbana usando datos de SPOT HRV y Landsat TM; Mas (1999) estimó la exactitud del monitoreo de cambios de cobertura de la tierra con datos de Landsat MSS; Zhang y Stuart (2001) lo usaron para evaluar los métodos fuzzy en el mapeo categórico de cobertura del suelo; y Baban y Yusof (2001) estimaron la exactitud del mapeo de distribución

de coberturas y usos del suelo en montañas tropicales con datos de Landsat TM. Además el uso de este estadístico ha sido recomendado ya que toma en cuenta todos los elementos de la matriz de error (Mas 1999)

En nuestro caso el valor obtenido de κ ("k hat") fue de 0.71, el cual puede ser interpretado como que la clasificación supervisada llevada a cabo fue 71% mejor que si se hubiese realizado una asignación al azar de los valores de los píxeles. Dicho valor se ubicaría de acuerdo a la escala usada por Ortiz et al (1997), en una valoración de "muy buena".

Algo más acerca de la interpretación de la exactitud de una clasificación es el hecho de que aún cuando se realice una asignación completamente aleatoria de píxeles a clases espectrales, se podrían obtener porcentajes altos de valores correctos en la matriz de error. De hecho, tal asignación aleatoria podría resultar en clasificaciones aparentemente buenas (Lillesand y Kiefer 1994). Es decir, por sí solo la estimación del porcentaje de exactitud no basta, hay que examinar la matriz de error para tener evidencias convincentes de la exactitud de la clasificación.

Una evaluación completa debe de considerar las clases espectrales usadas en la clasificación, ya que por ejemplo, sería relativamente fácil alcanzar altos porcentajes de exactitud, clasificando escenas compuestas principalmente de clases de agua, las cuales son fáciles de categorizar correctamente, además las variaciones en la precisión de diferentes clases espectrales deben de ser identificadas (Campbell 1996).

En nuestro caso el análisis de los errores de omisión y comisión por clase de las matrices de error espectral y real, así como el porcentaje global de exactitud y el cálculo del estadístico κ , nos indicó que el procedimiento para llevar a cabo el procesamiento de la imagen Landsat, así como el algoritmo de clasificación supervisada usado, fueron adecuados y útiles para obtener resultados confiables en cuanto a la cobertura/uso del suelo en el área de estudio.

Por otra parte, la aplicación de reglas de decisión para cruzar los mapas raster generados de la digitización en pantalla y el mapa de uso/cobertura de suelo, fue un procedimiento útil para hacer mejoras sucesivas en la información de uso/cobertura del suelo en el área de estudio y obtener el mapa final respectivo. De dicho mapa fueron obtenidas las estadísticas de extensión por clase, las cuales fueron comparadas con la información proveniente de la fuente gubernamental.

Se observó que las discrepancias entre ambas estimaciones fueron relativamente pequeñas, a excepción de las estimaciones para las áreas urbanas en las cuales existe una diferencia de 14,584 ha. En este sentido es conveniente mencionar que en la clasificación supervisada, la clase de información

"Ciudad" obtuvo una de las mejores estimaciones de exactitud (92%) tanto del algoritmo como del usuario. Además esta clase fue mejorada con la utilización de reglas de decisión, ya comentadas en el capítulo respectivo, por lo que la veracidad de esta clase de información fue muy alta. Asimismo, las discrepancias observadas entre los datos reportados por SAGAR (1998) y el mapa de uso/cobertura del suelo, obtenido en esta investigación, pudieron originarse por varios factores tales como: los métodos empleados, la fecha de obtención de los datos, etc.

Es conveniente mencionar que en esta investigación, la exactitud de los resultados está estimada mediante la matriz de error espectral, el cálculo de los errores de comisión y omisión, la matriz de error real y con el cálculo del estadístico κ . Desafortunadamente, para la información reportada por SAGAR (1998), se desconoce la estimación de la exactitud, por lo que es difícil establecer causas específicas para la explicación de las divergencias encontradas.

Por otra parte, es conveniente mencionar que cuando inició la presente investigación, la información disponible de Landsat fue de 1996. Por lo que el análisis comparativo, se llevó a cabo entre esa fecha e información del 2000. Dicho análisis, permitió comprobar que no hubo cambios significativos en las áreas dedicadas a la agricultura de temporal. Los cambios más significativos se observaron en las ciudades y las áreas quemadas de bosques. Por lo anterior, la información utilizada de 1996 se consideró como confiable para generar el mapa final de uso/cobertura del suelo.

De manera general se observó una gran heterogeneidad en la resolución espacial y temporal entre las bases de datos de clima, suelo, relieve, así como en la imagen Landsat. En algunos casos se disponía de información puntual y precisa como en el caso del muestreo de suelos realizado por el INIFAP y las estaciones meteorológicas. En otros casos, como el de la información de profundidad de suelo, se dispuso de información proveniente de escala 1:50,000, y la información del MDT que provino de cartografía a escala 1:250,000. Finalmente, la imagen Landsat tenía una resolución de 30 m de tamaño de pixel. En este contexto, el tamaño de pixel usado (90 m) usado fue adecuado para homogeneizar la resolución espacial entre las diferentes bases de datos, ya que permitió tener una representación cartográfica, en la que un pixel comprende una área de 0.81 ha. Dicho tamaño de pixel es conveniente, tomando en cuenta el alcance regional de la presente investigación y la posible implementación práctica de los resultados obtenidos en este trabajo.

Además, el análisis de exactitud de la información del MDT y el análisis geoestadístico de la base de datos de suelo y clima, permitió obtener un panorama general, por un lado, en cuanto a la calidad de los datos de altitud, lo cual fortaleció la confiabilidad de los subproductos obtenidos en forma de mapas.

(altitud y pendiente) y por otro, en cuanto a la variabilidad espacial de los datos de clima y suelo. El reporte de la calidad de la información utilizada puede ser de gran utilidad en estudios de evaluación del medio físico para diferentes aplicaciones.

5.3 Evaluación Multicriterio

5.3.1 Requerimientos ambientales relevantes

En general se puede decir que en la bibliografía revisada (Shrader y Pierre 1967; Shaw 1988), se reporta la dificultad de definir con precisión los límites extremos de las variables que determinan el óptimo crecimiento y la producción del cultivo de maíz, debido principalmente al amplio rango de condiciones climáticas en las que crece este cultivo. Esta dificultad para definir con precisión dichos límites fue similar para los otros cultivos, sobre todo en aquellos en los cuales la información bibliográfica especializada es escasa, como el caso de los cultivos de avena y haba.

Las variables ambientales relevantes para el desarrollo óptimo de los cultivos fueron principalmente: a) precipitación; b) humedad disponible en el suelo, la cual está relacionada obviamente a la anterior, pero también a algunas características del suelo como textura y profundidad; c) temperatura, en el caso del nopal, la temperatura mínima, especialmente importante por la susceptibilidad de las cactáceas a esta variable (Nobel 1995); d) algunas características del suelo como pH, textura, profundidad, aireación del suelo, contenido de materia orgánica; e) altitud; f) pendiente del terreno; g) viento, por la susceptibilidad de algunos cultivos al acame, como la avena; y h) intensidad de la luz, especialmente en el cultivo de papa (Aragón 1995). La magnitud del efecto de las variables antes mencionadas, depende mucho de la etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo.

Este proceso de revisión bibliográfica fue muy importante y útil, ya que permitió no solo reforzar la toma de decisiones sobre las variables que debían de ser consideradas en la EMC, sino también para definir los rangos óptimos y no óptimos que fueron utilizados posteriormente en la estandarización de los mapas criterio. En este punto, es conveniente recalcar el hecho de que no existe suficiente información específica sobre los requerimientos ambientales de los cultivos, sobre todo a nivel nacional, por lo que para la definición de los rangos de desarrollo, la opinión de los expertos locales fue muy valiosa.

5.3.2 Pruebas de no redundancia y criterios relevantes

Para el caso de maíz y avena se realizaron las pruebas de no redundancia (independencia) sólo con las variables identificadas como relevantes (en forma de mapas) y se encontraron resultados

bastantes similares entre ambos cultivos en cuanto a la asociación entre las variables consideradas. Lo anterior puede deberse a que, por ejemplo en el caso de los mapas de precipitación, temperatura máxima y mínima, la diferencia entre los mapas de un cultivo con respecto al otro, solo era el ciclo de cultivo considerado

Además, se comprobó la asociación entre la temperatura y la altitud, ya que se encontraron niveles medios de correlación entre ambas variables y en ambos cultivos. Las variables anteriores fueron reportadas en la bibliografía consultada y por los expertos de cultivo, como relevantes para identificar las áreas adecuadas para maíz y avena, por lo que, se consideró inadecuado dejar fuera de esta evaluación a estas variables

Asimismo, se sabe que ambas temperaturas (mínima y máxima) están altamente correlacionados ($r=0.73$), de hecho fue el coeficiente de correlación más alto en ambos cultivos. Sin embargo de acuerdo con la literatura revisada en cuanto a los requerimientos para el óptimo desarrollo de los cultivos de maíz y avena, se reporta la importancia específica de ambas variables, por lo que no se consideró conveniente dejar fuera de la EMC, a ninguna de las dos variables. Ya que además, fenológicamente tienen importancia particular e independiente

Por otra parte y como se explicó en la sección correspondiente, la matriz de comparación pareada fue construida con aquellas variables que de acuerdo a la opinión de los expertos y a la revisión bibliográfica respectiva, fueron las más relevantes para el óptimo crecimiento de los cultivos. Dichas variables entonces se convirtieron en los criterios que se usaron para realizar la EMC para cada uno de los cultivos. El procedimiento seguido para la definición de los criterios considerados en la EMC, coincide con lo reportado por Malczewski (1999:109), ya que según este autor, el número de criterios de evaluación depende de las características del problema, además, el conjunto de criterios para un problema en particular puede ser desarrollado a través de una revisión de la literatura relevante, estudios analíticos y opiniones (de los expertos de cultivos en nuestro caso)

Con respecto a la matriz de comparación pareada y para el caso del maíz, 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 este cultivo fueron: temperatura mínima, índice P/E, textura del suelo y profundidad del suelo. Por otra parte los criterios que fueron menos valorados y por consecuencia tienen menos importancia en la evaluación llevada a cabo fueron: pH del suelo y pendiente con la misma valoración, y temperatura máxima y altitud, también con la misma valoración. Lo anterior concuerda con lo reportado por otros autores (Llanos 1984), en el sentido que dos de los factores más

importantes para este cultivo están relacionados con la temperatura y la disponibilidad de humedad. Específicamente ellos están asociados a la presencia de bajas temperaturas durante el ciclo de cultivo, la disponibilidad de agua durante el ciclo de la planta, especialmente en el período crítico de la floración (del 15 de Julio-15 Agosto en el área de estudio) y a las características del suelo, tales como textura y profundidad.

Para el cultivo de papa y de acuerdo a las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada, los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas fueron: la profundidad del suelo, textura del suelo, seguidos de precipitación y temperatura mínima. Además los criterios con menor importancia fueron: altitud, temperatura máxima y finalmente pendiente del terreno. Los resultados anteriores concuerdan con la literatura, ya que dado que el producto principal del cultivo es un tubérculo, las características de profundidad (Montaldo 1984; Aragón 1995) y textura del suelo (Christiansen 1967; Bouwkamp 1985), así como la humedad disponible por la planta (Christiansen 1967; Ora 1977; Doorenbos y Kassam 1979; Bouwkamp 1985; Lara 1993; Aragón 1995; FAO 1998) son tres criterios muy importantes que se deben de cubrir, de acuerdo a los requerimientos específicos para el cultivo.

Además puesto que la papa no tolera las heladas (Lara 1993) entonces las temperaturas mínimas, son un criterio también de cierta importancia. Con respecto a los criterios con menos importancia, también se coincidió con la bibliografía, ya que no se encontraron referencias que hicieran mención sobre la pendiente del terreno como un criterio de importancia. Por lo que toca a la altitud, este cultivo prospera hasta en altitudes mayores a los 3,000 msnm (Montaldo 1984; Aragón 1995), por lo que no se consideró en esta evaluación como un criterio de importancia en la identificación de las áreas adecuadas para papa.

Para el cultivo de avena, en general se puede decir que los factores con mejores valoraciones en cuanto a su importancia para la evaluación realizada, fueron precipitación, altitud y profundidad de suelo y con un poco de menor importancia el pH del suelo. Además los factores con menor importancia fueron: pendiente del terreno, temperatura máxima así como la textura del suelo. En general lo anterior concuerda con el acervo agronómico revisado, ya que para este cultivo las variables ambientales más importantes están asociadas a la humedad del suelo, la temperatura ambiente y las condiciones propias del suelo (Aragón 1995).

En relación con el cultivo de haba, los cuatro criterios más importantes para este cultivo, estuvieron relacionadas con la disponibilidad de humedad, el ambiente (en especial la temperatura mínima) y el tipo de sustrato en el que se debe desarrollar este cultivo. Los criterios con menos importancia fueron: pH del suelo y la pendiente. Lo anterior concuerda con diversos autores (Solorzano

1993; Aragón 1995) quienes reportan que los elementos ambientales relevantes para este cultivo, están relacionados con la humedad disponible en el suelo, la temperatura ambiente y el tipo suelo

Para el cultivo de amaranto se encontró que los criterios con mayor peso fueron: temperatura mínima, precipitación y pendiente, y los criterios con menor importancia fueron: temperatura máxima, pH del suelo y la textura del suelo. Lo anterior puede interpretarse como que el cultivo no tiene serias restricciones o limitaciones en cuanto a las variaciones de los factores antes mencionados (de menor importancia), ya que el cultivo ha mostrado alto grado de adaptación a diversas regiones climáticas (Reyna y Flores 1987; López de Juambelz y López 1991; Granados 2000). Asimismo esta planta se desarrolla exitosamente en un amplio rango de parámetros edáficos (López de Juambelz y López 1991; Oliver et al 1991), por otra parte el cultivo presenta alta resistencia a suelos con pH desde muy ácidos hasta muy alcalinos (Reyna y Granados 1987; FAO 1998)

En cuanto al cultivo del nopal se observó que de acuerdo a las valoraciones otorgadas en la matriz de comparación pareada, los criterios más importantes para identificar las áreas adecuadas fueron: temperatura mínima, altitud, precipitación y profundidad del suelo. 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 el conocimiento agronómico consultado ya que se conoce que las cactáceas son sensibles a las bajas temperaturas (Borrego y Burgos 1986; Nobel 1995), 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

En general, los criterios que fueron valorados como más importantes para la identificación de áreas adecuadas de los cultivos fueron: precipitación (Índice P/E, para el caso del maíz), temperatura mínima, con excepción de la avena lo cual concuerda con la bibliografía, ya que las semillas y plántulas de este cultivo soportan las temperaturas mínimas (Aragón 1995) y la profundidad del suelo (sólo para el caso de maíz, papa y avena)

Para el caso del cultivo de avena un criterio importante fue el pH del suelo, dicha valoración de los expertos coincide con la revisión bibliográfica realizada, ya que todas las variedades de avena son sensibles a los problemas de salinidad (Aragón 1995). En el caso del cultivo de haba y nopal, un criterio importante fue el de altitud, aunque este criterio está inversamente relacionado con el criterio de temperatura mínima, el cual ya se mencionó anteriormente como importante para la identificación de áreas adecuadas de los cultivos estudiados. Con respecto al cultivo del nopal, la temperatura mínima es importante ya que la mayoría de las cactáceas (como el nopal) son muy susceptibles a las bajas

temperaturas (Borrego y Burgos 1986, Nobel 1995) Asimismo, los criterios que fueron valorados como menos importantes para la identificación de áreas adecuadas de los cultivos fueron: temperatura máxima, pendiente, pH del suelo (con excepción del cultivo de avena, como ya se mencionó anteriormente)

La temperatura máxima para el caso de papa no fue valorada como importante ya que este cultivo prefiere los climas frescos (Lara 1993). A medida que aumenta la temperatura se incrementa la tasa de crecimiento del cultivo hasta un óptimo, después del cual el aumento en la temperatura puede ser perjudicial (Ora 1977) En el caso de la avena, el cultivo puede crecer en áreas con alta temperatura, a condición de que no haya alta humedad, dado que estas condiciones propician el desarrollo de enfermedades (SEP 1987)

Asimismo, para su desarrollo y fructificación, el cultivo de haba, necesita de un clima templado o poco frío (Aragón 1995) Con respecto al amaranto, este cultivo tiene una amplia distribución, desde climas fríos hasta cálidos (Granados 2000), soporta cambios drásticos de clima (López de Juambelz y López 1991), por lo que ha mostrado alto grado de adaptación a diversas regiones climáticas (Reyna y Flores 1987; Turriza et al. 1987) Por su parte, la mayoría de las especies de nopal, son relativamente tolerantes a las altas temperaturas, como las que existen, en la superficie del suelo en los desiertos (Nobel 1995).

Las razones por las que los expertos no consideraron al pH del suelo como un criterio relevante, en la identificación de áreas adecuadas de cultivos, estuvieron relacionadas con lo siguiente: para el caso del maíz, el cultivo es tolerante a la salinidad y a la acidez del suelo (Llanos 1984, Aragón 1995) El cultivo de la papa prefiere el pH de suelo cercano a 6.0 (Christiansen 1967; Doorembos y Kassam 1979; Bouwkamp 1985; FAO 1998), aunque lo anterior no significa que puedan cultivarse papas fuera de esos límites (Montaldo 1984) En relación al haba, este cultivo es ligeramente tolerante a la salinidad y acidez de los suelos (Aragón 1995). El cultivo de amaranto soporta suelos desde muy ácidos hasta muy alcalinos (Reyna y Granados 1987, FAO 1998).

Para el caso de avena y amaranto, el criterio de textura de suelo no fue valorado como importante, lo cual coincide con otros autores, ya que tanto el cultivo de avena (Aragón 1995; FAO 1998), como el de amaranto (Reyna y Granados 1987; Turriza et al 1987; López de Juambelz y López 1991; Oliver et al 1991), se adaptan a un amplio rango de texturas de suelo. Asimismo, para el caso de haba y amaranto, el criterio de profundidad de suelo fue valorado como de poca importancia para la identificación de áreas adecuadas para estos cultivos, ya que tanto el cultivo de haba (Aragón 1995), como el cultivo de amaranto (Reyna y Flores 1988), pueden desarrollarse en suelos poco profundos

En general se puede decir que las valoraciones otorgadas a los criterios por los expertos para la construcción de la matriz de comparación pareada fueron consistentes con la bibliografía revisada, lo anterior confirma por un lado la utilidad de usar el conocimiento experto local para valorar la importancia de los criterios usados en esta EMC y por otro confirma la utilidad del método de comparación pareada para generar los pesos específicos de cada criterio necesarios para la EMC. La estimación de los pesos relativos de los criterios usados, es una característica distintiva del enfoque de EMC, con respecto a los métodos convencionales para identificar áreas potenciales de cultivos como son: evaluación de tierras y zonificación agroclimática.

5.3.3 Divergencias entre áreas actuales y potenciales de cultivos

Para el caso del maíz se encontró que la superficie con alto potencial fue 46.7% menor a la sembrada actualmente con este cultivo. Lo anterior puede explicarse por el hecho de que, desde el punto de vista de la evaluación del medio físico realizada, no toda la superficie actualmente sembrada tiene las características de alta aptitud, sino que hay zonas con aptitud media y baja. De acuerdo con los recorridos de campo se constató que existen áreas en las cuales se presentan problemas de degradación del suelo (erosión específicamente) y que son utilizadas para sembrar maíz. Se entiende la enorme importancia que tiene este cultivo para los productores de bajos recursos y su implicación social y cultural en el área de estudio, por lo que los resultados obtenidos, no implican por sí mismos, la recomendación del cambio de cultivo.

En relación al cultivo de papa, la superficie asociada al nivel más alto de aptitud y usada actualmente para agricultura de temporal fue de 8,568 ha. Dicha cantidad es mucho mayor a la superficie actualmente sembrada con este cultivo, lo cual refleja la capacidad del medio físico en esas áreas para la producción de este cultivo. La siembra del cultivo de papa en áreas boscosas, es una realidad actual del manejo parcelario por parte de los productores en el área de estudio. Sin embargo, como parte de los resultados obtenidos en este trabajo, ***en ningún caso ni circunstancia, se recomienda sustituir el bosque por la siembra de papa o algún otro cultivo.***

Para el cultivo de avena se encontró que las áreas con mayor potencial, corresponden a áreas no planas, en general fuera del valle de Toluca, además pueden ser áreas agrícolas que colindan con explotaciones forestales. Asimismo, las áreas con aptitud más alta y que se destinan actualmente a la agricultura de temporal fueron 6,663 ha, dichas áreas representan más del 57% de la superficie

actualmente sembrada con este cultivo (4,324 ha, SAGARPA 2000) En este sentido, el cultivo de avena tiene un potencial promisorio desde el punto de vista del medio físico presente en el DDR Toluca

En lo que se refiere al cultivo de haba, en áreas actualmente destinadas a la agricultura de temporal, se ubicaron 17,550 ha del nivel de aptitud muy bueno para el cultivo de haba Además de acuerdo con nuestros resultados, se confirma que las posibilidades de este cultivo, se encuentran en las áreas de temporal, ya que prácticamente fue nulo el potencial encontrado para condiciones de riego en nuestra área de estudio De acuerdo con nuestros resultados, el número de ha con aptitud para la producción de haba, es mucho mayor que la superficie actualmente utilizada con este cultivo

Para el cultivo de amaranto, un resultado interesante es que la clase de agricultura de temporal presentó el nivel de aptitud muy bueno en 959 ha, lo cual resulta promisorio sobre todo si se toma en cuenta que es un cultivo que actualmente no se siembra, además dicha cantidad representa casi el 50% de lo que actualmente se siembra con papa (2,092 ha) El amaranto al igual que el caso del nopal, se incluyó en esta EMC para obtener información exploratoria sobre su potencial, ya que de acuerdo al conocimiento del área de estudio, las estadísticas gubernamentales y los recorridos de campo, hasta el momento no existen siembras comerciales con este cultivo y los resultados presentados aquí son de carácter preliminar.

En lo que se refiere al cultivo de nopal y con respecto a las áreas con agricultura de temporal se obtuvo que 4,282 ha se ubicaron en el nivel de aptitud muy bueno, lo cual es promisorio, si es que se piensa en un cultivo de alternativa al uso agrícola actual de suelo. Además 2,189 ha de suelos degradados actualmente se ubicaron dentro de los niveles de aptitud muy bueno y 4,803 ha de áreas con suelos degradados se ubicaron en los niveles de aptitud de bueno a medio Lo anterior plantea la posible utilización de estas áreas con este cultivo y de esta manera tratar de sacar el mejor provecho posible de áreas con limitantes para la producción de cultivos anuales, pensando en este cultivo como una alternativa de conservación y no como un sistema de explotación productiva intensiva

Es bueno resaltar que el presente estudio, es solo una valoración del medio físico para identificar áreas con diferentes niveles de aptitud para la producción de cultivos Para alcanzar el máximo nivel de producción en un área, es menester además del medio físico adecuado, tener en cuenta el manejo agronómico del cultivo, el nivel tecnológico y económico del productor, los apoyos para la producción y otros factores, que combinados puedan ayudar a alcanzar el nivel máximo de producción.

