



Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS NATURALES PARA LA PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO

Francisco G. ECHAVARRÍA CHÁIREZ
Guillermo MEDINA GARCÍA
Agustín F. RUMAYOR RODRÍGUEZ
Alfonso SERNA PÉREZ
Homero SALINAS GONZÁLEZ
Juan G. BUSTAMANTE WILSON

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Lic. Francisco Javier Mayorga Castañeda
Secretario

Ing. Francisco López Tostado
Subsecretario de Agricultura

Ing. Ignacio Rivera Rodríguez
Subsecretario de Desarrollo Rural

Dr. Pedro Adalberto González
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

Dr. Enrique Astengo López
Coordinador de Planeación y Desarrollo

Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO

Dr. Homero Salinas González
Director Regional

Dr. Héctor Mario Quiroga Garza
Director de Investigación

Dr. José Verástegui Chávez
Director de Planeación y Desarrollo

Lic. Jaime Alfonso Hernández Pimentel
Director de Administración

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

M.Sc. Agustín F. Rumayor Rodríguez
Director de Coordinación y Vinculación en Zacatecas

DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS NATURALES PARA LA PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO

Ph.D. Francisco G. ECHAVARRÍA CHÁIREZ

Investigador de la Red de Suelo y Agua
Campo Experimental Zacatecas

Dr. Guillermo MEDINA GARCÍA

Investigador de la Red de Modelaje
Campo Experimental Zacatecas

MSc. Agustín F. RUMAYOR RODRÍGUEZ

Investigador de la Red de Frutales
Campo Experimental Zacatecas

Ph.D. Alfonso SERNA PÉREZ

Investigador de la Red de Suelo y Agua
Campo Experimental Zacatecas

Dr. Homero SALINAS GONZÁLEZ

Investigador de la Red de Caprinos y Ovinos
Campo Experimental La Laguna

Dr. Juan G. BUSTAMANTE WILSON

Universidad Autónoma de Zacatecas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la Institución.

ISBN: 978-607-425-208-8

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
Progreso No. 5. Barrio de Santa Catarina. Delegación Coyoacán.
C. P. 04010 México, D.F.
Tel. (55) 3871 8700

Centro de Investigación Regional Norte Centro.
Campo Experimental Zacatecas.
Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo.
Apartado postal No. 18.
Calera de V.R., Zac., 98500.
México.

Primera edición. Noviembre de 2009
Impreso en México

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVO.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. COMPONENTE SUELO	12
3.1.1. CAPACIDAD AGROLÓGICA (APTITUD PRODUCTIVA)	12
3.1.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO.....	17
3.1.2.1. Materia orgánica del suelo	18
3.1.2.2. Reserva de humedad del suelo	18
3.1.2.3. Erosión hídrica potencial.....	20
3.1.2.4. Erosión eólica.....	23
3.1.2.4.1. Erosionabilidad del suelo (I').....	24
3.1.2.4.2. Rugosidad del suelo (K').....	25
3.1.2.4.3. Factor climático (C').....	26
3.1.2.4.4. Longitud equivalente del terreno (L')	28
3.1.2.4.5. Cantidad equivalente de cubierta vegetal (V')	29
3.1.2.5. Integración final del mapa de degradación del