De manera general, la información generada en este trabajo en relación a las áreas adecuadas por cultivo, puede ser útil para implementar los programas de apoyo a la producción en el campo o bien

para estudios de generación de tecnología específicos por cultivo. Asimismo, el cruzamiento de los mapas de áreas adecuadas por cultivo con el mapa de uso/cobertura del suelo, sirvió para afinar los resultados, al considerar solo las áreas con uso agrícola actual en la identificación de áreas adecuadas para cultivos.

5.3.4 Estandarización fuzzy, estimación de pesos de criterios y el procedimiento de EMC

Dada la variedad de escalas en las cuales los criterios pueden ser medidos, la EMC requiere que los valores de los mapas factor sean transformados a unidades comparables (Eastman et al 1995; Barredo 1996; Malczewski 1996). Además convirtiendo todos los mapas factor a escalas estándar hay alguna legitimidad en la acumulación de las puntuaciones o niveles de los criterios para formar un valor único de aptitud (Malczewski 1996).

Varios enfoques pueden ser usados para hacer a los mapas factor comparables entre sí (Carver 1991), tales como: la transformación de escala lineal, función de valor/utilidad, probabilístico y la función de membresía fuzzy. Algunos de los enfoques usados para la estandarización de criterios en estudios de aplicación de EMC, han sido: transformación lineal (Carver 1991; Malczewski 1996) y medida de valor (Pereira y Duckstein 1993).

En esta investigación se usó el enfoque de función de membresía fuzzy, el cual puede ser visto como un re-escalamiento de valores bajo el precepto de un conjunto de valores de membresía (Malczewski 1999). Eastman (1999b) sugiere considerar a la estandarización en una EMC, como una transformación de las puntuaciones o valoraciones de los criterios bajo un enfoque de conjuntos de membresía fuzzy, dado que los procedimientos convencionales de transformaciones lineales pueden no ser útiles en todos los casos.

Los mapas factor estandarizados que mejor mostraron su naturaleza continua fueron aquellos que por un lado, provenían de factores cuyos mapas primarios interpolados eran de origen continuo y por otro lado provenían de factores que presentaron mayor variabilidad espacial en el área de estudio. Tal fue el caso de los factores: temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, altitud y pendiente.

Con respecto a los mapas categóricos (textura de suelo, profundidad de suelo e índice P/E), se puede decir que la estandarización con el enfoque fuzzy, fue posible gracias a la aplicación de los números fuzzy. Como se explicó en la sección correspondiente, un término o variable lingüística puede ser convertida a números fuzzy, de tal modo que por cada variable lingüística pueden ser generados cuatro números fuzzy (Malczewski 1999:133). En esta investigación se usó el conjunto de números fuzzy que asociara a la variable lingüística "Muy bueno", el valor más alto de membresía, es decir, el número fuzzy 1

y a la variable lingüística "Muy malo", el número fuzzy 0.2. Lo anterior provocó que al realizar la estandarización (asignando valores entre 0 y 255), no se encontraran píxeles con el valor 0, por lo que la aplicación de un procedimiento de "estiramiento", fue necesaria. A pesar del problema anteriormente planteado, la elección del conjunto de números fuzzy usado, condujo a resultados satisfactorios en términos de la obtención de los mapas estandarizados. Aunque sería conveniente para futuros estudios, probar las otras posibilidades en la elección del conjunto de números fuzzy a usar

Asimismo, en los mapas categóricos se observó menor continuidad espacial, ya que provenían de pocas (cinco) categorías, por lo que mostraron poca variabilidad. Además gran parte de los píxeles en dichos mapas pertenecían a una o dos de las categorías consideradas, como el caso de textura de suelo. También se observó que cuando dichos mapas categóricos fueron valorados como importantes en la estimación de pesos de criterios, como el caso de la papa, se produjo un mapa final de aptitud con mayor generalización, debido a la poca variabilidad presente en dichos mapas categóricos.

Además, es menester mencionar que sería muy conveniente contar con información más refinada acerca de los requerimientos ambientales de los cultivos, ya que esta información es muy importante para definir, los niveles de membresía completa o no membresía, en la estandarización con el enfoque fuzzy. Para algunos cultivos existe información general, pero generada en otras condiciones diferentes a las de nuestro país. Para otros cultivos, como el caso de avena y haba, existe muy poca información tanto a nivel nacional como internacional. Tal carencia dificultó la implementación del método de estandarización con el enfoque fuzzy, ya que el refinamiento de los requerimientos ambientales, fue muy diferente a la variabilidad espacial existente en el área de estudio.

En el contexto anterior, el enfoque fuzzy utilizado en el presente trabajo fue muy útil y conveniente, ya que nos permitió estandarizar tanto mapas continuos como mapas categóricos, a pesar de la poca información sobre los rangos óptimos y no óptimos en los requerimientos ambientales de los cultivos. De esta forma, el método empleado para la estandarización de los mapas factor, permitió obtener resultados más realistas ya que dichos mapas mostraron el gradiente natural que se observa en condiciones del mundo real, lo cual se vio reflejado en los mapas finales de áreas adecuadas por cultivo.

Por otra parte, la estimación de los pesos de los criterios es un aspecto crítico en cualquier evaluación multicriterio espacial, el propósito de dicha estimación es expresar la importancia relativa de cada criterio con respecto a los otros (Malczewski 1999). Los pesos pueden ser estimados a través de entrevistas, análisis comparativos o experimentos estadísticos (Starr y Zeleny 1977)

Existen varios métodos para realizar este proceso de estimación de pesos de criterios como son: métodos de posición o rango, métodos de calificación o clase, método de matriz de comparación pareada y método de análisis de ventajas (Malczewski 1999). No existe un método generalmente aceptado para la determinación de los pesos de criterios, por lo que se considera a este proceso como un aspecto que puede crear controversias acerca de la asignación de dichos pesos (Barredo 1996), ya que, los pesos de los criterios representan la opinión subjetiva (pero no menos válida) de uno o mas expertos o informantes locales (Eastman 1999b)

El método de matriz de comparación pareada (MCP) usado en esta investigación, fue desarrollado por Saaty (1980) en el contexto del proceso de análisis jerárquico y es uno de los más prometedores (Eastman et al 1995) Este método involucra comparaciones pareadas para generar una matriz, la cual toma como entrada las comparaciones pareadas y produce los pesos relativos como salida mediante la generación de un eigenvector normalizado, en el cual la suma de todos los pesos es siempre igual a 1

De acuerdo con Malczewski (1999), algunas de las ventajas del MCP son: su facilidad de uso, tiene una alta confiabilidad, es muy preciso, existe software para su uso y además se encuentra implementado bajo ambiente de SIG Además los resultados del MCP son robustos, porque se consideran las preferencias de los usuarios (Qureshi et al 1999) Este método ha sido empleado en diversas aplicaciones, Banai (1993), Pereira y Duckstein (1993), Peterson et al. (1994), Malczewski (1996), Alphonse (1997), Schmoldt y Peterson (1997), Wu (1998), Qureshi et al (1999), Tiwari et al (1999), Díaz-Salgado y López-Blanco (2000), Schmoldt et al (2001), en las cuales se ha probado la utilidad del MCP, para estimar pesos de criterios

En esta investigación el método de MCP fue factible de implementar a través de las entrevistas con los expertos de cultivos, proporcionando una forma confiable y consistente para evaluar la importancia relativa de los criterios usados en la EMC. La entrevista con expertos para la estimación de pesos ya ha sido utilizada en otros trabajos (Janssen y Rietveld 1990).

Dado que los expertos de cultivo no estaban familiarizados con el método de MCP, fue necesario explicarles detalladamente tanto el propósito general de la MCP, como su mecánica de llenado Asimismo se puso especial atención para asegurarse de la consistencia en las valoraciones otorgadas a los criterios por parte de los expertos. Como ya se mencionó, lo anterior permitió obtener resultados confiables en cuanto a la estimación de los pesos de criterios se refiere. El método de MCP fue usado porque también proporciona una medida cuantitativa de la consistencia en las valoraciones otorgadas a los criterios, a través del cálculo de un Índice de Consistencia (Saaty 1980)

Por otra parte, en la EMC bajo ambiente de SIG, hay dos enfoques principales; a) en el primero todos los criterios son convertidos en declaraciones Booleanos (es decir, declaraciones lógicas de cierto/falso) para la evaluación en consideración, en muchas ocasiones estas variables Booleanas pueden servir como restricciones, puesto que ellas sirven para delinear las áreas que son adecuadas para una evaluación en particular. Estas restricciones son entonces combinadas mediante algunos operadores de intersección (AND) o unión (OR), el enfoque descrito domina en los SIG con sistemas vectoriales, pero también es ampliamente usado en los sistemas raster (Eastman 1999b). Las limitaciones de este enfoque ya han sido resumidas en la sección 1.2.4 y diversos autores las han señalado (Janssen y Rietveld 1990; Carver 1991). En el otro enfoque, que es el más común para la EMC, criterios cuantitativos son evaluados como variables completamente continuas, tales criterios son llamados factores y expresan el grado de aptitud para la evaluación en consideración. Así, los factores estandarizados, son combinados en una sumatoria lineal jerarquizada (SLJ) (Eastman 1999b). Este último enfoque fue el usado en la presente investigación.

Asimismo, la elección del procedimiento de EMC a usar, depende de la naturaleza del problema a estudiar. En un SIG raster, cada celda individual es considerada como una alternativa a escoger y por lo tanto es candidata para la evaluación. El número de celdas en la mayoría de los mapas raster, hace impráctico el uso de técnicas intensivas de análisis multicriterio basadas en la comparación par con par de todas las alternativas (ej. el análisis de concordancia).

En este contexto se puede pensar que el procedimiento de SLJ, es una técnica de multicriterio útil y práctica para un SIG raster (Jankowski 1995). Además, el procedimiento de SLJ, es uno de los más extendidos y usados para la EMC (Barredo 1996), y es común encontrarlo en el software de SIG (Eastman et al. 1995). El procedimiento de SLJ está clasificado dentro de las técnicas compensatorias, las cuales están basadas en el hecho de que una alta valoración de una alternativa (un pixel o celda en el modelo raster) alcanzada para uno o más criterios, se puede compensar con el hecho de una baja valoración de la misma alternativa para otros criterios (Jankowski 1995).

La característica compensatoria de la técnica de EMC usada, hace que sea un procedimiento robusto, ya que para generar el nivel de aptitud de cada celda (pixel), toma en cuenta la valoración de cada alternativa, bajo distintas valoraciones de los criterios. En este contexto, por las características del procedimiento y además por el hecho de su implementación en el software de SIG, el procedimiento de SLJ empleado en este trabajo, fue útil para combinar los diferentes factores estandarizados bajo

evaluación y producir los mapas de áreas adecuados para cultivos. Además proporcionó una forma práctica y robusta para obtener resultados confiables.

5.4 Conclusiones Generales

La depuración, preparación y revisión de la información de clima, suelo y relieve, permitió obtener una base de datos adecuadamente preparada, para procesarla con el propósito de obtener los mapas temáticos respectivos.

Esta investigación confirma que la metodología empleada fue adecuada para integrar bases de datos de clima, suelo y relieve con diferente resolución espacial y temporal en el contexto de SIG. De esta manera, mapas temáticos interpolados fueron generados, tomando en cuenta características específicas de los cultivos como: ciclo de crecimiento y etapas fenológicas.

La estimación de la exactitud de los datos de altitud proporcionó una aproximación de la confiabilidad de esta información, la cual fue adecuada para asegurar que los mapas derivados de la altitud fueran confiables para usarlos en la EMC. Además el análisis geoestadístico de las variables de clima y suelo, proporcionó un panorama general de la variabilidad espacial de dicha información. Estos resultados pueden ser usados para futuros estudios sobre dichas variables en el área de estudio.

La información disponible de Landsat fue crucial para obtener de forma relativamente rápida y exacta el mapa de uso/cobertura actual del suelo. El procesamiento de la imagen mediante la clasificación supervisada usando el algoritmo de máxima verosimilitud, resultó en que un porcentaje aceptable de los píxeles considerados fueron correctamente clasificados.

Este trabajo ha aportado un enfoque diferente de realizar la evaluación del medio físico para identificar áreas adecuadas para cultivos, tomando muy en cuenta el acervo agronómico y la experiencia local, tanto para identificar las variables relevantes para el desarrollo óptimo de los cultivos, como para valorar la importancia relativa de cada criterio mediante la matriz de comparación pareada. Asimismo, el proceso de estimación de pesos de criterios generó información valiosa, la cual puede ser usada en futuros estudios sobre los cultivos aquí estudiados.

Asimismo el análisis conjunto del conocimiento agronómico de los cultivos reportado en la bibliografía revisada y la experiencia local fue muy importante porque permitió fortalecer la decisión sobre las variables del medio físico que debían entrar al proceso de EMC. Así, el conocimiento experto ayudó a obtener resultados consistentes y confiables.

Para este tipo de estudios, sería altamente deseable contar con más y mejor información sobre los requerimientos ambientales de los cultivos, incluso a nivel de variedades de cultivos, lo cual aunado a bases de datos que representen adecuadamente la variabilidad espacial presente, ayudaría a lograr mayor detalle en la identificación de áreas adecuadas.

Es posible que usando las bases de datos y los criterios de evaluación adecuados, así como la información bibliográfica respectiva y el conocimiento experto, se puede llevar a cabo la EMC para identificar áreas adecuadas en otras regiones del país y para otros cultivos.

Además, el método empleado fue flexible ya que permitió estudiar cultivos con diferentes características, tales como su ciclo de crecimiento, es decir anuales o perennes. También fue posible considerar cultivos actualmente sembrados y cultivos de alternativa como el caso de amaranto y nopal, éste último para ser usado como una alternativa de conservación de suelo en áreas degradadas.

En esta investigación la definición de los criterios fue adecuada, ya que a partir de la revisión bibliográfica y el conocimiento experto, se definieron aquellas variables relevantes para la identificación de las áreas adecuadas. Además, dadas las características del medio físico del área de estudio, el número de criterios usado fue el adecuado, ya que por un lado permitió una definición lo más cercana posible al problema y por otro lado se evitó una posible sobresimplificación del problema, al haberse considerado pocos criterios.

La EMC realizada en esta investigación, cumplió con la condición de que los mapas factor debían de ser no-redundantes (independientes), por lo que el conjunto de criterios usados fueron los apropiados.

El enfoque de función de membresía fuzzy fue útil para generar los mapas factor estandarizados, ya que los mapas de áreas adecuadas por cultivo, mostraron resultados más realistas al tomar en cuenta el gradiente que existe en condiciones naturales.

En este trabajo se demostró que la EMC de las variables de clima, suelo y relieve en el contexto de SIG, es un enfoque útil para identificar áreas adecuadas de cultivos. Sin embargo las técnicas de EMC y SIG, son simplemente herramientas, las cuales proporcionan el medio para alcanzar objetivos específicos. Sin el conocimiento acerca del objeto de estudio (cultivos en este caso) y sin una base de datos apropiada, tales herramientas serían poco útiles.

Además, el proceso de realimentación de la EMC sirvió, por un lado, para ajustar los resultados de acuerdo al conocimiento experto local y por otro lado, permitió validar los resultados obtenidos. En ambos casos este proceso sirvió para afinar los resultados.

Consideramos que esta investigación proporciona a los productores locales información general para el manejo de sus unidades de producción en cuanto a la elección del patrón de cultivos. Sabemos que la decisión de los productores acerca del patrón de cultivos, puede estar basada no solo en la información proporcionada por este tipo de estudios, sino también en otros aspectos tales como: apoyos para la producción (tanto estatales como federales), comercialización, nivel económico y tecnológico, además de las costumbres y aspectos culturales, los cuales son muy importantes.

Por otra parte, los resultados obtenidos pueden ser útiles para el establecimiento de programas estatales o federales para el apoyo a la producción de cultivos, así como para programas de apoyo a la generación y transferencia de tecnología. Adicionalmente los resultados de este estudio pueden servir a otros investigadores para diversos estudios.

En esta investigación hemos aplicado el enfoque de EMC para identificar áreas con propósitos específicos en un contexto de SIG. Este enfoque ha sido usado en algunos otros países generalmente para aplicaciones no agrícolas. En México este enfoque es un nuevo y original aporte para aplicaciones en la agricultura, puesto que no ha sido usado para identificar áreas adecuadas de cultivos. La combinación de EMC y SIG fue útil para evaluar múltiples criterios y conocimiento experto en una forma consistente con el propósito de obtener mapas de áreas adecuadas y bases de datos tabulares. Por lo tanto hemos mostrado que tal combinación tiene potencial para proporcionar un enfoque racional, objetivo y confiable para la toma de decisiones en estudios de este tipo en México.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahamed N.T.R., Rao G.K., and Murthy J.S.R. 2000 GIS-based fuzzy membership model for crop-land suitability analysis. *Agricultural Systems* 63:75-95
- Allan J.A. 1990 Sensors, Platforms and Applications; Acquiring and managing Remotely Sensed Data Pp 3-17 In: *Applications of Remote Sensing in Agriculture*. Eds Steven M.D., and Clark J.A. Butterworths. The University of Nottingham Great Britain University Press
- Alphonse C.B. 1997 Application of the Analytic Hierarchy Process in agriculture in developing countries *Agricultural Systems* 53:97-112
- Altman D. 1994 Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis *International Journal of Geographical Information Systems* 8(3):271-289.
- Amissah A.A., Mougnot B., and Loireau M. 2000 Assessing farmland dynamics and land degradation on Sahelian landscapes using remotely sensed and socioeconomic data *International Journal of Geographical Information Science* 14(6):583-599
- Armstrong M. 1998 *Basic linear geostatistics* Springer, Germany 153 pp
- Aragón P.H.L. 1995 Factibilidades agrícolas y forestales en la República Mexicana. Trillas México D.F. 177 pp.
- Aronoff S. 1989. What is a Geographic Information System? *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Pp 31-45 WDL Publications Canadá. 294 pp.
- Baban S.M.J., and Yusof K.W. 2001. Mapping land use/cover distribution on a mountains tropical island using remote sensing and GIS *International Journal of Remote Sensing* 22(10):1909-1918
- Baca D. J., Díaz P. F. J., y Amador Alfredo. 1992 Regionalización agrícola de las huastecas: agroambientes y zonas agrícolas. *Revista de Geografía Agrícola* (17):7-65. UACH Dirección de Centros Regionales
- Banai R. 1993. Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the analytic hierarchy process. *International Journal of Geographical Information Systems* 7(4):315-329.
- Barrales D. J.S., García Reyes J., y Meztiza H. C. 1991 Influencia de la precipitación pluvial sobre el desarrollo del Amaranto. En *Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto* Página 52 Oaxtepec, Morelos, México Septiembre 22-27
- Barredo C.J.I. 1996 *Sistema de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* Ra-Ma Editorial. Madrid. España 259 pp
- Bernhardsen T. 1999 Choosing a GIS Pp 589-600. In: *Geographical Information Systems. Principles and Technical Issues*. Eds Longley A.P., Goodchild M.F., Maguire D.J., and Rhind D.W. John Wiley & Sons, Inc U.S.A. 1101 pp
- Bojórquez T.L.A., Díaz M. S., and Ezcurra E. 2001 GIS-based approach for participatory decision making and land suitability assessment *International Journal of Geographical Information Science* 15(2):129-151.
- Borrego E.F., y Burgos V. N. 1986. *El Nopal*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México 210 pp.
- Bosque S.J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp S.A. Madrid España 443 pp
- Bouwkamp C. H. 1985. *Sweet potato products: A natural resources for the tropics*. Press Boca Raton, Florida, USA 271 pp.
- Bronsveld K., Huizing H., and Omakupt M. 1994. Improving land evaluation and land use planning *ITC Journal* (3):359-365
- Brown J.M. 2001 *Geographical Information Systems: An introduction for students*. Pp. 94-113, Chapter 7. In: *GIS: A sourcebook for schools* Ed Green D. Taylor & Francis N.Y. USA. 228 pp

- Burrough P A 1991. Soil Information Systems Pp 153-169 In: Geographical Information Systems. Principles and Applications Edited by Maguire D.J , Goodchild M F and Rhind D W Longman Scientific & Technical. Vol 1, 649 and Vol 2, 447 UK
- Burrough P A 1996 Natural objects with indeterminate boundaries Pp 3-28. In: Geographic objects with indeterminate boundaries Eds P.A Burrough and A U Frank. Talyor & Francis London 345 pp
- Burrough P. A, and McDonnell R.A. 1998 Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press U S A 333 pp
- Bydekerke L , Van Ranst E , Vanmechelen L , and Groenemans R 1998 Land suitability assesment for cherimoya in southern Ecuador using expert knowledge and GIS Agriculture, Ecosystems and Environment (69):89-98.
- Caldiz D O , Gaspari J F., Haverkort A. J , and Struik C. P 2001. Agro-ecological zoning and potential yield of single or double cropping of potato in Argentina Agricultural and Forest Meteorology (109):311-320.
- Campbell J B. 1996. Introduction to Remote Sensing Second edition, The Guilford Press 622 pp
- Carver S. 1991 Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems 5(3):321-339.
- Ceballos-Silva A and López-Blanco J. En prensa. Delineation of suitable areas for crops using a Multicriteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico Agricultural Systems.
- Ceballos-Silva A y López-Blanco J. En prensa. Toma de decisiones en planeación territorial: Evaluación multicriterio en la identificación de áreas adecuadas para cultivos en el DDR Toluca. Revista Quivera UAEM.
- Ceballos-Silva A and López-Blanco J En prensa. Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for Oat in Cental Mexico. Agriculture, Ecosystems & Environment
- Cervantes S.J.M. 1988. El amaranto como alimento para animales. Pp 55-60. En: Investigaciones recientes sobre Amaranto. Coordinadora: Teresa Reyna Trujillo. Instituto de Geografía UNAM México. 101 pp
- Chappell A , Seaquist J W , and Eklundh L. 2001. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geostatistics. International Journal of Remote Sensing 22(6):1067-1080.
- Chilés J P , y Delfiner P 1999 Geostatistics. Modeling spatial uncertainty Wiley Series in Probability and Statistics A Wiley-Interscience Publication 695 pp
- Christiansen G. J 1967 El cultivo de la papa en el Perú. Editorial Jurídica S A. Lima Perú. 351 pp
- CNA 2000. El agua en México: retos y avances. Comisión Nacional del Agua SEMARNAP 161 pp.
- Coffman F A , and Frey K J. 1961 Influence of Climate and Physiologic Factors on Growth in Oats Pp 420-464 In: Oats and Oat Improvement Ed Coffman F. A Publisher Madison, Wisconsin USA
- Corbett J D 1996 Dynamic crop environment classification using interpolated climate surfaces. Pp 117-122 In: Goodchild, M F. et al (Eds.), GIS and environmental modeling: progress research issues GIS World Book, Fort Collins, Colorado U S A 486 pp
- Corbett J D , and Carter S E 1996 Using GIS to enhance agricultural planning: the example of inter-seasonal rainfall variability in Zimbabwe Transactions in GIS (1):207-218
- Cressie N. 1993. Geostatistics: A Tool for Environmental Modelers Pp. 414-421. In: Environmental Modeling with GIS Ed M F. Goodchild, B D. Parks and L T. Steyaert. Oxford University Press New York, U.S.A 488 pp
- Davis B.E 1996 A GIS a visual approach Onword Press. USA 374 pp.
- Del Valle C M , y Solleiro R.J.L 1994. Tecnología y desarrollo agrícola en México, en busca de la competitividad Pp 253-269 En: Apertura económica y perspectivas del sector agropecuario

- mexicano hacia el año 2000. Coordinadores: Romero P E., Torres T F., Del Valle C M Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México 488 pp.
- Del Valle C.M 1995. La innovación tecnológica en la modernización de la agricultura mexicana Pp 319-331 En: La modernización del campo y la globalización económica. Compiladores y Coordinadores: Peña T E y Romero P. E Colección: La estructura económica y social de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM México 342 pp
- DeMers M N 1997 Fundamentals of geographic information systems John Wiley and Sons, Inc USA
- De Zuviría M , and Valenzuela R C 1994 Mapping land suitability for coffee with ILWIS ITC Journal (3):301-307
- Díaz Ávalos C 2001-2002 Investigador del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas UNAM Comunicación personal
- Díaz H B.M., Plascencia V H , Arteaga R. R., y Vázquez P. M.A. 2000 Estudio y zonificación agroclimáticos en la región Los Altos de Chiapas, México Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. México (42): 7-27.
- Díaz S J , y López Blanco.J 2000 Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM México (41): 61-80
- Doorenbos J , y Kassam H A 1979 Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos Estudio de la FAO Riego y Drenaje 33. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 212 pp
- Doraiswamy P C , Pasteris P A , Jones K C., Motha R P , and Nejedlik P 2000 Techniques for methods of collection, database management and distribution of agrometeorological data Agricultural and Forest Meteorology (103):83-97
- Duch G.J, Bayona C A , Labra L C , y Gama V A 1981 Sistema de evaluación de tierras para la determinación del uso potencial agropecuario y forestal en México Revista de Geografía Agrícola UACH Dirección de Centros Regionales (1):21-46
- Eastman J R , Jin W , Kyem. A K P , and Toledano J 1995 Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 61(5):539-547.
- Eastman J.R. 1997 IDRISI for Windows User's Guide. Version 2.0 Clark University, Worcester, Massachusetts USA 178 pp
- Eastman J R 1999a. Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing, Volume 2 Clark Labs Clark University Worcester, MA USA. 169 pp
- Eastman J.R 1999b. Multi-criteria evaluation and GIS Pp 493-502 In: Geographical Informations Systems. Principles and Technical Issues Eds Longley A P., Goodchild M F , Maguire D J , and Rhind D.W John Wiley & Sons, Inc. U S A. 1101 pp
- Easton A. 1973 One of a kind decision involving weighted multiple objectives and disparate alternatives Pp 657-667. In: J. Cochrane , and M. Zeleny (Eds), Multicriteria Decision Making University of South Carolina Press. Columbia, South Carolina USA, First edition
- Espitia R. E 1986 Situación actual y problemática del cultivo del Amaranto en México Pp 101-109 En: El amaranto *Amarantus spp*, su cultivo y aprovechamiento Memoria Primer Seminario Nacional del Amaranto. Compiladores: Antonio Trinidad Santos, Federico Gómez Lorence y Guadalupe Suarez Ramos. Chapingo, México. 577 pp
- Espitia R E 1991 Revancha: Variedad mejorada de Amaranto para los Valles Altos de México Pp. 64 En: Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto Oaxtepec, Morelos, México. Septiembre 22-27.

- Estrada L. A., y Sahagún C. S. 2001 Guía para cultivar amaranto en el Distrito Federal. Folleto para productores No. 1. Campo Experimental Valle de México. INIFAP SAGARPA México.
- Fabiani L. 1967. La Patata Editorial Aedos, Barcelona, España. 147 pp
- FAO 1985. Directivas: Evaluación de tierras para la agricultura de secano. Boletín de suelos de la FAO 52 Roma 228 pp
- FAO 1998. Ecocrop I & 2 The crop environmental requirements database. Land and water digital media, Series No. 4. December
- Félix V. O. J. 1984. Efecto de algunos factores de clima y manejo sobre el rendimiento y la respuesta del trigo, maíz y algodón a la fertilización en el Valle del Yaqui Sonora. Tesis de Maestría. C.P. Especialidad en Edafología. 305 pp.
- Fernández N. R., and Rusinkiewicz M. 1993. A conceptual design of a soil database for a geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems* 7(6):525-539.
- Foody G.M., and Hill R.A. 1996. Classification of tropical forest classes from Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing* 17(12):2353-2367
- Fotheringham S.A. 2000. Geocomputation analysis and modern spatial data. Pp. 33-48, Chapter 2. In: *Geo Computation*. Eds. Openshaw S., and Abraham J.R. Taylor & Francis N.Y. USA. 413 pp
- Foth H.D. 1987. Fundamentos de la ciencia del suelo. Editorial CECSA México. 433 pp
- Fulong W. 1998. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science* 12(1):63-82
- García E. 1989. Apuntes de Climatología. Sexta Edición. México D.F. 155 pp
- García N. H., López Blanco. J., Moreno S. R., Villers R.M.L., y García D.R., 2000. Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el Distrito de Desarrollo Rural 004, Celaya, Guanajuato. *Terra* 18(1):11-25.
- García M.C., and Alvarez R. 1994. TM digital processing of a tropical forest region in southeastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing* 15(8):1611-1632
- Getis A. 1999. Spatial statistic. Pp. 239-251. In: *Geographical Information Systems Principles and Technical Issues*. Eds. Longley A.P., Goodchild M.F., Maguire D.J., and Rhind D.W. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 580 pp
- Golden Software. 1996. Surfer (Win32) Versión 6.04. Surface Mapping System. Golden, Software Inc. Colorado USA
- González M.J.R. 1995. Factores que afectan la productividad de las plantaciones comerciales de nopal tunero. Pp. 222-227. En: *Conocimiento y aprovechamiento del Nopal*. 6º Congreso Nacional y 4º Congreso Internacional. 6-10 Noviembre de 1995. Compiladores: Eulogio Pimienta Barrios, Cecilia Neri Luna, Alejandro Muñoz Urias y Francisco M. Huerta Martínez. Zapopan, Jalisco, México. 308 pp.
- Gómez L.F. 1986. Cultivo del Amaranto en México. Pp. 90-100. En: *El amaranto Amaranthus spp, su cultivo y aprovechamiento*. Memoria Primer Seminario Nacional del Amaranto. Compiladores: Antonio Trinidad Santos, Federico Gómez Lorence y Guadalupe Suarez Ramos. Chapingo, México. 577 pp
- Goodchild M.F. 1993. Data models and Data Quality: Problems and Prospects. Pp. 94-103. In: *Environmental Modeling with GIS*. Ed. M.F. Goodchild, B.D. Parks and L.T. Steyaert. Oxford University Press. New York, U.S.A. 488 pp.
- Granados R.R.G. 2000. Regionalización agroclimática en la mesa central de Guanajuato. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. División de Estudios de Posgrado. Colegio de Geografía UNAM. 267 pp
- Grimaldi A. 1969. Agronomía. Editorial Aedos Barcelona España. 466 pp

- Gupta A P , Harboe R , and Tabucanon M.T 2000. Fuzzy multiple-criteria decision making for crop area planning in Narmada river basin *Agricultural Systems* (63):1-18.
- Hallet S.H , Jones R.J.A , and Keay C.A 1996 Environmental information systems development for planning sustainable land use *International Journal of Geographical Information Systems* 10(1):47-64
- Heywood I , Oliver J , and Tomlinson S 1995. Building an exploratory multi-criteria modeling environment for spatial decision support Pp 127-136 In: *Innovations in GIS 2*. Ed Fisher P. Taylor & Francis. UK 257 pp.
- IIIGEC 1993 *Atlas General del Estado de México* Instituto de Información e Investigación Geografía Estadística y Catastro, Secretaría de Finanzas, Gobierno del Estado de México, México
- INEGI 1997 *El maíz en el estado de México*. Aguascalientes, México 47 pp
- INEGI Varias fechas *Mapas de edafología, escala 1:50,000*. E14A27, E14A38, E14A49, E14A37, E14A58, E14A47, E14A48, E14A28, E14A39 México
- INEGI 2001 *Síntesis de Información Geográfica del Estado de México* Aguascalientes, México 139 pp
- INIFAP 1994. *Informe Anual de Actividades Programa Potencial Productivo Campo Experimental Toluca, Estado de México, México*
- ITC 1998 *ILWIS The Integrated Land and Water Information System, User's Manual*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, Netherlands 511 pp
- Jankowski P 1995 Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods *International Journal of Geographical Information Systems* 9(3):251-273
- Jankowski P , Andrienko N , and Andrienko G. 2001 Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. *International Journal of Geographical Information Science* 15(2):101-127.
- Jankowski P , and Nyerges T 2001 *Geographic Information Systems for Group Decision Making Towards a participatory, geographic information science* Taylor & Francis N Y USA 273 pp
- Janssen R , and Rietved, P , 1990 *Multicriteria Analysis and GIS: An application to Agriculture Landuse in The Netherlands* Pp 129-138 In: H, Scholten , J, Stilwell (Eds), *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning* Kluwer, Dordrecht, The Netherlands 260 pp.
- Joerin F , Thériault M , and Musy A 2001 Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science* 15(2):155-174
- Jones C 1997 *Geographical Information Systems and Computer Cartography*. Longman England. 319 pp
- Jugenheimer R W 1970 *Corn Improvement, Seed Production and Uses* John Wiley & Sons 670 pp
- Klir G J , and Yuan B 1995. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications* Upper Saddle River. N J Prentice Hall.
- Kutter A , Nachtergaele F O , and Verheye W H. 1997. The new FAO approach to land use planning and management, and its application in Sierra Leone. *ITC Journal* (3-4):278-283
- Lai S. K , and Hopkins L D 1995 Can decision makers express multiattribute preferences using AHP and MUT? An experiment. *Environment and Planning B* 22(1): 21-34.
- Lara R. V. 1993 *Respuesta de la papa (Solanum tuberosum L) a la variación del régimen de humedad en el suelo en tres etapas fenológicas del cultivo y aspectos fisiotécnicos* Tesis maestría C.P. Centro de Hidrociencias Montecillo. México. 157 pp.
- Lillesand T M , and Kiefer R.W. 1994 *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons Inc, New York, USA. 750 pp.
- Llanos C M 1984 *El maíz. Su cultivo y aprovechamiento*. Ediciones Mundi-Prensa. España 317 pp
- Longley P.A , Goodchild M.F. , Maguire D.J , and Rhind D.W 1999 Introduction Pp 1-20 In: *Geographical Information Systems*. Vol 1 Second edition. John Wiley & Sons Inc. N.Y USA 580 pp.

- López Blanco J 1998 Sistemas de información geográfica (SIG): conceptos, definiciones y contexto metodológico que involucra su uso. *Quivera* 1(0):27-38 Julio.
- López Blanco J, and Zambrano L. 2002 Characterization of small shallow ponds with color video imagery in Central Mexico. *Hydrobiologia* (467):177-185
- López de Juambelz R, y López V. L 1991 Factores edafológicos extremos donde se desarrolla *Amaranthus hybridus* L. Pp 48 En Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto Oaxtepec, Morelos, México. Septiembre 22-27
- López G M J, y Caselles V 1991 Introducción a la teledetección Pp 19-49 En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales Recursos renovables Agricultura Curso de posgrado Coordinadores: S Gandia y J Melia Universitat de Valencia, Estudi General Departament de Termodinàmica Unidad de Investigación de Teledetección Valencia 25 Febrero- 9 Marzo, España
- Maguire, D J, Goodchild, M F, and Rhind, D W 1991. In: Geographical Information Systems Principles and Applications Edited by Maguire D J, Goodchild M F and Rhind D W Longman Scientific & Technical Vol 1, 649 and Vol 2, 447 UK
- Malczewski J 1996 A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making *International Journal of Geographical Information Systems* 10(8):955-971
- Malczewski J, Moreno-Sánchez R, Bojorquez-Tapia L A., and Ongay-Delhumeau E 1997. Multicriteria group decision-making model for environmental conflict analysis in the Cape Region, Mexico *Journal of Environmental Planning and Management* 40(3): 349-374
- Malczewski J 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons USA 392 pp
- Martínez González C 2000. Investigador del Campo Experimental Tecamachalco INIFAP SAGARPA Comunicación personal
- Mas J F 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques *International Journal of Remote Sensing* 20(1):139-152.
- Massam B. H. 1980 Spatial search applications to planning problems in the public sector York University, Ontario Canada Urban and Regional Planning Series Vol. 23 Pergamon Press
- Medina M.E., Aguilera N H, y Domínguez R 1995 Estudios de suelos cultivados con nopal en Milpa Alta D.F Pp. 83-89 En: Conocimiento y aprovechamiento del Nopal 6º Congreso Nacional y 4º Congreso Internacional. 6-10 Noviembre. Compiladores: Eulogio Pimienta Barrios, Cecilia Neri Luna, Alejandro Muñoz Urias y Francisco M. Huerta Martínez. Zapopan, Jalisco, México. 308 pp
- Merolla S., Armesto G, and Calvanese G. 1994 A GIS application for assessing agricultural land *ITC Journal* (3):264-269
- Midmore D J 1988 Fisiología de la planta de papa bajo condiciones de clima cálido. Guía de investigación CIP 24 Research guide CIP (Centro Internacional de la Papa) 15 pp
- Montaldo A 1984 Cultivo y mejoramiento de la papa. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura Editorial Texto Ltda Sn José, Costa Rica. 676 pp
- Ngowi J., and Stocking M 1989 Assessing land suitability and yield potential for coconuts in Tanzania *Applied Geography* (9):21-33
- Nobel P S. 1995. Avances recientes en la ecofisiología de *Opuntia ficus-indica* y otras cactáceas Pp 77-83. En: Conocimiento y aprovechamiento del Nopal. 6º Congreso Nacional y 4º Congreso Internacional 6-10 Noviembre de 1995. Compiladores: Eulogio Pimienta Barrios, Cecilia Neri Luna, Alejandro Muñoz Urias y Francisco M. Huerta Martínez. Zapopan, Jalisco, México 308 pp
- OCDE 1997. Examen de las políticas agrícolas de México Políticas nacionales y comercio agrícola Paris, Francia 234 pp
- Oliver G R., Reyna T T, Taboada S M., y Cruz O.A. 1991 Algunos aspectos edáficos del cultivo del amaranto en Temoac, Morelos, México Pp. 68 En Memoria del Primer Congreso Internacional del Amaranto Oaxtepec, Morelos, México Septiembre 22-27

- Oliver M.A. 1996 Geostatistics, rare disease and the environment Pp 67-85 In: Spatial Analytical Perspectives on GIS Eds: Fischer M., Scholten H.J., and Unwin D. GISDATA IV Taylor & Francis Ltd. Great Britain. 256 pp.
- Olson R. A., and Sander D. H. 1988. Corn Production Pp. 639-650. In: Corn and Corn Improvement. Eds Sprague G.F, and Dudley J. W. 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, Madison, Wisconsin. USA.
- Ora S. 1977. Potatoes: Production, Storing, Processing The Avi Publishing Company Inc. West Port Connecticut, USA 776 pp.
- Ortiz S. C.A. 1984 Evaluación de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 39 pp
- Ortiz M. J., Formaggio A.R., and Epiphanyo J.C.N. 1997 Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS and historical database International Journal of Remote Sensing 18(1):95-105
- Parker D.H. 1988 The Unique Qualities of a Geographic Information Systems: A Commentary Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54(11):1547-1549.
- Pereira M. C. J., and Duckstein L. 1993. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. International Journal of Geographical Information Systems 7(5):407-424
- Peterson D. L., Silsbee D. G., and Schmoltd D.L. 1994 A case study of resources management planning with multiple objectives and projects Management Environment 18(5):729-742
- Qureshi M.E., Harrison S.R., and Wegener M.K. 1999 Validation of multicriteria analysis models Agricultural Systems (62):105-116
- Ramírez-García P., López Blanco J., and Ocaña D. 1998 Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery Forest Ecology and Management 105:217-229
- Reyna T.T. 1986. Requerimientos climáticos para el cultivo de amaranto (*Amaranthus spp*) en México Pp 81-89 En: El amaranto. *Amaranthus spp*, su cultivo y aprovechamiento. Memoria Primer Seminario Nacional del Amaranto. Compiladores: Antonio Trinidad Santos, Federico Gómez Lorence y Guadalupe Suarez Ramos Chapingo. México 577 pp
- Reyna T.T., y Flores E.M.A. 1987. Zonas climáticas potencialmente útiles para el cultivo del Amaranto (*Amaranthus spp*) en el estado de Guanajuato Pp 30-42. En: Coloquio Nacional del Amaranto Memorias Gobierno del estado de Querétaro Instituto de Desarrollo Estatal para la Accion Social (IDEAS). Querétaro, México 312 pp.
- Reyna T.T., y Granados R.R. 1987 Estimación climática en Querétaro para la planeación del cultivo del Amaranto (*Amaranthus spp*). Pp. 43-52 En: Coloquio Nacional del Amaranto. Memorias Gobierno del estado de Querétaro. Instituto de Desarrollo Estatal para la Accion Social (IDEAS). Querétaro México 312 pp.
- Reyna T.T., y Flores E.M.A. 1988. Regionalización potencial para el cultivo de amaranto en Guanajuato, México. Pp. 17-21. En: Investigaciones recientes sobre Amaranto Coordinadora: Teresa Reyna Trujillo Instituto de Geografía UNAM México 101 pp.
- Reyna T.T., y Carmona J.E. 1991 Características edafoclimáticas y el cultivo de 32 tipos de *Amaranthus* en Chalco, Estado de México. Pp 34. En Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto. Oaxtepec, Morelos. México Septiembre 22-27
- Reyna T.T., Taboada S.M., y Granjeno C.A. 1991 Distribución y clima del género *Amaranthus* en Morelos, México. Pp. 53. En Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto. Oaxtepec, Morelos. México. Septiembre 22-27

- Reyna, T.T., y Carmona J.E. 1994. Caracterización pluviométrica y distribución del *Amaranthus* spp en México. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. México (29): 67-90
- Reyna T.T., Fernández J.M., López D.T., y Hernández A.L. 1997. Zonificación pluviométrica para el cultivo del *Amaranthus* spp en la provincia del Pinar del Río e Isla de la Juventud, Cuba. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM México (35):135-152
- Ritter O.W., Guzmán R.S.A., y Estrada B.A. 1999. Un método gráfico para la regionalización agroecológica de recursos naturales. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM México (38): 57-68
- Robinson V.B. 1988. Some implications of fuzzy set theory applied to geographic databases. Computer and Geosciences 16(7):857-872.
- Rodríguez C.E. 1987. Aclimatación y observación de Amarantho (*Amaranthus hypochondriacus* L.) en los municipios de Tuxtla Chico y Huehuetán, Chiapas. Pp 11-17. En: Coloquio Nacional del Amarantho. Memorias Gobierno del estado de Querétaro. Instituto de Desarrollo Estatal para la Acción Social (IDEAS). Querétaro, México. 312 pp.
- Saaty T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process. Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Mc Graw Hill Inc. U.S.A. 287 pp.
- Saaty T.L. 1996. Mathematics and Multicriteria Decision Making. Mathematics Awareness Week. <http://www.mathforum.com/mam/96/resources/saaty.html>
- SAGAR 1998. Uso del suelo en el Estado de México. Delegación en el Estado de México. Subdelegación de Agricultura. Programa de Fomento Agrícola.
- SAGARPA 2000. Cierre de siembras del año agrícola 2000. Programa de Información Agropecuaria. Subdelegación de Planeación y Desarrollo Rural. Delegación en el Estado de México. México.
- Salcedo G.J.G., y Larios R.J. 1987. Zonificación agrícola de la Costa de Tabasco, México. Revista de Geografía Agrícola (13-14):117-131. UACH. Dirección de Centros Regionales.
- Sánchez M.A. 1988. Objetivos económicos de la producción de amaranto. Pp. 61-78. En: Investigaciones recientes sobre Amarantho. Coordinadora: Teresa Reyna Trujillo. Instituto de Geografía UNAM. México. 101 pp.
- SARH 1994. Conversión productiva de la agricultura. Pp. 111-126. En: Apertura económica y perspectivas del sector agropecuario mexicano hacia el año 2000. Coordinadores: Romero P.E., Torres T.F., Del Valle C.M. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México. 488 pp.
- Schmoldt D.L., and Peterson D.L. 1997. Using the AHP in a workshop setting to elicit and prioritize fire research needs. Pp 151-162. Proceedings ACSM/ASPRS Annual Convention & Exposition. Technical Papers. Volume 4. Resource Technology Institute, Seattle, Washington, USA.
- Schmoldt D.L., Peterson D.L., and Smith R.L. 2001. The Analytic Hierarchy Process and Participatory Decision Making. Pp 129-143. In: M. Power, M. Strome, and T. Daniel (Eds.), Proceedings Decision Support 2001. Volume 1. Combined events of the 17th Annual Geographic Information Seminar and the Resource Technology 94 Symposium. Toronto, Ontario.
- SEP 1987. Manuales para la Educación Agropecuaria. Trigo, Cebada y Avena. Área: Producción Vegetal. Revisión de Ir Johan D. Berlijn, F. Orozco Luna y C. Glass Pastor. Editorial Trillas. 58 pp.
- Serrano B.R.C. 1993. Una propuesta de evaluación del recurso suelo con fines de planeación territorial; el caso de la región del Valle de Toluca. Tesis Maestría en Planeación Urbana y Regional. Facultad de Arquitectura y Arte UAEM. 210 pp.
- Shaw R.H. 1988. Climate Requirement. Pp 609-617. In: Corn and Corn Improvement. Eds Sprague G.F., and Dudley J.W. 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, Madison, Wisconsin, USA.

- Shrader W D., and Pierre J.J 1967. Soil suitability and Cropping Systems Pp. 5-22. In: Advances in corn production. Principles and practices. Eds Pierre W H, Aldrich S R., and Martin W P The Iowa State University Press, Building Ames, Iowa USA.
- Siddiqui, M Z Everett, J.W., and Vieux, B. E. 1996. Landfill siting using geographic information systems: a demonstration. *Journal of Environmental Engineering* 122 (6): 515-523
- Solorzano V E 1993 Colección y documentación del cultivo de Haba (*Vicia faba* L), en los Valles Altos de México. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia Academia de cultivos Junio. 139 pp
- Suárez R G. 1988 Experiencias e inquietudes sobre amaranto Pp 11-15 En: Investigaciones recientes sobre Amaranto Coordinadora: Teresa Reyna Trujillo Instituto de Geografía UNAM México 101 pp
- Starr M K, and Zeleny M 1977 MCDM State and future of the arts Pp 5-29 In: M. Starr, and M Zeleny (Eds), Multiple Criteria Decision Making Studies in the Management Sciences North Holland Publishing Company Amsterdam Volume 6
- Tapia N A 1994 Desarrollo tecnológico y transferencia de tecnología para la producción de maíz Pp 316-331 En: Apertura económica y perspectivas del sector agropecuario mexicano hacia el año 2000 Coordinadores: Romero P E, Torres T F, Del Valle C M. Instituto de Investigaciones Económicas UNAM México 488 pp
- Tiwari D N, Loof R, and Paudyal G N 1999 Environmental-economic decision-making in lowland irrigated agriculture using multi-criteria analysis techniques *Agricultural Systems* (60):99-112
- Torres S G, y Morales I M 1997 La globalización y el problemas de las alternativas. Pp. 9-27 En: Maíz-Tortilla Políticas y Alternativas Coordinadores: Torres S.G, y Morales I.M Colección Alternativas Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades y Programa Universitario de Alimentos. UNAM México. 240 pp.
- Turrent F A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana Colegio de Postgraduados Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas Oficina de asesores del Presidente de la República México. 165 pp.
- Turrent F A, y Aveldaño Z R 1997. Posibilidades técnicas de la autosuficiencia sostenible de maíz en México. Pp. 71-99. En: Maíz-Tortilla Políticas y Alternativas Coordinadores: Torres S G., y Morales I M Colección Alternativas Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades y Programa Universitario de Alimentos UNAM México 240 pp.
- Turriza E.L., Soto V.J., Escalante P.R., Maciel C.T., Bojórquez R.O., y Ku C.J. 1987. Investigaciones preliminares en el cultivo del Amaranto (*Amaranthus* spp) en el estado de Campeche. Pp 18-29 En: Coloquio Nacional del Amaranto Memorias Gobierno del estado de Querétaro Instituto de Desarrollo Estatal para la Accion Social (IDEAS) Queretaro, México. 312 pp
- Uboldi J A, and Chuvieco E. 1997. Using remote sensing and GIS to assess current land management in the valley of the Colorado river, Argentina. *ITC Journal* (2):160-165.
- Vauglin F. 1999. Use of Variograms to Represent Spatial Uncertainty of Geographic Linear Features Pp 157-163. In: Spatial Accuracy Assessment: Land Information Uncertainty in Natural Resources. Eds: Lowell K, and Jatón A Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan. U.S.A. 455 pp.
- Vázquez C M G, Espitia R. E, y Márquez S. A R. 1988 Potencial de reventado y calidad proteínica del amaranto Pp. 79-85. En: Investigaciones recientes sobre amaranto Coordinadora: Teresa Reyna Trujillo. Instituto de Geografía UNAM. México. 101 pp.
- Veregin H 1999 Data quality parameters. Pp 177-189. In: Geographical Informations Systems. Principles and Technical Issues Eds Longley A.P, Goodchild M F, Maguire D.J, and Rhind D W. John Wiley & Sons, Inc. U S A 580 pp.
- Voogd H 1983. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Pion Ltd London

- Walsh S J 1985 Geographic Information Systems for natural resource management Reprinted from Journal of Soil and Water Conservation 40(2): 202-205
- Wilde H, Jessen M, and Stephens P 1996 Land use mapping using satellite data of Manawatu, New Zealand ITC Journal (2):149-156
- Wilkinson G G. 1996 A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing International Journal of Geographical Information Systems 10(1):85-101
- Wu F 1998 SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules International Journal of Geographical Information Science 12(1):63-82
- Yue-Hong C 1997. Exploring spatial analysis in Geographic information systems Onword Press USA 474 pp
- Zadeh L A 1965 Fuzzy set Information and Content 8(3):338-353
- Zermeño L F 1995. México: Crisis agrícola y el modelo de desarrollo Pp 235-253. En: La modernización del campo y la globalización económica Compiladores y Coordinadores: Peña T E. y Romero P E. Colección: La estructura económica y social de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México. 342 pp
- Zhang J, and Foody F M. 1998. A fuzzy classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing 19(14):2721-2738.
- Zhang J, and Stuart N 2001 Fuzzy methods for categorical mapping with image-based land cover data International Journal of Geographical Information Science 13(2):175-195.

Anexo 1

Glosario de Términos

Los términos aquí descritos fueron tomados de Malczewsky (1999), Eastman et al (1995) y Barredo (1996)

Análisis de decisión multicriterio: Son un conjunto de procedimientos para el análisis de problemas de decisión complejos, que implican criterios no comparables y contrapuestos, en base a los cuales las alternativas de decisión son evaluadas. Evaluación Multicriterio, es un conjunto de técnicas orientadas a ayudar en los procesos de toma de decisiones. La toma de decisiones Multicriterio se puede entender como un mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para ayudar a los tomadores de decisiones a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar, o rechazar objetos, en base a una evaluación expresada por puntuaciones, valores, o intensidades de preferencia, de acuerdo a varios criterios

Base de datos: Se define como una colección de conjuntos de datos interrelacionados que se almacenan en un sistema de información computarizado para servir a una o más aplicaciones

Correlación: Es un método para establecer la magnitud de la relación estadística entre una variable dependiente y una o más variables independientes

Criterio: Es cierta base para la toma de una decisión que puede ser medida o evaluada. Es la evidencia sobre la cual se basa una decisión. Es un aspecto medible de un juicio, por el cual una dimensión de las alternativas bajo consideración puede ser caracterizada

Decisión: Una opción entre alternativas

Elección: Una fase de la toma de decisiones en la que, es hecha la elección entre alternativas

Estandarización: Es un procedimiento para obtener escalas comparables.

Estructura raster: Es una forma de estructura de datos para representar objetos en un mapa que se compone de celdas (píxeles) arreglados en forma de retícula

Función de membresía (pertenencia): Un conjunto fuzzy está caracterizado por una función de membresía $\mu_A(x)$, la cual asocia un número real (0,1) que representa el grado de pertenencia de x en A .

Interpolación: Es un procedimiento para estimar los valores de un atributo en lugares donde esos valores son desconocidos, basado en valores conocidos de puntos de control cercanos.

Mapa binario: Un mapa atributo que contiene solamente dos valores posibles del atributo: presencia (1) o ausencia (0).

Mapa criterio (factor): Es un mapa temático en la base de datos del SIG que representa la distribución espacial de un atributo que mide el grado en el cual se alcanza su objetivo asociado; los mapas criterio se clasifican en determinísticos, probabilísticos y fuzzy (de transición gradual)

Mapa criterio (restricción): Es un mapa temático en la base de datos del SIG que representa el conjunto de alternativas factibles. Ver restricción.

Matriz: Una estructura de los números arreglados en orden de filas y columnas.

Métodos de concordancia: Son una clase de métodos de decisión multiatributo basados en la comparación de alternativas por pares, los elementos básicos de los métodos de concordancia son las medidas de concordancia y de discordancia. Una amplia variedad de fórmulas está disponible para calcular el score total para cada alternativa en base a las dos medidas. El enfoque más simple es calcular el score o total de cada alternativa como la suma de los índices de la concordancia.

Modelo determinístico: Es un modelo construido para una condición de certeza asumida; los modelos asumen hay solamente un resultado posible (el cual es conocido) para cada curso de acción.

Percepción remota: Es el proceso de recopilar y procesar datos acerca de la superficie en la tierra y el ambiente a distancia, generalmente por los sensores instalados en un avión o satélites en el espacio.

Peso: Es un valor asignado a un criterio de evaluación que indica su importancia relativa con respecto a los otros criterios bajo evaluación; los pesos implican las compensaciones entre criterios con respecto a ciertas medidas transformadas.

Procesamiento de imagen: Una técnica basada en computadora para interpretar y procesar datos raster.

Proceso de análisis jerárquico (PAJ): Es un enfoque para la toma de decisiones multi-atributo basado en el concepto de comparaciones pareadas.

Reclasificación: Son operaciones en un SIG que transforman los datos de atributos asociados a un mapa temático; implica el agrupamiento de objetos en clases según los nuevos valores asignados a los objetos de los datos de entrada.

Restricción: Una restricción elimina ciertas combinaciones de las variables de decisión como soluciones factibles; las restricciones son usadas para no considerar, puntos, líneas, polígonos, y celdas (raster) que son caracterizados por ciertos atributos y/o ciertos valores de atributos.

Simulación: Es una metodología para realizar experimentos usando un modelo de los sistemas del mundo real.

Sistema fuzzy: Una colección de elementos de objetos sin un límite bien definido.

Sistema de soporte de decisiones (SSD): Un sistema computarizado interactivo que puede ayudar al tomador de decisiones a utilizar datos y modelos para solucionar problemas no estructurados.

Sobreposición: Son procedimientos en el SIG para generar una nueva capa o mapa (mapa de salida) en función de dos o más mapas de entrada; el valor del atributo asignado a cada localización en el mapa de salida es una función de los valores independientes asociados con la localización en los mapas de entrada.

Toma de decisión: Es el proceso de definir un problema y su ambiente, identificando alternativas, evaluando alternativas, seleccionando una alternativa, e implementado la decisión

Toma de decisiones multicriterio espacial: Es un proceso que implica un conjunto de alternativas (eventos) geográficamente definidos, de los cuales una elección de una o más alternativas es tomada respecto a un conjunto de criterios de evaluación.

Variable: Un factor medible que está relacionado al problema de interés

Variable lingüística: Una variable que toma palabras u oraciones en un lenguaje natural; los valores de variables lingüísticas son entonces asignados a conjuntos fuzzy

Anexo 2

Estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio

Localidad	Latitud	Longitud	m s n m	Período de datos utilizado
Ajusco, D F	19°13'	99°12'	2839	1-1-61 / 30-04-88
A de Juárez, Méx	19°22'	99°45'	2595	1-1-61 / 31-05-90
A del Río, Méx-	19°09'	99°29'	2572	1-1-61 / 31-12-97
Amanalco de Becerra, Méx	19°15'	100°01'	2365	9-3-62 / 31-10-92
Atarasquillo, Méx	19°19'	99°28'	2568	1-1-61 / 31-12-89
Atotonilco, Méx	19°27'	99°46'	2557	1-1-61 / 31-1-99
Calixtlahuaca, Méx	19°20'	99°41'	2635	27-10-78 / 30-4-99
Capulhuac, Méx	19°28'	99°31'	2760	1-1-69 / 31-8-97
Coatepec Harinas Méx	18°55'	99°45'	2270	1-1-61 / 30-9-98
Cuajimalpa, D F	19°21'	99°18'	2750	1-1-67 / 30-1-88
Desierto L eones D F	19°18'	99°18'	3200	1-1-61 / 31-8-87
Ejido Llano Grande, Méx	19°34'	99°39'	2538	1-6-63 / 28-2-98
Lerma, Méx	19°17'	99°32'	2580	1-1-73 / 31-10-92
Hda la Y, Méx	19°24'	99°34'	2576	1-1-61 / 31-1-99
Jiquipilco Méx	19°33'	99°36'	2827	12-5-62 / 31-7-98
Joquicingo, Méx	19°03'	99°31'	2648	5-1-56 / 31-5-96
La Marquesa, Méx	19°18'	99°23'	2989	1-1-71 / 31-1-99
Mexicalcingo, Méx	19°12'	99°35'	2602	1-1-69 / 31-5-96
Molinito, Méx	19°27'	99°14'	2274	1-1-69 / 31-7-98
Ocuilan, Méx	18°56'	99°19'	1850	1-6-69 / 31-12-95
Presa Anzaldo, D F	19°19'	99°13'	2299	1-11-53 / 1-10-89
Presa Mixcoac, D F	19°22'	99°16'	2240	18-9-53 / 31-2-88
Mimiapan, Méx	19°27'	99°58'	2935	1-2-61 / 31-3-98
Nueva Sta Elena, Méx	19°24'	99°41'	2611	1-1-61 / 31-5-98
San Bernabe, Méx	19°27'	99°42'	2560	1-1-61 / 30-11-98
San F Tlalcalcalpan, Méx	19°17'	99°47'	2600	1-8-46 / 31-8-98
Sta Ma del Monte, Méx	19°19'	99°49'	2760	20-3-62 / 31-08-98
San P Techuchulco, Méx	19°06'	99°31'	2569	1-5-63 / 31-12-87
Temoaya, Méx	19°28'	99°35'	2694	1-1-61 / 31-1-98
Tenango del Valle, Méx	19°06'	99°35'	2603	12-8-59 / 28-2-98
Malinalco, Méx	18°56'	99°29'	1823	1-1-61 / 30-11-87
San B Llano, Méx	19°35'	99°44'	2547	1-9-64 / 31-3-99
San P Baños, Méx	19°39'	99°50'	2538	1-8-65 / 31-12-98
Los Velázquez, Méx	19°25'	99°53'	2577	1-11-63 / 30-6-98
Viveros la Paz, Méx	18°53'	99°38'	1900	1-1-61 / 31-7-96

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Anexo 3

Tabla A3.3. Medias decenales (36) de temperatura máxima por estación

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
Viveros la Paz, Méx	24.2	24.1	24.9	25.3	25.8	27.2	28	29	28.4	28.5	27.9	28.3	28.1	25.3	25.5	25.9	26.4	26.5	25.4	25.1	24.4	24.7	24.8	25	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.2	25.3	24.2	24.5	24.1		
Los Velázquez, Méx	17.9	17.2	18.3	18.5	19.2	19.6	20.3	20.7	21.6	22.2	22	22.8	23.4	23.3	23	23	22.4	21.5	20.1	19.5	19.6	19.8	19.6	19.6	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.3	18.9	18.4	18.3	18.2		
San Pedro de las Barbas, Méx	20.3	19.5	20.7	20.3	21.4	21.7	22.7	23.5	23.9	24.2	24.3	25	24.9	24.5	24	24.4	23.1	21.6	20.2	19.4	19.4	20.4	20.4	20.4	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.2	20.2	20.2	
San Bartolo del Llano, Méx	19.8	19.1	20.3	20.5	21.4	21.7	22.7	23.5	23.9	24.2	24.3	25	24.9	24.5	24	24.4	23.1	21.6	20.2	19.4	19.4	20.4	20.4	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.2	20.2	20.2	
Madrón, Méx	26.4	26	26.7	27.2	27.7	28.3	29	29.7	30.4	31	30.6	31.2	30.6	30.5	29.9	29.9	27.7	26.8	26.9	27.1	26.7	27.3	27.5	27.3	27.2	26.9	26.4	27	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.2	26.4	26.5	
Tenango del Valle, Méx	18.5	18.3	19	19	19.7	20.5	20.8	21.2	22	22.4	22.6	22	21.5	21.8	20.6	19.8	19.7	19.5	19.7	19.5	19.7	19.8	19.7	19.8	19.8	20	20.2	20.5	20.3	20.4	20.2	19.8	19.2	19.8	19.2	19	18.8		
Tehuacán, Méx	19.2	18.7	18.6	19.6	20.5	21	21.9	22.5	23.2	23.3	23	23.7	23.8	23.5	23	22.7	21.3	20.1	20	20.1	20.3	20.4	20.5	20.1	20.1	20.5	20.4	20.6	20.8	20.8	20.6	20.4	20.1	19.5	19.2	19.5	19.2		
San Pedro Tlachichucan, Méx	18.6	18.4	18.9	18.9	19.3	19.9	20.9	21.6	22.3	22.7	22.6	22.9	23.6	23.9	22.6	22.1	21.2	20.3	20	20.1	20.3	20.3	20.5	20.1	20.1	20.5	20.3	20.7	20.6	20.3	20.6	20.1	19.8	19.4	19.2	18.5	18.2		
Santa María del Monte, Méx	17.4	17.4	18.1	18.6	19.1	19.6	20.7	21	21	22.3	22.9	23.2	22.9	23.2	22.6	21.9	21.4	20.1	19	19	19.2	19.3	19.3	19.2	19	19.1	19	18.8	18.2	19.3	19.2	19	18.5	18.5	17.8	17.4	17.6		
San Fco Tlachichucan, Méx	19.1	18.9	19.8	19.7	20.7	21.1	21.7	22.7	23.2	23.4	23.5	24	24.2	23.9	23.5	23.1	21.6	20.6	19.8	19.4	19.4	20.4	20.4	20.5	20.5	20.7	20.6	20	20.2	20.5	20.8	20.6	20.4	20.5	19.9	19.5	19.4	19.2	
San Barnabé, Méx	20	19.4	20.4	20.3	21.2	21.8	22.6	23.6	24.1	24.2	24.3	25.3	25.3	24.9	24.4	24.3	22.9	21.4	21.3	21.4	21.7	21.7	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	
Nuevo Santa Elena, Méx	18.6	18.3	19.2	19	20	20.6	21.2	21.9	22.4	22.8	22.8	23.4	23.3	23.2	22.6	22.1	20	20.1	20.9	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	
Minisipon, Méx	21	20.5	20.9	21	21.9	22.1	22.7	23.4	24.3	24.7	25.3	25.9	25.9	25.4	25.4	25.3	24	22.7	22.4	22	22.4	22.7	22.5	22.7	22.5	22.5	22.2	22.1	22	22.2	21.9	22.2	22	22	22	22	22	22	
Prusa Anacleto, D.F	16.3	16.4	16.9	17.1	17.9	18.1	18.8	19.4	19.8	20.1	19.7	20.5	20.8	20.4	20.1	18.4	18.4	17.2	16.5	16.8	16.8	16.8	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	
Neuquálcom, Méx	17.8	17.9	18.8	18.6	19.3	19.8	20.3	21.5	21.8	22.8	23.2	23.3	23.7	24	22.4	22.5	21.1	20.1	19.5	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	
La Marquosa, Méx	19.1	18.5	19.3	19.6	20.4	21.3	21.8	22.9	23.2	23.7	24	23.8	24.6	24.7	24.5	23.7	22.6	22.3	21.1	21	21.1	21.5	21.6	21.5	21.4	21.2	21.5	21.4	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	
Huixtla, Méx	20.2	19.5	20.6	20.4	21.3	21.8	22.9	23.2	23.7	24	23.8	24.6	24.7	24.5	23.7	22.6	22.3	21.1	21	21.1	21.5	21.6	21.5	21.4	21.2	21.5	21.4	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	
Huixtla, Méx	20.2	19.1	19.9	20.2	21.5	21.4	25	23.6	24.1	24.1	23.5	24.1	24.2	23.7	23.1	22.5	21.1	20.4	19.8	20.1	20	20.2	20.3	20.1	20.2	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	
Epitacio Urbán, Méx	19.4	18.5	18.6	18.7	18.6	18.5	18.7	18.6	18.5	18.6	18.5	18.3	18.2	18.9	18.1	17	16.2	16.3	16.5	16.3	16.4	16	15.7	15.6	15.8	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	
Donato Gómez, D.F	15.3	14.6	15.6	16.1	16.9	17.6	18.5	19.2	19.6	20.1	19.6	20.1	19.5	19.3	19.2	18.9	18.1	17	16.2	16.3	16.5	16.3	16.4	16	15.7	15.6	15.8	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	
Capulhuac, Méx	20.7	20.1	20.5	20.8	21.7	22.6	23.2	23.7	24	23.8	24.2	24.5	24.4	23.5	23.3	22.8	22.7	21.5	20.6	20.4	20.6	20.8	20.8	20.7	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	
Cataltlán, Méx	20.7	20.1	20.5	20.8	21.7	22.6	23.2	23.7	24	23.8	24.2	24.5	24.4	23.5	23.3	22.8	22.7	21.5	20.6	20.4	20.6	20.8	20.8	20.7	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	
Atzacacoatlán, Méx	20.7	20.1	20.5	20.8	21.7	22.6	23.2	23.7	24	23.8	24.2	24.5	24.4	23.5	23.3	22.8	22.7	21.5	20.6	20.4	20.6	20.8	20.8	20.7	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	
Amatitlán de Juárez, Méx	19.6	19.2	20.3	20.4	20.7	21.5	21.8	22.5	23.3	24.1	24.6	25.2	24.6	25.7	25.3	24.2	24	23.6	23.6	23.1	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9	
Ocotlán, Méx	21.1	20.5	21.2	21.7	22.5	23	23.7	24.4	25.2	25.8	26.3	26.4	25.8	26.8	26.3	26.4	25.8	24.9	23.8	22.9	21.9	22	21.9	22.2	22.3	22.1	22.2	22.1	22.2	22.3	22.2	22	22	22	22	22	22	22	
Prusa Hinojosa, Méx	21.6	21.2	22.3	22.4	23.1	23.7	24.6	25.2	25.9	26.1	25.7	26.8	26.3	26.4	25.8	24.9	23.8	22.9	21.9	22	21.9	22.2	22.3	22.1	22.2	22.1	22.2	22.1	22.2	22.3	22.2	22	22	22	22	22	22	22	
Coltepec Hinojosa, Méx	22.3	22.1	22.2	23.2	23.3	24	24.1	24.6	25.7	26.5	26.8	26.9	26.4	25.7	25.8	24.9	23.8	22.9	21.9	22	21.9	22.2	22.3	22.1	22.2	22.1	22.2	22.1	22.2	22.3	22.2	22	22	22	22	22	22	22	
Molotlán, Méx	21.6	21.2	22.3	22.4	23.1	23.7	24.6	25.2	25.9	26.1	25.7	26.8	26.3	26.4	25.8	24.9	23.8	22.9	21.9	22	21.9	22.2	22.3	22.1	22.2	22.1	22.2	22.1	22.2	22.3	22.2	22	22	22	22	22	22	22	
Atzacacoatlán, Méx	19.4	19	20	20.1	20.9	21.3	22.1	22.9	23.8	24.7	24.7	24.1	24.1	23.6	23.6	23.6	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
Atzacacoatlán, Méx	21.2	20.7	21.2	21.3	21.9	22.5	23.3	23.9	24.8	25	25.2	26.1	26	25.3	24.5	23.4	22.4	21.7	21	21.1	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Apanasco de Beccora, Méx	15.5	14.9	15.7	16	16.5	16.8	17.6	18.4	19	19.2	19.2	19.5	19.5	19.2	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	
Apanasco, D.F	17.9	17.5	18.4	18.2	18.4	19.5	20.8	21.4	21.7	21.7	21.4	22.4	22.5	21.8	21.2	20.9	20.1	19	18.6	18.4	18.7	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	
Quetzaltenango, D.F	17.9	17.5	18.4	18.2	18.4	19.5	20.8	21.4	21.7	21.7	21.4	22.4	22.5	21.8	21.2	20.9	20.1	19	18.6	18.4	18.7	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	

Anexo 4

Tabla A 4.1 Histograma del mapa de áreas adecuadas de maíz.

Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado
50	5	0.0016	0.0016	153	1417	0.4850	30.5793
51	2	0.0007	0.0023	154	1394	0.4574	31.0367
52	3	0.0010	0.0033	155	1548	0.5079	31.5447
53	1	0.0003	0.0036	156	1395	0.4577	32.0024
54	0	0.0000	0.0036	157	1457	0.4781	32.4805
55	0	0.0000	0.0036	158	1357	0.4453	32.9259
56	0	0.0000	0.0036	159	1499	0.4886	33.4144
57	0	0.0000	0.0036	160	1478	0.4850	33.8994
58	3	0.0010	0.0046	161	1665	0.5463	34.4457
59	167	0.0548	0.0594	162	1573	0.5162	34.9619
60	62	0.0203	0.0797	163	1620	0.5316	35.4934
61	54	0.0177	0.0975	164	1631	0.5352	36.0286
62	38	0.0125	0.1099	165	1761	0.5778	36.6065
63	33	0.0108	0.1208	166	1868	0.6130	37.2194
64	38	0.0125	0.1332	167	1995	0.6546	37.8740
65	36	0.0118	0.1450	168	1934	0.6346	38.5086
66	31	0.0102	0.1552	169	1907	0.6257	39.1344
67	51	0.0167	0.1719	170	2033	0.6671	39.8015
68	37	0.0121	0.1841	171	2145	0.7038	40.5053
69	111	0.0364	0.2205	172	2225	0.7301	41.2354
70	80	0.0263	0.2468	173	2380	0.7810	42.0164
71	169	0.0555	0.3022	174	3146	1.0323	43.0487
72	354	0.1162	0.4184	175	4390	1.4405	44.4892
73	270	0.0888	0.5070	176	3051	1.0011	45.4903
74	138	0.0453	0.5522	177	2846	0.9339	46.4242
75	154	0.0505	0.6028	178	3013	0.9887	47.4128
76	196	0.0643	0.6671	179	2856	0.9371	48.3500
77	223	0.0732	0.7403	180	3346	1.0979	49.4479
78	140	0.0459	0.7862	181	5365	1.7604	51.2083
79	236	0.0774	0.8636	182	2829	0.9283	52.1366
80	139	0.0456	0.9093	183	2970	0.9746	53.1112
81	180	0.0591	0.9683	184	3592	1.1787	54.2898
82	177	0.0581	1.0264	185	2719	0.8922	55.1820
83	164	0.0538	1.0802	186	2863	0.9394	56.1215
84	219	0.0719	1.1521	187	3023	0.9919	57.1134
85	176	0.0578	1.2098	188	2571	0.8436	57.9570
86	159	0.0522	1.2620	189	2524	0.8282	58.7853
87	152	0.0499	1.3119	190	2460	0.8072	59.5925
88	173	0.0558	1.3686	191	2724	0.8938	60.4863
89	149	0.0489	1.4175	192	3199	1.0497	61.5360
90	198	0.0650	1.4825	193	3298	1.0822	62.6182
91	1209	0.3967	1.8792	194	2200	0.7219	63.3401
92	306	0.1004	1.9796	195	3101	1.0175	64.3576
93	1587	0.5207	2.5004	196	2977	0.9769	65.3344
94	2979	0.9775	3.4779	197	2367	0.7734	66.1079
95	965	0.3166	3.7945	198	2209	0.7248	66.8327
96	876	0.2874	4.0820	199	2059	0.6756	67.5083
97	1015	0.3331	4.4150	200	1899	0.6231	68.1314
98	911	0.2989	4.7140	201	2117	0.6947	68.8261
99	701	0.2300	4.9440	202	2543	0.8344	69.6605
100	1006	0.3301	5.2741	203	2185	0.7170	70.3775
101	782	0.2566	5.5307	204	1812	0.5946	70.9721
102	912	0.2993	5.8299	205	1937	0.6356	71.6077
103	1034	0.3393	6.1692	206	2455	0.8056	72.4133
104	959	0.3147	6.4839	207	2216	0.7271	73.1404
105	1013	0.3324	6.8163	208	2296	0.7534	73.8938
106	959	0.3147	7.1310	209	2175	0.7137	74.6075
107	965	0.3166	7.4476	210	2752	0.9030	75.5105
108	769	0.2523	7.7000	211	2901	0.9519	76.4624
109	1952	0.6405	8.3405	212	3200	1.0500	77.5124
110	1813	0.5949	8.9354	213	4501	1.4789	78.9894
111	1224	0.4016	9.3370	214	3656	1.2029	80.1923
112	5476	1.7989	11.1339	215	3043	0.9985	81.1908
113	4226	1.3867	12.5205	216	2025	0.6645	81.8553
114	2472	0.8111	13.3317	217	2174	0.7134	82.5686
115	1988	0.6523	13.9840	218	2036	0.6681	83.2367
116	1790	0.5874	14.5714	219	3091	1.0143	84.2510
117	1723	0.5654	15.1367	220	4728	1.5508	85.8017
118	1602	0.5257	15.6624	221	2035	0.6677	86.4695
119	1706	0.5598	16.2222	222	1759	0.5772	87.0466
120	1485	0.4873	16.7095	223	1787	0.5798	87.6265
121	1503	0.4932	17.2027	224	1796	0.5893	88.2158
122	1624	0.5329	17.7356	225	1349	0.4427	88.6584
123	1466	0.4810	18.2166	226	1487	0.4879	89.1464
124	1538	0.5047	18.7213	227	1193	0.3915	89.5378
125	1854	0.6084	19.3296	228	1009	0.3311	89.8689
126	1537	0.5043	19.8340	229	1333	0.4374	90.3063
127	1418	0.4653	20.2993	230	3130	1.0271	91.3334
128	1306	0.4285	20.7278	231	2232	0.7324	92.0658
129	1185	0.3888	21.1166	232	4557	1.4953	93.5611
130	1254	0.4115	21.5281	233	2630	0.8630	94.4240
131	1274	0.4190	21.9462	234	1034	0.3393	94.7633
132	1138	0.3734	22.3196	235	752	0.2468	95.0101
133	1218	0.3997	22.7192	236	3063	1.0051	96.0152
134	1208	0.3964	23.1156	237	1250	0.4102	96.4253
135	1169	0.3836	23.4992	238	1386	0.4548	96.8801
136	1106	0.3629	23.8621	239	4877	1.6003	98.4804
137	1160	0.3806	24.2428	240	1005	0.3298	98.8102
138	1134	0.3721	24.6149	241	763	0.2504	99.0606
139	1131	0.3711	24.9860	242	1044	0.3426	99.4031
140	1161	0.3810	25.3669	243	403	0.1322	99.5354
141	1161	0.3810	25.7479	244	302	0.0991	99.6345
142	1136	0.3728	26.1207	245	299	0.0981	99.7326
143	1132	0.3714	26.4921	246	169	0.0555	99.7880
144	1154	0.3787	26.8708	247	160	0.0525	99.8405
145	1148	0.3767	27.2475	248	120	0.0394	99.8799
146	1292	0.4239	27.6714	249	65	0.0213	99.9012
147	1186	0.3892	28.0606	250	82	0.0269	99.9281
148	1208	0.3964	28.4570	251	69	0.0228	99.9506
149	1219	0.4000	28.8570	252	125	0.0410	99.9916
150	1199	0.3894	29.2504	253	16	0.0053	99.9970
151	1282	0.4207	29.6710	254	5	0.0018	99.9987
152	1351	0.4433	30.1144	255	4	0.0013	100.0000

Tabla A 4.2 Histograma del mapa de áreas adecuadas de papa.

Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado
1	251	0.0783	0.0783	86	310	0.0967	2.7544	171	0	0.0000	50.7826
2	126	0.0393	0.1175	87	0	0.0000	2.7544	172	2638	0.8225	51.6051
3	0	0.0000	0.1175	88	245	0.0764	2.8308	173	2535	0.7904	52.3955
4	105	0.0327	0.1503	89	393	0.1225	2.9533	174	2086	0.6504	53.0459
5	54	0.0168	0.1671	90	256	0.0798	3.0331	175	0	0.0000	53.0459
6	78	0.0243	0.1914	91	0	0.0000	3.0331	176	2142	0.6679	53.7138
7	0	0.0000	0.1914	92	288	0.0898	3.1229	177	2363	0.7368	54.4505
8	121	0.0377	0.2292	93	222	0.0692	3.1921	178	0	0.0000	54.4505
9	89	0.0277	0.2569	94	0	0.0000	3.1921	179	3210	1.0009	55.4514
10	0	0.0000	0.2569	95	165	0.0514	3.2436	180	2552	0.7957	56.2471
11	21	0.0065	0.2635	96	1325	0.4131	3.6567	181	2632	0.8206	57.0677
12	15	0.0047	0.2681	97	1280	0.3991	4.0558	182	0	0.0000	57.0677
13	15	0.0047	0.2728	98	0	0.0000	4.0558	183	2816	0.8780	57.9457
14	0	0.0000	0.2728	99	910	0.2837	4.3395	184	4028	1.2559	59.2016
15	8	0.0025	0.2753	100	837	0.2610	4.6005	185	0	0.0000	59.2016
16	7	0.0022	0.2775	101	0	0.0000	4.6005	186	3192	0.9952	60.1969
17	0	0.0000	0.2775	102	618	0.1927	4.7932	187	3025	0.9432	61.1400
18	4	0.0012	0.2787	103	474	0.1478	4.9410	188	3018	0.9410	62.0810
19	28	0.0087	0.2875	104	602	0.1877	5.1287	189	0	0.0000	62.0810
20	12	0.0037	0.2912	105	0	0.0000	5.1287	190	3192	0.9952	63.0763
21	0	0.0000	0.2912	106	545	0.1699	5.2986	191	3546	1.1056	64.1819
22	6	0.0019	0.2931	107	567	0.1768	5.4754	192	0	0.0000	64.1819
23	3	0.0009	0.2940	108	0	0.0000	5.4754	193	10294	3.2096	67.3915
24	0	0.0000	0.2940	109	626	0.1952	5.6706	194	4193	1.3073	68.6988
25	6	0.0019	0.2959	110	593	0.1849	5.8555	195	4120	1.2846	69.9834
26	1	0.0003	0.2962	111	596	0.1858	6.0413	196	0	0.0000	69.9834
27	85	0.0265	0.3227	112	0	0.0000	6.0413	197	3902	1.2166	71.2000
28	0	0.0000	0.3227	113	979	0.3052	6.3465	198	4300	1.3407	72.5407
29	225	0.0702	0.3929	114	1259	0.3925	6.7391	199	0	0.0000	72.5407
30	196	0.0611	0.4540	115	0	0.0000	6.7391	200	3288	1.0252	73.5659
31	0	0.0000	0.4540	116	1628	0.5076	7.2467	201	3509	1.0941	74.6600
32	218	0.0680	0.5219	117	1024	0.3193	7.5680	202	3235	1.0086	75.6686
33	123	0.0384	0.5603	118	394	0.1228	7.6888	203	0	0.0000	75.6686
34	169	0.0527	0.6130	119	0	0.0000	7.6888	204	3379	1.0535	76.7222
35	0	0.0000	0.6130	120	383	0.1194	7.8082	205	3420	1.0663	77.7885
36	148	0.0461	0.6591	121	410	0.1278	7.9361	206	0	0.0000	77.7885
37	239	0.0745	0.7336	122	0	0.0000	7.9361	207	3183	0.9924	78.7810
38	0	0.0000	0.7336	123	491	0.1531	8.0891	208	3059	0.9538	79.7347
39	148	0.0461	0.7798	124	4622	1.4411	9.5303	209	2924	0.9117	80.6464
40	201	0.0627	0.8425	125	5358	1.6706	11.2008	210	0	0.0000	80.6464
41	162	0.0505	0.8930	126	0	0.0000	11.2008	211	2834	0.8836	81.5300
42	0	0.0000	0.8930	127	4073	1.2699	12.4708	212	2262	0.7053	82.2353
43	158	0.0493	0.9422	128	3252	1.0139	13.4847	213	0	0.0000	82.2353
44	129	0.0402	0.9825	129	0	0.0000	13.4847	214	2468	0.7757	83.0110
45	0	0.0000	0.9825	130	2797	0.8721	14.3568	215	1786	0.5569	83.5679
46	121	0.0377	1.0202	131	2662	0.8300	15.1868	216	1792	0.5587	84.1266
47	126	0.0393	1.0595	132	2925	0.9120	16.0988	217	0	0.0000	84.1266
48	127	0.0396	1.0991	133	0	0.0000	16.0988	218	1722	0.5369	84.6635
49	0	0.0000	1.0991	134	2204	0.6872	16.7880	219	1805	0.5628	85.2263
50	146	0.0455	1.1446	135	1749	0.5453	17.3313	220	0	0.0000	85.2263
51	128	0.0399	1.1845	136	0	0.0000	17.3313	221	1840	0.5737	85.8000
52	0	0.0000	1.1845	137	2009	0.6264	17.9577	222	1876	0.5849	86.3850
53	152	0.0474	1.2319	138	6611	2.0613	20.0190	223	2148	0.6697	87.0547
54	126	0.0393	1.2712	139	8569	2.6718	22.6907	224	0	0.0000	87.0547
55	137	0.0427	1.3139	140	0	0.0000	22.6907	225	2447	0.7630	87.8176
56	0	0.0000	1.3139	141	6814	2.1246	24.8153	226	1673	0.5216	88.3393
57	97	0.0302	1.3441	142	7313	2.2801	27.0954	227	0	0.0000	88.3393
58	226	0.0705	1.4146	143	0	0.0000	27.0954	228	1379	0.4300	88.7692
59	0	0.0000	1.4146	144	5923	1.8467	28.9422	229	1322	0.4122	89.1814
60	222	0.0692	1.4838	145	5843	1.8218	30.7640	230	1176	0.3667	89.5481
61	236	0.0736	1.5574	146	5412	1.6874	32.4514	231	0	0.0000	89.5481
62	170	0.0530	1.6104	147	0	0.0000	32.4514	232	1201	0.3745	89.9226
63	0	0.0000	1.6104	148	3729	1.1627	33.6141	233	1446	0.4509	90.3734
64	158	0.0493	1.6597	149	3486	1.0889	34.7010	234	0	0.0000	90.3734
65	152	0.0474	1.7071	150	0	0.0000	34.7010	235	1606	0.5007	90.8741
66	0	0.0000	1.7071	151	3805	1.1864	35.8873	236	1637	0.5104	91.3845
67	169	0.0527	1.7598	152	3602	1.1231	37.0104	237	1795	0.5597	91.9442
68	166	0.0518	1.8115	153	3613	1.1285	38.1369	238	0	0.0000	91.9442
69	138	0.0430	1.8545	154	0	0.0000	38.1369	239	1777	0.5541	92.4983
70	0	0.0000	1.8545	155	3803	1.1857	39.3227	240	2034	0.6342	93.1325
71	168	0.0524	1.9069	156	3965	1.2456	40.5683	241	0	0.0000	93.1325
72	156	0.0486	1.9556	157	0	0.0000	40.5683	242	2818	0.8786	94.0111
73	0	0.0000	1.9556	158	3977	1.2400	41.8083	243	831	0.2591	94.2702
74	166	0.0518	2.0073	159	3489	1.0878	42.8961	244	832	0.2594	94.5296
75	182	0.0567	2.0641	160	3361	1.0479	43.9441	245	0	0.0000	94.5296
76	186	0.0580	2.1221	161	0	0.0000	43.9441	246	868	0.2706	94.8002
77	0	0.0000	2.1221	162	3503	1.0922	45.0363	247	1752	0.5463	95.3465
78	205	0.0639	2.1860	163	3161	0.9856	46.0218	248	0	0.0000	95.3465
79	248	0.0773	2.2633	164	0	0.0000	46.0218	249	1381	0.4243	95.7708
80	0	0.0000	2.2633	165	3401	1.0604	47.0822	250	1389	0.4331	96.2039
81	274	0.0854	2.3487	166	3173	0.9893	48.0716	251	1574	0.4908	96.6947
82	283	0.0882	2.4370	167	2870	0.8948	48.9664	252	0	0.0000	96.6947
83	335	0.1045	2.5414	168	0	0.0000	48.9664	253	1916	0.5974	97.2921
84	0	0.0000	2.5414	169	2789	0.8696	49.8360	254	2907	0.9064	98.1985
85	373	0.1163	2.6577	170	3036	0.9466	50.7826	255	5778	1.8015	100.0000

Tabla A 4.3 Histograma del mapa de áreas adecuadas de avena.

Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado
7	1	0.0003	0.0003	90	2170	0.7120	35.9528	173	1745	0.5726	79.9669
8	1	0.0003	0.0007	91	2270	0.7449	36.6977	174	1933	0.6343	80.9011
9	1	0.0003	0.0010	92	2148	0.7048	37.4025	175	1828	0.5988	81.2010
10	1	0.0003	0.0013	93	2095	0.6874	38.0899	176	1897	0.6225	81.8234
11	1	0.0003	0.0016	94	2104	0.6904	38.7803	177	1750	0.5742	82.3977
12	4	0.0013	0.0030	95	2224	0.7298	39.5101	178	1762	0.5782	82.9758
13	2	0.0007	0.0036	96	2179	0.7150	40.2251	179	1866	0.6123	83.5881
14	1	0.0003	0.0039	97	2208	0.7245	40.9496	180	1825	0.5988	84.1870
15	5	0.0016	0.0056	98	2113	0.6903	41.6430	181	1558	0.5112	84.6982
16	2	0.0007	0.0062	99	2243	0.7360	42.3790	182	1725	0.5660	85.2642
17	3	0.0010	0.0072	100	2162	0.7094	43.0884	183	1628	0.5342	85.7984
18	14	0.0046	0.0118	101	2248	0.7376	43.8260	184	1584	0.5284	86.3809
19	13	0.0043	0.0161	102	2068	0.6786	44.5046	185	1486	0.4876	86.8685
20	22	0.0072	0.0233	103	2091	0.6861	45.1907	186	1487	0.4879	87.3564
21	20	0.0066	0.0299	104	1859	0.6100	45.8007	187	1438	0.4719	87.8283
22	7	0.0023	0.0322	105	1717	0.5634	46.3641	188	1658	0.5440	88.3723
23	13	0.0043	0.0364	106	1752	0.5749	46.9390	189	1566	0.5139	88.8862
24	14	0.0046	0.0410	107	1624	0.5329	47.4719	190	1399	0.4591	89.3452
25	42	0.0138	0.0548	108	1566	0.5139	47.9858	191	1456	0.4778	89.8230
26	28	0.0092	0.0640	109	1589	0.5247	48.5104	192	1336	0.4384	90.2614
27	43	0.0141	0.0781	110	1408	0.4620	48.9725	193	1453	0.4768	90.7381
28	51	0.0167	0.0948	111	1342	0.4404	49.4128	194	985	0.3232	91.0613
29	88	0.0289	0.1237	112	1286	0.4220	49.8348	195	1019	0.3344	91.3957
30	207	0.0679	0.1916	113	1241	0.4072	50.2420	196	934	0.3065	91.7022
31	59	0.0194	0.2110	114	1324	0.4344	50.6764	197	906	0.2973	91.9995
32	43	0.0141	0.2251	115	1400	0.4594	51.1358	198	687	0.2254	92.2249
33	45	0.0148	0.2399	116	1476	0.4843	51.6202	199	639	0.2097	92.4346
34	46	0.0151	0.2550	117	1513	0.4965	52.1166	200	649	0.2130	92.6475
35	81	0.0268	0.2815	118	1504	0.4935	52.6101	201	567	0.1861	92.8336
36	58	0.0190	0.3006	119	1513	0.4965	53.1066	202	650	0.2133	93.0469
37	96	0.0315	0.3321	120	1615	0.4971	53.6037	203	636	0.2087	93.2556
38	245	0.0804	0.4125	121	1760	0.5775	54.1812	204	635	0.2084	93.4639
39	282	0.0925	0.5050	122	1551	0.5089	54.6902	205	578	0.1897	93.6536
40	154	0.0505	0.5555	123	1562	0.5125	55.2027	206	600	0.1969	93.8505
41	157	0.0515	0.6070	124	1540	0.5053	55.7080	207	588	0.1929	94.0434
42	176	0.0578	0.6648	125	1580	0.5184	56.2265	208	505	0.1657	94.2091
43	151	0.0495	0.7143	126	1536	0.5040	56.7305	209	431	0.1414	94.3505
44	148	0.0486	0.7629	127	1662	0.5454	57.2758	210	430	0.1411	94.4916
45	144	0.0473	0.8102	128	1689	0.5575	57.8333	211	417	0.1368	94.6285
46	163	0.0536	0.8636	129	1593	0.5227	58.3561	212	370	0.1214	94.7499
47	245	0.0804	0.9440	130	1647	0.5404	58.8965	213	334	0.1096	94.8595
48	226	0.0742	1.0182	131	1637	0.5372	59.4336	214	341	0.1119	94.9714
49	323	0.1060	1.1242	132	1689	0.5542	59.9879	215	382	0.1253	95.0967
50	312	0.1024	1.2266	133	1929	0.6330	60.6209	216	345	0.1132	95.2099
51	405	0.1329	1.3595	134	1658	0.5444	61.1652	217	378	0.1240	95.3340
52	592	0.1910	1.5504	135	1965	0.6448	61.8100	218	409	0.1342	95.4682
53	549	0.1801	1.7306	136	2018	0.6622	62.4721	219	367	0.1204	95.5886
54	556	0.1824	1.9130	137	1876	0.6156	63.0877	220	354	0.1162	95.7047
55	705	0.2313	2.1443	138	1798	0.5900	63.6777	221	379	0.1244	95.8291
56	866	0.2842	2.4285	139	1308	0.4292	64.1069	222	342	0.1122	95.9413
57	1196	0.3924	2.8210	140	1428	0.4686	64.5756	223	354	0.1162	96.0575
58	1258	0.4128	3.2337	141	1385	0.4538	65.0293	224	364	0.1194	96.1769
59	1358	0.4458	3.6793	142	1302	0.4272	65.4565	225	366	0.1201	96.2970
60	1753	0.5752	4.2546	143	1273	0.4177	65.8742	226	364	0.1194	96.4185
61	1322	0.4338	4.6884	144	1195	0.3921	66.2663	227	406	0.1332	96.5497
62	1599	0.5247	5.2130	145	1208	0.3964	66.6627	228	348	0.1142	96.6639
63	1766	0.5795	5.7925	146	1157	0.3796	67.0424	229	344	0.1129	96.7768
64	2396	0.7862	6.5787	147	1209	0.3967	67.4391	230	308	0.1011	96.8778
65	2577	0.8456	7.4243	148	1210	0.3970	67.8361	231	308	0.1011	96.9789
66	3511	1.1521	8.5764	149	1157	0.3796	68.2158	232	308	0.1011	97.1430
67	3871	1.2702	9.8466	150	1279	0.4197	68.6355	233	296	0.0971	97.2401
68	5493	1.8024	11.6480	151	1319	0.4328	69.0683	234	313	0.1027	97.3428
69	10854	3.5815	15.2106	152	1330	0.4364	69.5047	235	315	0.1034	97.4461
70	3652	1.1883	16.4089	153	1503	0.4932	69.9979	236	322	0.1057	97.5518
71	3856	1.2653	17.6742	154	1933	0.6343	70.6321	237	288	0.0945	97.6463
72	4269	1.4008	19.0750	155	1666	0.5532	71.1854	238	267	0.0876	97.7339
73	8766	2.8764	21.9514	156	1786	0.5860	71.7714	239	246	0.0807	97.8146
74	3875	1.3043	23.2557	157	2223	0.7294	72.5009	240	288	0.0945	97.9091
75	3532	1.1590	24.4147	158	2042	0.6700	73.1709	241	305	0.1001	98.0092
76	2742	0.8997	25.3144	159	1343	0.4407	73.6116	242	325	0.1066	98.1159
77	2742	0.8997	26.2142	160	1112	0.3649	73.9765	243	280	0.0919	98.2077
78	2816	0.9240	27.1382	161	1195	0.3921	74.3686	244	345	0.1132	98.3209
79	2630	0.8630	28.0012	162	1134	0.3721	74.7407	245	383	0.1287	98.4466
80	2270	0.7449	28.7460	163	897	0.2943	75.0350	246	402	0.1319	98.5785
81	2306	0.7567	29.5027	164	1112	0.3649	75.3999	247	332	0.1089	98.6875
82	2224	0.7298	30.2325	165	1304	0.4279	75.8278	248	352	0.1155	98.8030
83	2083	0.6835	30.9180	166	1163	0.3816	76.2094	249	381	0.1250	98.9280
84	2267	0.7439	31.6599	167	1402	0.4600	76.6695	250	821	0.2694	99.1974
85	2111	0.6927	32.3525	168	1570	0.5152	77.1848	251	793	0.2602	99.4576
86	2108	0.6917	33.0442	169	1583	0.5194	77.7041	252	307	0.1007	99.5583
87	2215	0.7268	33.7711	170	1702	0.5685	78.2625	253	339	0.1112	99.6696
88	2322	0.7619	34.5330	171	1794	0.5887	78.8512	254	494	0.1621	99.8317
89	2157	0.7078	35.2408	172	1655	0.5431	79.3943	255	513	0.1683	100.0000

Tabla A 4.4 Histograma del mapa de áreas adecuadas de haba

Valor asignado	Núm. de píxele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxele	% relativo	% acumulado
18	4	0.0013	0.0013	97	501	0.1644	13.4895	176	927	0.3042	74.7814
19	4	0.0013	0.0026	98	467	0.1532	13.6428	177	843	0.2766	75.0580
20	5	0.0016	0.0043	99	471	0.1546	13.7973	178	886	0.2907	75.3487
21	6	0.0020	0.0062	100	474	0.1555	13.9528	179	905	0.2970	75.6457
22	22	0.0072	0.0135	101	474	0.1555	14.1084	180	849	0.2786	75.9243
23	16	0.0053	0.0187	102	501	0.1644	14.2728	181	898	0.2914	76.2156
24	23	0.0075	0.0263	103	498	0.1634	14.4362	182	840	0.2756	76.4913
25	35	0.0115	0.0377	104	532	0.1746	14.6108	183	884	0.2901	76.7813
26	20	0.0066	0.0443	105	505	0.1657	14.7765	184	883	0.2897	77.0711
27	16	0.0053	0.0495	106	483	0.1585	14.9349	185	828	0.2717	77.3428
28	6	0.0020	0.0515	107	543	0.1782	15.1131	186	837	0.2746	77.6174
29	4	0.0013	0.0528	108	489	0.1605	15.2736	187	892	0.2927	77.9101
30	19	0.0062	0.0591	109	490	0.1608	15.4344	188	826	0.2710	78.1812
31	42	0.0138	0.0728	110	536	0.1759	15.6102	189	832	0.2730	78.4542
32	69	0.0226	0.0955	111	522	0.1713	15.7815	190	886	0.2907	78.7449
33	45	0.0148	0.1103	112	618	0.2028	15.9843	191	845	0.2773	79.0222
34	462	0.1516	0.2618	113	635	0.2084	16.1927	192	811	0.2661	79.2883
35	1548	0.5079	0.7698	114	702	0.2303	16.4230	193	831	0.2727	79.5610
36	831	0.2727	1.0425	115	758	0.2487	16.6718	194	788	0.2586	79.8195
37	735	0.2412	1.2837	116	748	0.2454	16.9172	195	774	0.2540	80.0735
38	950	0.3117	1.5954	117	881	0.2891	17.2063	196	744	0.2441	80.3176
39	1085	0.3560	1.9514	118	1002	0.3288	17.5351	197	746	0.2448	80.5624
40	973	0.3193	2.2707	119	1177	0.3862	17.9213	198	718	0.2356	80.7980
41	706	0.2317	2.5023	120	1167	0.3829	18.3042	199	717	0.2353	81.0333
42	649	0.2130	2.7153	121	1132	0.3714	18.6757	200	733	0.2405	81.2738
43	669	0.2195	2.9348	122	1346	0.4417	19.1173	201	688	0.2258	81.4996
44	859	0.2819	3.2167	123	1671	0.5483	19.6656	202	718	0.2356	81.7352
45	949	0.3114	3.5281	124	2777	0.9112	20.5769	203	713	0.2340	81.9691
46	798	0.2618	3.7899	125	3827	1.2558	21.8326	204	709	0.2326	82.2018
47	781	0.2563	4.0462	126	3338	1.0953	22.9279	205	735	0.2412	82.4429
48	997	0.3271	4.3733	127	3753	1.2315	24.1594	206	788	0.2586	82.7015
49	1162	0.3813	4.7546	128	4151	1.3621	25.5215	207	717	0.2353	82.9368
50	712	0.2336	4.9883	129	4238	1.3906	26.9121	208	704	0.2310	83.1678
51	761	0.2497	5.2380	130	3558	1.1675	28.0796	209	766	0.2513	83.4191
52	685	0.2248	5.4627	131	3709	1.2170	29.2966	210	765	0.2510	83.6702
53	633	0.2077	5.6705	132	3943	1.2938	30.5905	211	744	0.2441	83.9143
54	578	0.1897	5.8601	133	4171	1.3686	31.9591	212	740	0.2428	84.1571
55	482	0.1582	6.0183	134	4583	1.5038	33.4629	213	688	0.2258	84.3829
56	521	0.1710	6.1892	135	5318	1.7450	35.2080	214	700	0.2297	84.6126
57	568	0.1864	6.3756	136	5592	1.8349	37.0429	215	821	0.2694	84.8820
58	537	0.1762	6.5518	137	8933	2.8912	39.9741	216	780	0.2559	85.1379
59	503	0.1651	6.7169	138	11711	3.8428	43.8168	217	765	0.2510	85.3889
60	512	0.1680	6.8849	139	9153	3.0034	46.8202	218	757	0.2484	85.6373
61	524	0.1719	7.0668	140	8533	2.8000	49.6202	219	800	0.2625	85.8998
62	576	0.1890	7.2458	141	5839	1.9160	51.5362	220	856	0.2809	86.1807
63	526	0.1726	7.4184	142	3746	1.2292	52.7653	221	966	0.3170	86.4977
64	609	0.1998	7.6183	143	3236	1.0818	53.8272	222	849	0.2786	86.7763
65	528	0.1733	7.7915	144	2166	0.7107	54.5379	223	812	0.2664	87.0427
66	529	0.1736	7.9651	145	2233	0.7327	55.2706	224	814	0.2671	87.3098
67	634	0.2080	8.1731	146	2271	0.7452	56.0158	225	886	0.2907	87.6005
68	708	0.2323	8.4054	147	2193	0.7196	56.7354	226	890	0.2920	87.8926
69	704	0.2310	8.6364	148	2249	0.7380	57.4734	227	946	0.3104	88.2030
70	742	0.2435	8.8799	149	2318	0.7606	58.2340	228	980	0.3216	88.5246
71	740	0.2428	9.1227	150	2488	0.8164	59.0504	229	1020	0.3347	88.8592
72	773	0.2536	9.3764	151	2569	0.8430	59.8934	230	1004	0.3294	89.1887
73	816	0.2678	9.6441	152	2398	0.7869	60.6802	231	1008	0.3308	89.5195
74	764	0.2507	9.8948	153	2274	0.7462	61.4264	232	1107	0.3632	89.8827
75	732	0.2402	10.1350	154	2191	0.7189	62.1453	233	1214	0.3984	90.2810
76	693	0.2274	10.3624	155	2093	0.6868	62.8321	234	1287	0.4223	90.7034
77	689	0.2261	10.5885	156	1925	0.6317	63.4638	235	1336	0.4384	91.1417
78	476	0.1562	10.7447	157	1952	0.6405	64.1043	236	1386	0.4548	91.5965
79	568	0.1864	10.9311	158	1807	0.5929	64.6972	237	1539	0.5050	92.1015
80	484	0.1523	11.0833	159	1816	0.5959	65.2931	238	1709	0.5608	92.6623
81	465	0.1526	11.2359	160	1839	0.6034	65.8965	239	1818	0.5965	93.2588
82	398	0.1306	11.3665	161	1905	0.6251	66.5216	240	2138	0.7015	93.9604
83	415	0.1362	11.5027	162	1883	0.6179	67.1395	241	2257	0.7406	94.7010
84	381	0.1250	11.6277	163	1963	0.6441	67.7836	242	2387	0.7833	95.4842
85	438	0.1437	11.7714	164	1969	0.6461	68.4297	243	2559	0.8397	96.3239
86	395	0.1296	11.9010	165	1851	0.6074	69.0371	244	2238	0.7344	97.0583
87	383	0.1257	12.0267	166	2132	0.6996	69.7367	245	2136	0.7009	97.7592
88	350	0.1148	12.1416	167	2138	0.7015	70.4382	246	1851	0.6074	98.3666
89	385	0.1263	12.2679	168	2058	0.6753	71.1135	247	1482	0.4863	98.8528
90	445	0.1480	12.4139	169	1987	0.6520	71.7655	248	1592	0.5224	99.3752
91	495	0.1624	12.5763	170	1759	0.5772	72.3427	249	1184	0.3985	99.7637
92	483	0.1585	12.7348	171	1626	0.5335	72.8762	250	443	0.1454	99.9091
93	453	0.1486	12.8835	172	1575	0.5168	73.3931	251	158	0.0518	99.9610
94	476	0.1562	13.0397	173	1219	0.4000	73.7930	252	89	0.0292	99.9902
95	448	0.1470	13.1867	174	1078	0.3537	74.1468	253	30	0.0098	100.0000
96	422	0.1385	13.3251	175	1007	0.3304	74.4772				

Tabla A 4.5 Histograma del mapa de áreas adecuadas de amaranto

Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de pixele	% relativo	% acumulado
11	12	0.0039	0.0039	90	1411	0.4630	33.9929	169	1514	0.50	80.1654
12	2	0.0007	0.0046	91	2361	0.7747	34.7676	170	1535	0.50	80.6891
13	0	0.0000	0.0046	92	1449	0.4755	35.2431	171	1592	0.52	81.1914
14	0	0.0000	0.0046	93	1438	0.4719	35.7149	172	1731	0.57	81.7594
15	75	0.0246	0.0292	94	1006	0.3301	36.0450	173	1948	0.64	82.3986
16	50	0.0164	0.0458	95	1431	0.4696	36.5146	174	2067	0.68	83.0769
17	24	0.0079	0.0535	96	1150	0.3774	36.8919	175	2441	0.80	83.8779
18	26	0.0085	0.0620	97	2479	0.8134	37.7054	176	2410	0.79	84.6687
19	31	0.0102	0.0722	98	1204	0.3951	38.1004	177	2695	0.88	85.5530
20	359	0.1178	0.1900	99	1177	0.3862	38.4867	178	2657	0.87	86.4248
21	162	0.0532	0.2431	100	1008	0.3308	38.8174	179	2345	0.77	87.1943
22	224	0.0735	0.3166	101	1209	0.3967	39.2141	180	2458	0.81	88.0009
23	138	0.0453	0.3619	102	1366	0.4482	39.6624	181	2338	0.77	88.7680
24	105	0.0345	0.3964	103	1090	0.3577	40.0200	182	2505	0.82	89.5900
25	380	0.1247	0.5211	104	2620	0.8597	40.8797	183	1855	0.61	90.1987
26	352	0.1155	0.6366	105	1479	0.4853	41.3650	184	1318	0.43	90.6312
27	419	0.1375	0.7741	106	1186	0.3892	41.7542	185	1386	0.45	91.0860
28	353	0.1158	0.8899	107	1126	0.3695	42.1237	186	914	0.30	91.3859
29	928	0.3045	1.1944	108	1068	0.3504	42.4741	187	880	0.29	91.6746
30	655	0.2149	1.4093	109	1163	0.3816	42.8557	188	885	0.29	91.9650
31	8024	2.6329	4.0423	110	1385	0.4545	43.3102	189	826	0.27	92.2361
32	2641	0.8666	4.9089	111	1113	0.3652	43.6754	190	754	0.25	92.4835
33	1918	0.6294	5.5382	112	2381	0.7813	44.4567	191	646	0.21	92.6954
34	1518	0.4981	6.0363	113	2112	0.6930	45.1497	192	659	0.22	92.9117
35	1105	0.3626	6.3989	114	1284	0.4213	45.5710	193	848	0.28	93.1899
36	1271	0.4171	6.8160	115	1219	0.4000	45.9710	194	803	0.26	93.4534
37	1029	0.3376	7.1536	116	1147	0.3764	46.3474	195	795	0.26	93.7143
38	986	0.3235	7.4772	117	1346	0.4417	46.7891	196	797	0.26	93.9758
39	774	0.2540	7.7311	118	1198	0.3931	47.1822	197	704	0.23	94.2068
40	650	0.2133	7.9444	119	1662	0.5454	47.7275	198	725	0.24	94.4447
41	594	0.1949	8.1393	120	1333	0.4374	48.1649	199	740	0.24	94.6875
42	1055	0.3462	8.4855	121	3419	1.1219	49.2868	200	703	0.23	94.9182
43	847	0.2779	8.7634	122	1724	0.5657	49.8525	201	705	0.23	95.1495
44	896	0.2940	9.0574	123	1626	0.5335	50.3860	202	619	0.20	95.3527
45	827	0.2714	9.3288	124	1517	0.4978	50.8838	203	680	0.22	95.5758
46	794	0.2605	9.5893	125	1400	0.4594	51.3432	204	721	0.24	95.8124
47	654	0.2146	9.8039	126	1754	0.5755	51.9188	205	731	0.24	96.0522
48	608	0.1995	10.0034	127	1782	0.5847	52.5035	206	669	0.22	96.2718
49	961	0.3153	10.3188	128	3235	1.0615	53.5650	207	690	0.23	96.4982
50	871	0.2858	10.6046	129	2766	0.9076	54.4726	208	777	0.25	96.7531
51	784	0.2573	10.8618	130	1873	0.6146	55.0872	209	709	0.23	96.9858
52	630	0.2067	11.0686	131	1926	0.6320	55.7192	210	619	0.20	97.1889
53	574	0.1883	11.2569	132	1616	0.5299	56.2491	211	551	0.18	97.3897
54	571	0.1874	11.4443	133	1547	0.5076	56.7567	212	551	0.18	97.5505
55	563	0.1847	11.6290	134	2691	0.9814	57.7382	213	532	0.17	97.7251
56	594	0.1949	11.8239	135	3365	1.1042	58.8423	214	495	0.16	97.8875
57	595	0.1952	12.0192	136	2305	0.7563	59.5987	215	447	0.15	98.0342
58	1030	0.3380	12.3571	137	2316	0.7600	60.3586	216	405	0.13	98.1671
59	671	0.2202	12.5773	138	3455	1.1337	61.4923	217	417	0.14	98.3039
60	607	0.1992	12.7765	139	5965	1.9573	63.4497	218	401	0.13	98.4355
61	537	0.1762	12.9527	140	7161	2.3498	65.7994	219	387	0.13	98.5625
62	600	0.1969	13.1496	141	6925	2.2723	68.0717	220	354	0.12	98.6786
63	581	0.1906	13.3402	142	4604	1.5107	69.5825	221	337	0.11	98.7892
64	549	0.1801	13.5204	143	1410	0.4627	70.0451	222	329	0.11	98.8971
65	871	0.2858	13.8062	144	1124	0.3688	70.4139	223	309	0.10	98.9885
66	1085	0.3560	14.1622	145	1067	0.3501	70.7641	224	290	0.10	99.0937
67	713	0.2340	14.3982	146	969	0.3180	71.0820	225	289	0.09	99.1820
68	795	0.2609	14.6570	147	891	0.2924	71.3744	226	223	0.07	99.2551
69	839	0.2753	14.9323	148	924	0.3032	71.6776	227	223	0.07	99.3283
70	1034	0.3393	15.2716	149	852	0.2796	71.9571	228	241	0.08	99.4074
71	982	0.3222	15.5938	150	825	0.2707	72.2279	229	251	0.08	99.4898
72	1003	0.3291	15.9230	151	899	0.2950	72.5228	230	261	0.09	99.5754
73	1449	0.4755	16.3984	152	893	0.2930	72.8159	231	234	0.08	99.6522
74	2035	0.6677	17.0662	153	913	0.2996	73.1155	232	224	0.07	99.7257
75	1468	0.4817	17.5479	154	879	0.2884	73.4039	233	188	0.06	99.7874
76	1226	0.4023	17.9502	155	1048	0.3439	73.7478	234	150	0.05	99.8366
77	1253	0.4111	18.3613	156	1172	0.3846	74.1323	235	108	0.04	99.8720
78	1052	0.3452	18.7065	157	1275	0.4184	74.5507	236	100	0.03	99.9048
79	1473	0.4833	19.1898	158	1330	0.4364	74.9871	237	100	0.03	99.9377
80	1294	0.4246	19.6144	159	1305	0.4282	75.4153	238	80	0.03	99.9639
81	1332	0.4371	20.0515	160	1348	0.4423	75.8577	239	47	0.02	99.9793
82	1883	0.6179	20.6694	161	1475	0.4840	76.3417	240	44	0.01	99.9938
83	5969	1.9586	22.6280	162	1381	0.4532	76.7948	241	16	0.01	99.9990
84	4397	1.4428	24.0708	163	1361	0.4466	77.2414	242	1	0.00	99.9993
85	11201	3.6754	27.7462	164	1468	0.4817	77.7231	243	0	0.00	99.9993
86	7529	2.4705	30.2167	165	1584	0.5198	78.2429	244	0	0.00	99.9993
87	5092	1.6709	31.8876	166	1354	0.4443	78.6871	245	0	0.00	99.9993
88	2928	0.9608	32.8484	167	1498	0.4915	79.1787	246	0	0.00	99.9993
89	2077	0.6815	33.5299	168	1493	0.4899	79.6686	247	2	0.00	100.0000

Tabla A 4.6 Histograma del mapa de áreas adecuadas de nopal

Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado	Valor asignado	Núm. de píxeles	% relativo	% acumulado
15	16	0.0053	0.0053	92	3238	1.0625	39.8884	169	900	0.2953	64.3612
16	21	0.0069	0.0121	93	1428	0.4686	40.3570	170	968	0.3176	64.6788
17	12	0.0039	0.0161	94	1214	0.3984	40.7554	171	994	0.3282	65.0050
18	14	0.0046	0.0207	95	1155	0.3790	41.1344	172	998	0.3275	65.3325
19	8	0.0026	0.0233	96	1229	0.4033	41.5376	173	954	0.3130	65.6455
20	24	0.0079	0.0312	97	1151	0.3777	41.9153	174	1056	0.3465	65.9920
21	27	0.0089	0.0400	98	1221	0.4006	42.3160	175	1102	0.3616	66.3536
22	59	0.0194	0.0594	99	1117	0.3665	42.6825	176	1166	0.3826	66.7362
23	20	0.0066	0.0660	100	1130	0.3708	43.0533	177	1210	0.3970	67.1333
24	48	0.0158	0.0817	101	1016	0.3334	43.3867	178	1067	0.3501	67.4834
25	219	0.0719	0.1536	102	1010	0.3314	43.7181	179	1105	0.3626	67.8460
26	390	0.1280	0.2815	103	1048	0.3439	44.0620	180	1092	0.3583	68.2043
27	233	0.0765	0.3580	104	1019	0.3344	44.3963	181	1215	0.3987	68.6030
28	260	0.0853	0.4433	105	1105	0.3626	44.7589	182	1236	0.4056	69.0085
29	143	0.0469	0.4902	106	1064	0.3491	45.1080	183	1159	0.3803	69.3889
30	168	0.0551	0.5454	107	1155	0.3790	45.4870	184	1178	0.3865	69.7754
31	757	0.2484	0.7938	108	1388	0.4554	45.9425	185	1213	0.3980	70.1734
32	1119	0.3672	1.1609	109	1343	0.4407	46.3832	186	1261	0.4138	70.5872
33	633	0.2077	1.3686	110	1143	0.3751	46.7582	187	1907	0.6257	71.2129
34	396	0.1299	1.4986	111	1044	0.3426	47.1008	188	1377	0.4518	71.6648
35	937	0.3075	1.8060	112	1015	0.3331	47.4338	189	1410	0.4627	72.1274
36	1781	0.5844	2.3904	113	986	0.3268	47.7807	190	1426	0.4679	72.5954
37	6089	1.9980	4.3884	114	1057	0.3501	48.1108	191	1998	0.6550	73.2503
38	6819	2.2375	6.6260	115	947	0.3107	48.4215	192	1596	0.5237	73.7740
39	7123	2.3373	8.9633	116	956	0.3137	48.7352	193	2002	0.6569	74.4309
40	4078	1.3381	10.3014	117	1048	0.3439	49.0791	194	1640	0.5381	74.9691
41	1917	0.6290	10.9304	118	993	0.3258	49.4049	195	1672	0.5486	75.5177
42	1528	0.5014	11.4318	119	976	0.3203	49.7252	196	1680	0.5513	76.0690
43	1538	0.5047	11.9365	120	955	0.3134	50.0386	197	1714	0.5624	76.6314
44	1431	0.4696	12.4060	121	954	0.3130	50.3516	198	1756	0.5762	77.2076
45	1316	0.4318	12.8379	122	894	0.2934	50.6449	199	1886	0.6123	77.8199
46	1607	0.5273	13.3652	123	833	0.2733	50.9183	200	1955	0.6415	78.4614
47	1817	0.5962	13.9614	124	890	0.2920	51.2103	201	2147	0.7045	79.1659
48	1303	0.4276	14.3889	125	863	0.2832	51.4935	202	2001	0.6566	79.8225
49	1330	0.4364	14.8254	126	840	0.2756	51.7691	203	2305	0.7563	80.5788
50	717	0.2353	15.0606	127	813	0.2668	52.0359	204	2385	0.7826	81.3614
51	585	0.1920	15.2526	128	808	0.2651	52.3010	205	2389	0.7839	82.1453
52	576	0.1890	15.4416	129	802	0.2632	52.5642	206	2634	0.8643	83.0096
53	552	0.1811	15.6227	130	810	0.2658	52.8300	207	2832	0.9293	83.9389
54	561	0.1841	15.8068	131	842	0.2763	53.1063	208	2569	0.8430	84.7819
55	533	0.1749	15.9817	132	883	0.2897	53.3960	209	3037	0.9665	85.7784
56	527	0.1729	16.1546	133	928	0.3045	53.7005	210	3188	1.0461	86.8245
57	814	0.2671	16.4217	134	953	0.3127	54.0132	211	2839	0.9316	87.7561
58	810	0.2658	16.6875	135	873	0.2865	54.2997	212	2710	0.8892	88.6453
59	650	0.2133	16.9008	136	910	0.2986	54.5983	213	3204	1.0513	89.6966
60	602	0.1975	17.0983	137	938	0.3078	54.9061	214	2978	0.9772	90.6738
61	656	0.2153	17.3136	138	939	0.3081	55.2142	215	2575	0.8449	91.5188
62	747	0.2451	17.5587	139	974	0.3196	55.5338	216	2293	0.7524	92.2712
63	741	0.2431	17.8018	140	938	0.3078	55.8416	217	1970	0.6464	92.9176
64	767	0.2517	18.0535	141	943	0.3094	56.1510	218	1777	0.5631	93.5007
65	738	0.2422	18.2957	142	940	0.3084	56.4595	219	1527	0.5011	94.0017
66	762	0.2500	18.5457	143	932	0.3058	56.7653	220	1904	0.6248	94.6265
67	931	0.3055	18.8512	144	1002	0.3288	57.0941	221	1993	0.6540	95.2805
68	1807	0.5929	19.4441	145	1021	0.3350	57.4291	222	1638	0.5375	95.8180
69	1850	0.6070	20.0512	146	979	0.3212	57.7503	223	1133	0.3718	96.1897
70	1948	0.6392	20.6904	147	929	0.3048	58.0552	224	1073	0.3521	96.5418
71	1398	0.4587	21.1491	148	921	0.3022	58.3574	225	1017	0.3337	96.8755
72	1172	0.3846	21.5337	149	903	0.2963	58.6537	226	943	0.3094	97.1850
73	1076	0.3531	21.8868	150	956	0.3137	58.9674	227	711	0.2333	97.4183
74	1048	0.3439	22.2308	151	937	0.3075	59.2748	228	634	0.2080	97.6263
75	1111	0.3646	22.5952	152	868	0.2848	59.5596	229	672	0.2205	97.8468
76	1030	0.3380	22.9332	153	880	0.2888	59.8484	230	702	0.2303	98.0771
77	1251	0.4105	23.3437	154	795	0.2609	60.1093	231	694	0.2277	98.3049
78	2531	0.8305	24.1742	155	964	0.3163	60.4256	232	815	0.2674	98.5723
79	2651	0.8699	25.0441	156	863	0.2832	60.7088	233	659	0.2162	98.7885
80	4639	1.5222	26.5663	157	865	0.2838	60.9926	234	447	0.1487	98.9352
81	5908	1.9386	28.5049	158	837	0.2746	61.2672	235	445	0.1460	99.0812
82	6173	2.0256	30.5304	159	847	0.2779	61.5452	236	392	0.1286	99.2099
83	3237	1.0622	31.5926	160	889	0.2917	61.8369	237	357	0.1171	99.3270
84	2477	0.8128	32.4054	161	815	0.2674	62.1043	238	428	0.1404	99.4674
85	2631	0.8633	33.2687	162	822	0.2697	62.3740	239	535	0.1756	99.6430
86	2803	0.9198	34.1884	163	911	0.2989	62.6730	240	535	0.1756	99.8185
87	2505	0.8220	35.0104	164	836	0.2743	62.9473	241	414	0.1358	99.9544
88	2906	0.9536	35.9640	165	825	0.2707	63.2180	242	69	0.0226	99.9770
89	2546	0.8354	36.7994	166	838	0.2750	63.4930	243	68	0.0223	99.9993
90	3150	1.0338	37.8330	167	847	0.2779	63.7709	244	0	0.0000	99.9993
91	3026	0.9929	38.8259	168	899	0.2950	64.0659	245	2	0.0007	100.0000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Anexo 5



ELSEVIER

AGRICULTURAL
SYSTEMS

Agricultural Systems 0 (0000) 0-0

www.elsevier.com/locate/agry

Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico

Alejandro Ceballos-Silva*, Jorge López-Blanco

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Av. Epitacio Ibarra 19, Col. Roma de Tercera, CP 06310, México, D.F.

Received 28 August 2001; received in revised form 31 May 2002; accepted 4 July 2002

Abstract

The application of a Multi-Criteria Evaluation (MCE) approach to identify suitable areas for the production of maize and potato crops in Central Mexico is presented. Maize and potato are the most important crops in the Rural Development District of Toluca (RDDT). Climate, relief and soil databases were used to integrate GIS raster coverages. Relevant criteria for crops and suitability levels were defined. This information was used to obtain the criteria maps, which in turn, were used as input into the MCE algorithm. Several decision support procedures in the Idrisi GIS environment were applied to obtain the suitability maps for each crop. A 1996 Landsat TM image was processed using GIS capabilities by means of a supervised classification to obtain a land use/cover map. These land use/cover and the suitability maps were crossing to identify differences and similarities between the present land use in the suitable areas for the maize and potato crops.

Keywords: Multi-Criteria Evaluation; Land use/cover mapping; GIS; Maize; Potato; Toluca; Mexico

* Corresponding author. Fax: +52-55-56162145.

E-mail addresses: cebal@botmail.com (A. Ceballos-Silva), jblanco@servidor.unam.mx (J. López-Blanco).

A. Ceballos-Silva, J. López-Blanco / *Agricultural Systems* 0 (0000) 0-0

1. Introduction

Multi-Criteria decision-making could be understood as a world of concepts, approaches, models and methods that aid an evaluation (expressed by weights, values or intensities of preference) according to several criteria (Barredo, 1996). The main purpose of the Multi-Criteria Evaluation (MCE) techniques is to investigate a number of alternatives in the light of multiple criteria and conflicting objectives (Voogd, 1983). In order to carry that out, it is necessary to generate compromise alternatives and a ranking of alternatives according to their degree of attractiveness (Janssen and Rietveld, 1990).

Geographic information systems (GIS) have been used for the site-selection of areas such as: service facilities, recreational activities, retail outlets, hazardous waste disposal sites and critical areas for specific resource management and control practices (Jankowsky, 1995). However, the utility or GIS functionality in the management of the above areas has been limited by the restrictions inherent in overlaying of digital information maps. Some of these restrictions are: (1) overlays are difficult to use when there are many underlying variables (more than 4), (2) the overlay procedure does not enable one to take into account that the underlying variables are not of equal importance (Janssen and Rietveld, 1990). The integration of analytic techniques designed to work with MCE problems within GIS could give more functionality to the user (Carver, 1991). GIS are very useful for storing, processing and manipulating spatial databases (Aronoff, 1989). Consequently, the integration of MCE within a GIS context could help users to improve decision making processes. In the last decade MCE has received renewed attention in the context of a GIS-based decision making (Pereira and Duckstein, 1993; Heywood et al., 1993; Malczewsky, 1996). That combination could be useful in solving conflictive situations for individual or groups interested in spatial context (Malczewsky, 1996; Janssen and Rietveld, 1990) and it is also a powerful approach to land suitability assessments (Joerin et al., 2001).

Furthermore, the classification of a study area into different land use/cover types, is one of the primary objectives of studies that use remote sensing technology (Moreno, 1991). Applications of remote sensing in agriculture include several aspects such as plant phenology, economic features, and landuse management. These applications have been playing an important role and suggest that remote sensing technology is and will be a powerful tool for monitoring agricultural activities (Allan, 1990). Remote sensing can be used as a tool to gather a data set for use in a GIS context (Wilkinson, 1996), this paper will outline one way in which remote sensing and GIS technologies are complementary.

In several parts of Mexico, cities and industrial areas are expanding into currently productive agricultural areas (Aguilera, 1986; Valverde and Cárdenas, 2001). Considering that, it is necessary to obtain landuse information by using Landsat TM data to construct databases that can be used to identify suitable areas for crops (maize and potato in this study).

The accurate identification and the characterization of current production areas and potential areas are essential to agricultural research and development (Corbett,

1996). Besides, agriculture is one of the most important activities of natural system use. This use must be done only in suitable areas for this economic activity (García et al., 2000). Additionally, suitable areas for agricultural use are determined by an evaluation of the climate, soil, and relief environment components, and the understanding of local biophysical restraints. In this kind of evaluation, many variables are involved and each one should be weighting according to their relative importance on the optimal growth conditions for crops. In this research, that issue was expressed as Multi-Criteria decision problem because several criteria (with different relative importance) should be evaluated. Besides through MCE and GIS combination eventually a map or set of maps of suitability index could be generated (Joerin et al., 2001). In this context, MCE seems to be applicable to GIS-based land suitability analysis (Petra and Duckstein, 1993) and help us to carry out the delineation of suitable areas for crops. In Mexico, García (1999) demonstrated the utility of the fuzzy approach to determine the suitability of land for several crops. However, MCE-GIS integration has not been utilized in Mexico to solve problems related to agricultural topics, such as in the case of identifying suitable areas for specific crops. The main goal of this research is to delineate the suitable areas for the maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) crops through the MCE technique within a GIS context, using a 1996 Landsat TM image and climate, relief and soil databases in the RDDT, Central Mexico.

2. Methods

2.1. Study area

One of the most important areas for crop production in Mexico is the RDDT (SAGARPA, 2000). This area is located between latitude 19°01' N and 19°31' N and longitude 99°15' W and 99°57' W (Fig. 1). The site is characterized geomorphologically as an elongated tectonic depression (in the North-South direction) filled with alluvial and lacustrine sediments. This depression is limited by a series of regional tectonic faults that are mainly expressed as massive Early Pleistocene volcanic ridges. It is a gently sloping alluvial-lacustrine plain, in the uppermost watershed portion of the Lerma-Chapala River Basin. The Nevado de Toluca Volcano, which is one of the biggest stratovolcanoes of the Trans-Mexican Volcanic Belt and is 4640 m above sea level (masl) is also located in this area. The RDDT is dominated by three climatic types: temperate sub-humid, temperate semi-cold and sub-humid and cold (mean annual temperature between -2 to 5 °C; HINGEC, 1993). The altitude ranges between 1800 and 4640 masl. The natural vegetation is predominantly pine forest, mixed forest (oak-pine) and *Abies* forest. The forests are interspersed with areas of induced grass and high mountain vegetation (HIGEC, 1993). The total area of the RDDT is approximately 302,604 ha (SEDAGRO, 1997), of which 153,462 ha (50.7%) is used for agriculture, 20,796 ha (6.9%) is used for cattle, 81,124 ha (26.8%) is covered forest, and 47,222 ha (15.6%) has other land cover. Most of the area is used for rain agriculture, such as maize which is the principal

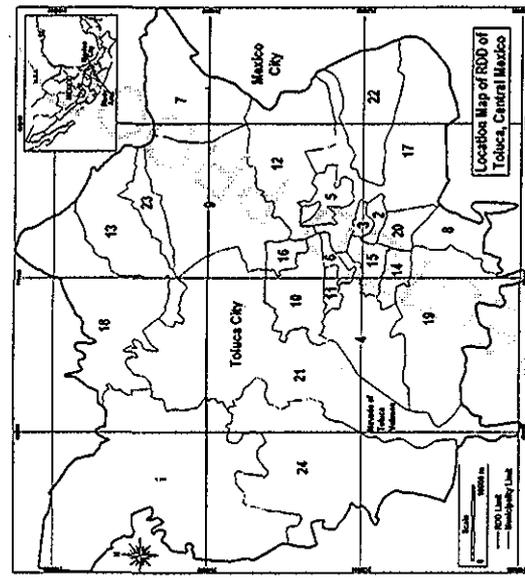


Fig. 1. Location of the RDDT, Central Mexico. Key of municipalities is as follows: 1 = Almoloya de Juárez, 2 = Almoloya del Río, 3 = Atlixpan, 4 = Calimaya, 5 = Capulhuac, 6 = Chapultepec, 7 = Huacahuacán, 8 = Joquicingo, 9 = Lerma, 10 = Metepec, 11 = Mexcala, 12 = Ocoyoacac, 13 = Otzolotepec, 14 = Rayón, 15 = San Antonio la Elia, 16 = San Mateo Atenco, 17 = San Mateo Tlaxiaco, 18 = Temoyuca, 19 = Tezcuayucan, 20 = Tezcuayucan, 21 = Toluca, 22 = Xicoatlaco, 23 = Xicoatlaco, 24 = Zinacantan.

crop with 119,610 ha, that represent approximately 39% of the study area (SAGARPA, 2000), oats (4238 ha), potato (1950 ha), wheat (1183 ha) and others (4214 ha). The municipalities with the largest agricultural areas are Almoloya de Juárez, Toluca, Tenango del Valle, Zinacantan, Lerma and Calimaya (SAGARPA, 2000; Fig. 1).

Maize and potato are some of the most important crops in the RDDT (SAGARPA, 2000). Maize is an important foodstuff in Mexico and in this study area because it forms a large component of the daily diet of many people (INIFAP, 1998a). Furthermore, the potato is very important to industry and to the home consumer as well (INIFAP, 1998b), the production of this crop was 42,918 t (SAGARPA, 2000). Therefore, maize and potato were included in this research due to their economic importance.

02

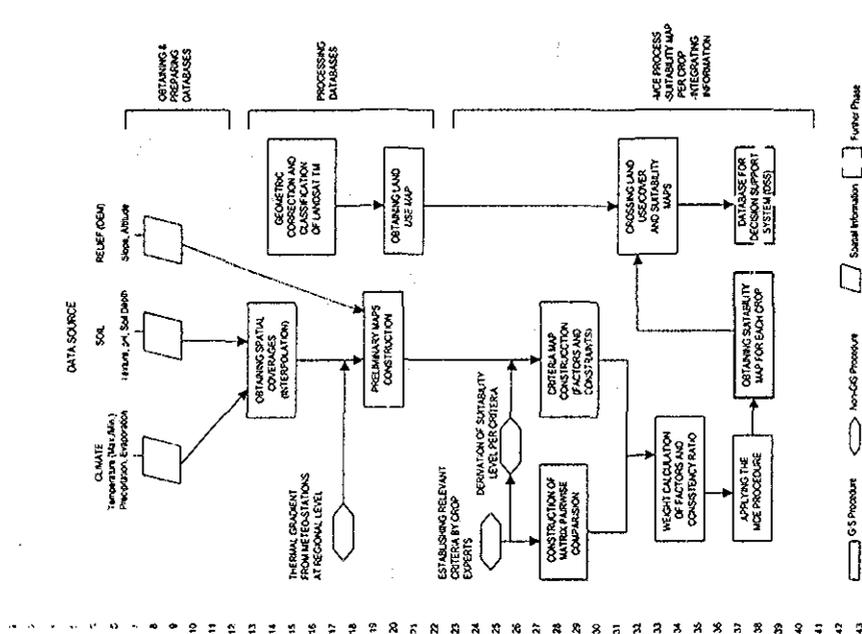


Fig. 2. This flow chart shows the main procedures applied in the Multi-Criteria Evaluation (MCE) approach.

The general procedure that we followed in this paper can be outlined as follows (see Fig. 2): (1) Selection of climate and soil variables according to the criteria of (a) Significant variables for maize and potato crops and (b) Available databases. Obtaining and preparing climate and soil databases, as well as checking them in order to eliminate data errors. (2) Interpolation from climate and soil point databases, and adjustment of temperature maps using the calculated thermal gradient for our study area. Digital processing of the Landsat TM image. (3) Integrating MCE and Landsat TM land use-cover information, which involved overlaying the suitable maps per crop and the land use/cover map.

2.2. Climate database

Climate information was obtained from 35 meteorological stations located within and close to the study area. The number of recorded years was different for each station and ranged between 24 and 42 years. Data errors and non-useful information were eliminated and the missing values were estimated. The variables taken into account were maximum and minimum daily temperature, daily precipitation and daily evaporation. For the case of maize, a precipitation/evaporation index was obtained as well.

For the four variables mentioned above, averages for each ten-day period were obtained for all the recorded years. This process resulted in 36 data points per station, which were used to obtain 36 ten-day maps per variable. The maps were constructed by means of a distance-weighted average interpolation procedure within IDRISI (Eastman, 1997). This technique was chosen because it is a simple and accurate mathematical process of estimating the "height" of a surface at locations where that height is unknown (Eastman, 1997; Bosque, 1992).

The 10-day maps of maximum and minimum temperature were corrected for elevation (Corbett, 1996). First, a regression model was carried out using temperature and altitude values from stations located in similar zones to the RDDT. An adjustment factor for temperature was derived from a thermal gradient formula (García, 1989), and then applied to each pixel of the temperature maps (maximum and minimum).

2.3. Soil database

Soil information was obtained from several sources. In particular the available soil type maps at 1:50,000 scale were digitized (from INEGI, several dates), with the main aim to obtain information about soil depth. Information about the soil conditions (pH; sand, silt and clay) at 1-km grid sampling points was obtained within the agricultural lands of the study area (INIFAP, 1994). Due to inconsistencies in the grid soil sampling database, some data were eliminated; the total number of point data varied from 1124 (pH) to 1128 (sand, silt and clay). Sand, silt and clay maps were made by means of an interpolation procedure within IDRISI. Besides a soil texture class map was obtained. The UTM coordinate system was used to locate geographic elements on the maps.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2.4. Relief database

The slope (expressed as a percentage) and the altitude information were obtained from the digital elevation model (DEM) using two well-known GIS software packages, ILWIS (ITC, 1998) and IDRISI. We used a 3-s arc DTM resolution in geographic coordinates (sexagesimal units). Our spatial resolution was consequently approximately to 90 m per pixel.

2.5. Image processing

In order to obtain current landuse information, a Landsat TM image from 1996 was processed (Bands 1-5 and 7). A subimage array of 2318 x 2410 cells with a spatial resolution of 30 m pixel size was used. That subimage was georeferenced using a set of 72 control points located in the topographic map considering its UTM coordinate system. The sigma value in assigning coordinates in that procedure was 0.73 pixel rms error. Principal component analysis (PCA) was performed to determine which bands caused the most data variability. A supervised classification of the subimage was applied, considering several spectral classes, training areas and two color-composites (bands 4-3-1 and Bands 5-3-1). Moreover, several algorithms and clustering thresholds were used.

This classification was evaluated by obtaining a classification error matrix and by assessing its accuracy (Lillesand and Kiefer, 1994). The error matrix was obtained by means of an ILWIS procedure. From this, a pixel value table of each map and its corresponding sum of pixels was obtained. In order to homogenize the spatial resolution, the landuse map obtained was resampled at a 90 m pixel resolution.

2.6. MCE

The general procedure of MCE included several phases, as explained in the following paragraphs. First, the relevant criteria (factors and constraints; Eastman et al., 1995) were established. Factors established in this phase are not unique, but they are the most relevant. Expert opinion of each crop and a bibliography revision was very important in this phase. Relevant factors for maize were: Maximum and Minimum Temperature, Precipitation/Evaporation index, Soil pH, Soil Texture Class, Soil Depth, Altitude and Slope (Juguenheimer, 1970; Llanos, 1984; Turrent, 1986; Shrader and Pierre, 1967; Shaw, 1988). For the potato crop the following factors were selected: Maximum and Minimum Temperature, Precipitation, Soil Texture Class, Soil Depth, Altitude and Slope (Bouwkamp, 1985; Montaldo, 1984; Smith, 1977).

Suitability levels for each of the factors were defined, these levels were used as a base to construct the criteria maps (one for each factor). The levels were: 5 (very high suitability), 4 (high suitability), 3 (medium suitability), 2 (low suitability), and 1 (very low suitability). According to the experts' opinion and the bibliography revision, a specific suitability level per factor for maize and potato were defined (Tables 1 and 2).

A. Cobaltes-Silva, J. López-Blanco / Agricultural Systems 61 (1998) 201-211

Table 1
Specific suitability level per factor for the maize crop

Factor	Level of suitability			
	Very high	High	Medium	Low
Minimum temperature (°C)	> 6.5	5.0-6.5	3.5-5.0	2.0-3.5
PIE index	1.4-2.0	> 2.0	1.3-1.4	1.2-1.3
Depth soil (m)	> 1.0	0.5-1.0	0.1-0.5	< 0.1
Soil texture class	Loam	Sandy loam	Sandy clay loam	Clay loam
pH soil	6.0-7.5	5.8-6.0	5.6-5.8	5.4 or > 7.5
Slope (%)	0-3	3-7	7-12	12-15
Altitude (masl)	2500-2650	2650-2800	2800-2950	2950-3300
Maximum temperature (°C)	22-27	20-22	18-20	16-18

* The low level has a gravel phase whereas the medium level does not.

Table 2
Specific suitability level per factor for the potato crop

Factor	Level of suitability			
	Very high	High	Medium	Low
Minimum temperature (°C)	4-6	3-4	2-3	0-2
Precipitation (mm)	> 1000	950-1050	850-950	750-850
Depth soil (m)	> 1.0	0.5-1.0	0.1-0.5	0.1-0.5
Soil texture class	Loam	Sandy loam	Loamy sand	Sandy clay loam
Slope (%)	< 10	10-25	25-40	40-55
Altitude (masl)	2800-3200	2700-2800	2600-2700	2500-2600
Maximum temperature (°C)	20-22	18-20	16-18	14-16

* The low level has a gravel phase whereas the medium level does not.

Factor maps were then constructed for the maize crop. These maps were the following: Soil pH, Maximum and Minimum Temperature (during the growth cycle) Soil Texture Class, Soil Depth, Altitude, Slope and Precipitation/Evaporation index (June-September period during which maize is quite sensitive to moisture stress at flowering (Corbett, 1996)). For potato, the maps were as follows: Maximum and Minimum Temperature (during the growth cycle), Soil Texture Class, Soil Depth, Altitude, Slope, and Precipitation. Constraint maps including cities, water bodies and altitude were also made. The constraint altitude for maize was higher than 3500 masl and for potato it was higher than 3700 masl.

A matrix pairwise comparison was made. Although the most prevalent procedure for MCE is the weighted linear combination (Voogd, 1983), a variety of techniques exist for the development of weights. One of the most promising technique is the pairwise comparison developed by Saaty (1977) in the context of a decision-making process known as the Analytical Hierarchy Process (Eastman et al., 1995). The comparison concerns the relative importance of the two criteria involved in determining the suitability of the stated objective (Eastman et al., 1995). Ratings were

provided on a nine-point continuous scale, which ranges from 9 to 1/9. A 9 indicates that relative to the column variable, the row variable is significantly more important. A 1/9 indicates that relative to the column variable, the row variable is significantly less important. Thus, if two variables were of equal importance they would receive a rating of 1, in estimating the weights, an individual or group compares every possible pairing and enters the ratings into a pairwise comparison matrix; since the matrix is symmetrical, only the lower triangular half needs to be filled in. The remaining cells are then simply the reciprocals of the lower triangular half.

In this study, factors were rated according to the opinion of crop experts from the Experimental Agricultural Station in the Valley of Toluca. This facility is part of the National Institute of Forest, Agricultural and Cattle Research (INIFAP).

In the weight calculation step, the matrix pairwise comparison and factors maps were used with the WEIGHT module in the IDRISI environment. Then the principal eigenvector of the pairwise comparison matrix was computed to produce a best fit to the weight set. In a MCE using a weighted linear combination, it is necessary that the weights sum to 1. The Consistency Ratio of the matrix was calculated as well. This value indicates the probability that the ratings were randomly assigned. A consistency ratio of 0.10 or less is considered acceptable (Saaty, 1980).

Once the factors and constraints maps have been obtained, it is a fairly simple matter to multiply each factor map (i.e. each raster cell within each map) by its weight and then sum the results. Next the resulting suitability map was then multiplied by each of the constraints maps to produce a suitability map, which has values in the same range as the criteria map. In order to produce a suitability map for each crop, the MCE module of IDRISI was used.

2.7. Gridding suitability and land use/cover maps

For each crop, a cross table between the map of suitable areas and the land use/cover map was obtained. In this way, we obtained useful information concerning the spatial distribution of several suitability levels, according to Landsat TM information. This phase allowed us to fine-tune our results, because only those areas with current agricultural use would be considered.

3. Results

3.1. Obtaining the thermal gradient (TG) to adjust interpolated temperature maps

Our results will be described using the flow chart shown in Fig. 2. In light of the discussion in the methods section, the coefficients of the regression model to adjust the interpolated temperature maps were as follows: coefficient $a = 30.476$ and coefficient $b = -0.007$, $R^2 = 0.9$. With these values, a specific TG was calculated, and was found to equal to 0.7. Therefore for every 100-m increase, there is a decrease of 0.7°C. Once the TG was obtained, the complete formula for TG (García, 1989) was applied to the interpolated maps of minimum and maximum temperature, and to

each pixel of the DEM also. This resulted in maps where the natural variation of temperature due to the altitude was accounted for.

3.2. Image processing results

Principal component analysis (PCA) showed that the PC1 (90.4%) and the PC2 (5.0%), explained more than 95% of the total variance observed in the six bands. The remainder of the variance was explained by the others PCs. The internal structure of the PC1 was determined for the specific value of the 4, 3.5 and 1 bands, in that order of importance. The PC2 was characterized by the importance of the 1, 3, 2 and 4 bands. Initially these bands were considered in order to test several algorithms of spectral classification.

During the supervised classification process each of the following algorithms were tested: classification box, minimum distance, Mahalanobis distance and maximum-likelihood with several thresholds. Furthermore, intensive sampling was carried out. The best results were obtained using the classifier of maximum-likelihood with a threshold of 20 and using the six available bands (1-5 and 7). In order to determine how well the classification had categorized a group of pixels used in the training process, the classification error matrix was obtained using the statistics extracted (Lillesand and Kiefer, 1984:612; see Table 3).

Table 3

Classification error matrix for the supervised classification of the 19% Landsat TM image

Cl	W1	W2	W3	W4	P	O	E	F1	F2	F3	C	S	Pd	A	Pu	Cd	E1	
W1	1015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1047
W2	-	1628	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1628
W3	-	-	152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	153
W4	-	-	-	338	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	341
P	-	-	-	-	3042	19	6	638	29	-	-	40	40	13	-	-	-	3833
O	-	-	-	-	50	2971	696	165	-	-	-	214	-	-	-	-	-	4104
E	-	-	-	-	5	260	610	80	-	-	-	100	92	113	-	-	-	1259
F1	-	-	-	-	182	42	125	1574	-	-	-	25	57	-	-	-	-	2005
F2	-	-	-	-	64	-	-	9875	428	1339	10	76	-	-	-	-	-	441
F3	-	-	-	-	6	-	-	297	7102	731	11	36	-	-	-	-	-	8743
C	-	-	-	-	188	-	-	2	13	7790	2102	16,313	251	263	187	2	-	756
S	-	-	-	-	23	-	-	18	11	83	4792	12	293	-	-	-	-	5069
Pd	-	-	-	-	23	-	-	8	4	69	-	11	2634	-	-	-	-	2971
A	-	-	-	-	68	-	-	257	92	50	-	-	2899	-	-	-	-	3481
Pu	-	-	-	-	2	-	-	11	11	-	-	116	10	109	-	-	-	1352
Cd	-	-	-	-	2	-	-	47	-	-	-	5	-	-	-	-	-	324
E1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-	-	-	-	-	504
E2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	-	517
E3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	567
E4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7628

Key: W1 = water1, W2 = water2, W3 = water3, W4 = water4, P = pine forest, O = oak forest, Po = pine-oak forest, E = oak-pine forest, F1 = farming land1, F2 = farming land2, F3 = farming land3, C = urban, S = irrigated and moisture farming land, S = shadow forest, Pd = soil physically degraded, A = soil, Pa = pure-site forest, Cd = soil chemically degraded, E1 = real+inclusion, E2 = real+omission.

In a broad sense, it can be observed that classes Farming land 1 (F1), Farming land 2 (F2) and Farming land 3 (F3) have a similar amount of omission and commission errors. Classes F1 and F2 showed that an important percentage of classified pixels with those categories were omitted, resulting in a relatively low producer's accuracy of 55% and 73% respectively (Table 4).

An important percentage of erroneously classified pixels in a category of farming land were included in one or both of the other farming land categories. This fact alone could be used as an argument that these categories should be joined into only one information class. However in fact, these three spectral classes (F1, F2 and F3) are already only one information class of farming land; the spectral differences could be related with differences in position (hillside or valley), origin or soil type. There were a considerable number of water bodies with several sizes, depths, uses and sources. Because of that fact, they have several spectral responses and therefore different categories, although they are of the same information class. Erroneously classified pixels were also observed in the *Abies* forest (Or) and *Pinus* forest (Po) categories. The pixels omitted in the Po class (696), were included in the class Or, and the pixels omitted in the class Or (260) were included in the Po class. As the objective of this classification was not to obtain a precise forest inventory per species or species association, it seems permissible to join both spectral classes into only one information class.

Overall, there were a considerable number of correctly classified pixels, despite the size of the matrix and the relief heterogeneity in the study area. In order to assess the accuracy of the classification produced, the omission and inclusion probabilities

Table 4
Evaluation of the supervised classification applied to the 1996 Landsat TM subimage (Total accuracy = 74%)

Category	Producer's accuracy (%)	Omission probability (%)	User's accuracy (%)	Inclusion probability (%)
W1	90	10	96	4
W2	100	0.0	100	0.0
W3	100	0.0	99.3	0.7
W4	100	0.0	99.1	0.9
P	84	16	79	21
O	84	16	72	28
Po	38	62	48	52
E	62	38	79	21
F1	55	45	81	19
F2	73	27	81	19
F3	88	12	59	41
C	85	8	92	8
U	85	15	89	11
S	88	12	83	17
Pd	52	48	82	18
A	44	64	88	12
Pa	59	41	84	16
Cd	30	70	95	5

were evaluated (Table 4). In the second column of that table, the accuracy of classification for each covering class (the category in the first column) is shown. The third column shows the omission probability value, that is, the percentage of pixels sampled as belonging to that spectral class and classified as belonging to another class. The next two columns show the percentage of accuracy of pixels classified and the probability of committing the inclusion error.

The water categories (1-4) were the most correctly identified due to their homogeneity, followed by the urban use (C), irrigated agriculture (I) and the shadow forest (S) categories. The land use/cover map from the 1996 Landsat TM image that was obtained from the supervised classification is shown in Fig. 3. This map shows 13 land use/cover types, which were produced from the combination of the several spectral classes considered in Table 3.

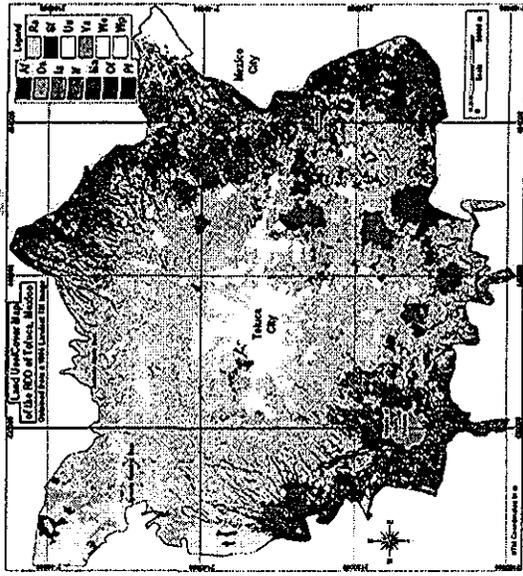


Fig. 3. Land use/cover map from the classification of the 1996 Landsat TM image. Keys are as follows: W1 = Moisture agriculture (farming land), W2 = Irrigation agriculture, W3 = Rain-fed agriculture, W4 = All forest, A1 = *Abies* forest, F1 = Pine forest, O1 = Oak-Pine forest (the association was considered without evaluating the dominance of one species), Wp = Permanent water body, We = Non-permanent water body, U1 = Urban use (including cities and roads), V1 = Volcanic area (including areas with high mountain vegetation and non-vegetated areas), Da = Soil degraded (physically and chemically), Sf = Shadow forest.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

412

3.3. MCE process and overlaying land use/cover and suitability maps for the maize crop

Once the matrix pairwise comparison has been obtained, factor weights were calculated by means of the WEIGHT module in IDRISI. The computed weights were as follows: Minimum Temperature (0.3375), Precipitation/Evaporation Index (0.2390), Soil Texture Class (0.1215), Soil Depth (0.1106), Soil pH (0.0501), Slope (0.0501), Altitude (0.0225) and Maximum Temperature (0.0225). The consistency ratio was 0.03, which is considered acceptable (Saaty, 1980).

In general, factors were associated with climate variables, such as low temperatures and water availability, during the growth cycle, specifically in the critical period of flowering (15 July - 15 August in our study area), and soil variables such as texture class and depth. With the weight for each factor, the factor maps (Fig. 4) and the constraint maps, a suitability map for the maize crop could be produced via the MCE procedure (Fig. 5). According to Fig. 5 the number of hectares available to each suitability class is as follows: very high suitability 11,713 ha, high suitability 121,067 ha, medium suitability 110,549 ha, low suitability 7193 ha and very low suitability 29 ha.

Generally, very high suitability areas were located in valley zones within the Municipality of Metepec, Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Santiago Tianguistenco, Chapultepec, Mexcalzingo, Calimaya, Toluca, Tenango del Valle, Joquicingo, and Huixquilucan. In these areas, according to the INEGI (several dates), the primary soil types are the Fozzen haplic, the Aitoozol humic, and the Cambisol cromatic. Furthermore, levels of the relevant factors (according to their weights) in very high suitability areas were, minimum temperatures > 6.5 °C during the growth cycle, water availability 1.4-2.0 of precipitation/evaporation index from June to September, medium texture class (loam texture) and soil depth > 1 m (Table 1). To improve

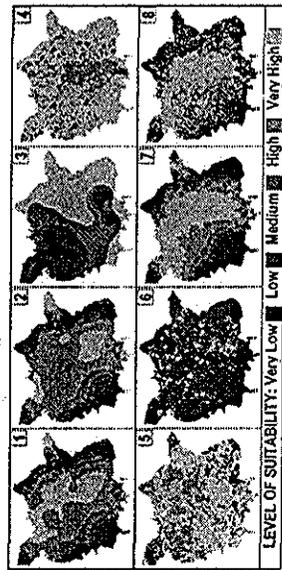


Fig. 4. Factor maps for the maize crop, which include suitability levels per factor map. Keys are as follows: 1 = Maximum temperature, 2 = Minimum temperature, 3 = Precipitation/evaporation index, 4 = Soil texture class, 5 = Soil depth, 6 = Soil pH, 7 = Altitude (masl) and 8 = Slope.

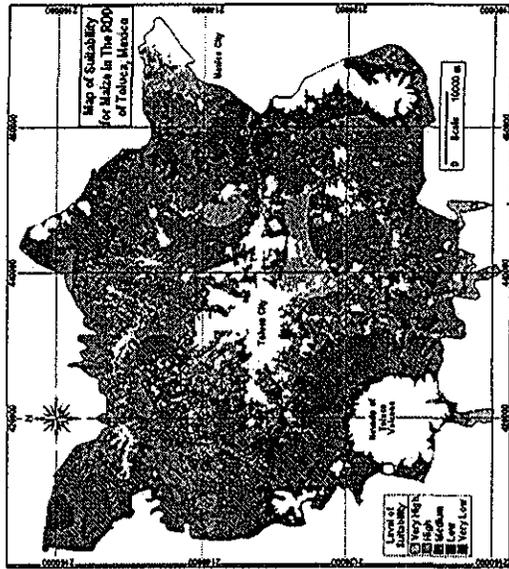


Fig. 5. Map of suitability for maize in the RDD, Toluca, México.

the results they should be crossed with the land use/cover map from the 1996 Landsat TM image (Fig. 3).

Analyzing the crossed suitability and land use/cover maps indicated that the very high suitability level was located principally (64%) in the current agricultural areas and specifically in rain-fed agriculture (Ra) and moisture agriculture (Ma). These areas, which represented 7549 ha (Table 5), can be considered the best areas for maize production. In respect to the high suitability level we found that 92,127 ha were located on agricultural soils (Ra and Ma), besides 23,011 ha with high suitability level were located in current forest areas.

According to SAGARPA (2000), the area cultivated with maize was approximately 120,000 ha. However, our results show that only 99,626 ha should be considered as very high and high suitability areas for that crop. In the RDDT, practically all of the maize production areas were located in rain-fed agriculture. Consequently the extent of agricultural irrigated areas was very small; we observed only 162 ha at the high and very high suitability level (Table 5).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

512

Table 5
Results of crossing the 1996 land use/cover map and the suitability map for the maize crop

Land use/cover	Suitability level									
	Very Low		Low		Medium		High		Very High	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Of	25	86	1081	15	7481	7	5916	5	440	4
Ra	4	14	2354	32.5	62,533	56	87,141	72	6672	57
Pf	—	—	1207	17	13,021	12	8733	7	793	7
At	—	—	1872	26	13,152	12	4166	3	470	4
Ma	—	—	139	2	3212	3	4986	4	877	7
Sr	—	—	379	5	4669	4	2331	2	151	1
Da	—	—	38	0.5	4499	4	3337	3	560	5
If	—	—	123	2	1974	2	1865	2	488	4
We	—	—	—	—	7	0.06	2508	2	1184	10
Ia	—	—	—	—	—	—	84	0.67	78	1

Key: Of = Oak–Pine forest, Ra = Rain-fed agriculture, Pf = Pine forest, At = Abies forest, Ma = Moisture agriculture (farming land), Sr = Shadow forest, Da = Soil degraded (physically and chemically), If = Air forest, We = Non-Permanent water body, Ia = Irrigation agriculture.

3.4. MCE process and overlaying land use/cover and suitability maps for the potato crop

After constructing the matrix pairwise comparison, weights per factor were calculated using the WEIGHT procedure within IDRISI. This procedure indicated that the most important factors for this crop were as follows: Soil depth (0.3847) and Soil Texture class (0.2549), followed by Precipitation (0.1767), the Minimum Temperature (0.0765), Altitude (0.0498), the Maximum Temperature (0.0384) and, finally, the Slope (0.0239). Overall, these factors are related with soil characteristics, such as good water availability and low temperatures that are damaging to the crop. Furthermore, the consistency ratio was equal to 0.09, which is within acceptable limits.

Utilizing the specific weights for each factor, the factors themselves, and the constraint maps the module of MCE IDRISI was used to produce the suitability map for the potato crop (Fig. 6). The extent for each of the suitability levels were: very high 36,584 ha, high 183,739 ha, medium 39,184 ha, low 3939 ha, and very low 84 ha.

The very high suitability areas were located in the upper parts of some mountain slopes. They were in the municipalities of Zinacantan, Toluca, Calimaya, Tenango del Valle, Joquicingo, Santiago Trianguenco, Xelatlaco, Ocoyoacac, Texcalvatec, Huixquilucan, Lenma, Xonacatlan, Otzototepec, Temoaya, and Almoloya de Juárez. In these areas, according to the INEGI (Several dates), the types of dominant soil are the Andosol humic and the Andosol mollic, both with medium textures.

The levels of relevant factors (according to their weights) in very high suitability areas were: Soil Depth > 1 m, Medium Textures (loam textures), Precipitation > 1050 mm during the growth cycle, and Minimum Temperatures of 4–6 °C during the growth cycle. Results of crossing of suitability and landuse maps indicated that a

Fig. 6. Map of suitability for potato in the RDD, Toluca, Mexico.

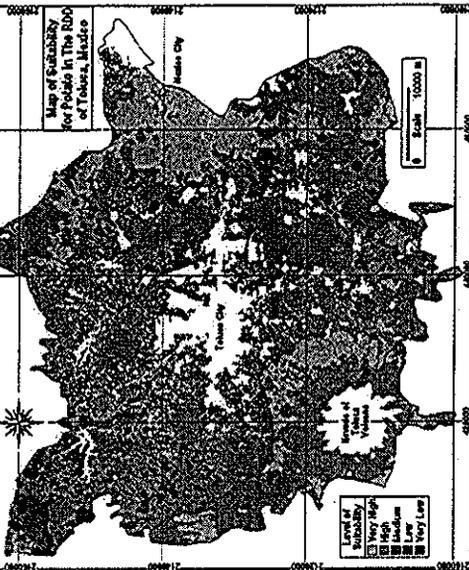


Fig. 6. Map of suitability for potato in the RDD, Toluca, Mexico.

great percentage of areas of very high suitability level (44%) was located on agricultural soils (Table 6). Therefore, some 15,964 ha have very good climate and soil characteristics for potato production. That potential acreage is underutilized as according to SAGARPA (2000) the number of hectares sowed for that year was 1950 ha.

Our results also indicated that a majority of the area classed at a very high suitability level, some 20,466 ha or 55.5%, was used for forestry. This situation was checked by means of fieldwork and in future could be studied under a conflicting objectives decision-making approach (Eastman, 1997), in order to find the best landuse suitability.

Degraded lands (3758 ha) were found to have increased with respect to those with a very high suitability level. The area classed at medium, low and very low suitability levels for agriculture soils amounted to some 30,013 ha, such areas are not promising for potato production. Overall, our study indicated that suitable areas for potato production in irrigated areas were practically non-existent.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

9/2

4. Coballos-Silva, J. Lopez-Blanco / Agricultural Systems 0 (0000) 0-0

Table 6
Results of crossing the 1996 landuse/cover map and the suitability map for the potato crop

Land use/ cover	Suitability level											
	Very low		Low		Medium		High		Very High		%	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Ma	5	6	121	1	895	7	6631	4	1770	5		
Ia			4	0.1			158	0.08				
Ra	66	78	2272	25	26654	68	116754	63	14194	39		
If	1	1	38	0.9	250	1	2743	1	1465	4		
Of			667	17	4199	11	7608	4	3397	9		
At			34	1	847	7	12340	7	7239	20		
Pf			2	373	9	3285	8	22475	13	5675	15.5	
Da	11	13	316	8	2195	6	5758	3	154	0.5		
We				0.06			251	1	3447			
Sf			11	3	608	1	4824		2690	7		

Key: Ma = Moisture agriculture (farming land), Ia = Irrigation agriculture, Ra = Rain-feed agriculture, If = Air forest, Of = Oak-Pine forest, At = Abster forest, Pf = Pine forest, Da = Soil degraded (physically and chemically), We = Non-permanent water body, Sf = Shadow forest.

4. Conclusions

This research confirmed the method used here was adequate to integrate a climate, soil and relief database with different spatial and temporal resolutions in a GIS context. In this way, thematic interpolated maps were generated, which taken into account specific characteristics of crops, like growth cycle or phenological phases. MCE of climate, soil and relief environment-components demonstrated to be useful to delineate suitable areas for maize and potato crops production. Besides, the weighing factor process generated valuable information, which could be useful for future specific studies on maize and potato crops. The method applied here could be useful for the specialists of those countries with similar conditions to Mexico, as an alternative and reliable approach to delineate suitable areas for crops through the MCE technique in a GIS context. However, the former techniques are merely tools, which provide means to reach a specific objective. Without the knowledge about the study object (crops in this case) and without appropriate databases, such tools would be useless. Additionally, in this study the participation of crop experts was very important to obtain trustworthy and consistent results. We consider that this investigation could provide general alternatives to local farmers for agricultural land management of specific crops. Besides, those results can be useful for programs sponsored by local and federal governments, in order to support production of maize and potato crops. Furthermore, the results of this study could be useful for other researchers who could use our results for diverse studies.

We found that available remote sensing data were crucial in order to obtain land use/cover information in a precise and relatively fast way. Image processing, by means of the supervised classification approach and the maximum likelihood algorithm,

4. Coballos-Silva, J. Lopez-Blanco / Agricultural Systems 0 (0000) 0-0

ensured that an acceptable percentage of the classified pixels were correctly classified. This investigation provides information at a regional level that could be used by local farmers to select their crop pattern. In addition, we know that decision-making process to select adequate crop patterns could be based not only on the information provided by this MCE, but also on other issues such as: production supports (by local and federal governments), marketing, technological level, economic evaluation, in addition to local cultural traditions, which are highly important also.

In this study, we applied the MCE approach to identify areas for specific purposes within a GIS context. This approach has been used in some studies in other countries. However, in Mexico this approach is a new and original application in agriculture, because it has not been used to identify suitable areas for the maize and potato crops. That combination was useful to evaluate multiple criteria and expert opinion in a consistent way in order to obtain suitability maps and tabular databases. Therefore, we have shown that MCE-GIS combination has potentiality to provide a rational, objective and non-biased approach to making decisions in agriculture applications in Mexico.

Acknowledgements

We thank Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (CONACYT), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), and Programa en Ciencias de la Tierra UNAM, for their help and support during this research and fieldwork. We also thank Dave Montgomery and anonymous reviewers for helpful critiques of the manuscript.

References

Aguilera, H.N., 1986. Edafología y productividad. In: Reyna, T.T. (Ed.), *Planorama de la Agricultura Mexicana. Reflexiones, preguntas y respuestas*. Inst. de Geografía, UNAM, México, pp. 38-69.

Allen, J.A., 1990. Sensors, platforms and applications: acquiring and managing remotely sensed data. In: *Silva, M.D., Chart, J.A. (Eds.), Applications of Remote Sensing in Agriculture*. Butterworths, The University of Nottingham, Great Britain University Press Cambridge, pp. 3-18.

Aronoff, S., 1989. *GIS & Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada.

Barredo, C.J.L., 1996. *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial RA-MA Editorial, Madrid, España.

Boque, S.J., 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rioplag, Madrid, España.

Bowkamp, J.C., 1985. *Sweet Potato Production: A Natural Resources for the Tropics*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Carver, S.J., 1991. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science* 5 (3), 321-339.

Corbett, J.H., 1996. Dynamic crop environment classification using interpolated climate surfaces. In: Goodchild, M.F., Stevart, T.L., Parks, O.B. (Eds.), *GIS and Environmental Modeling*. Progress Research Issues, GIS World Book, Fort Collins, pp. 117-122.

Eastman, J.R., Jin, W., Klem, A.K., Toledano, J., 1995. *Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 61 (3), 339-347.



Toluca, Méx. 22 de agosto de 2002.

A QUIEN CORRESPONDA:

Quivera, revista de estudios territoriales, hace constar que el Mtro. Alejandro Ceballos, es autor del artículo "Toma de decisiones en Planeación Territorial: Evaluación multicriterio en la identificación de áreas adecuadas para cultivos en el DDR Toluca", mismo que ha sido dictaminado positivamente por miembros de nuestra cartera de árbitros y está incluido en el número 7 de nuestra publicación, el cual se encuentra en proceso de edición.

Se extiende la presente constancia para los efectos legales que mejor convengan al interesado, en la ciudad de Toluca, Estado de México, a los veintidós días del mes de agosto de dos mil dos

ATENTAMENTE
Patria, Ciencia y Trabajo
"2002, Año de Nezahualcóyotl, el Rey Poeta"

M. en E. Pilar Espíndola C.
Directora de Quivera,
revista de estudios territoriales.

c.c.p Archivo
PEC

Agriculture, Ecosystems & Environment

An International Journal

EDITORIAL OFFICE: P O BOX 181, 1000 AD AMSTERDAM, THE NETHERLANDS

Editor-in-Chief: M R Carter

Dr A. Ceballos-Silva
Universidad Nacional Autonoma
de Mexico (UNAM) and Epigmenio
Ibarra 19,, Col. Romero de Terreros
CP 04310
Mexico, D.F.
Mexico

Re: AGEE 1214

Amsterdam, September 17, 2002

Dear Dr. Ceballos-Silva,

I am pleased to be able to inform you that the manuscript *Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for Oat in Central Mexico: A multicriteria and GIS approach* by Ceballos-Silva, A. and López-Blanco has now been accepted for publication in our journal. The manuscript has been transferred to our production site in Ireland for preparation for press. Proofs will be sent to you in due course.

Yours sincerely,



Editorial Office Agriculture, Ecosystems & Environment

 Mr. Jan ten Have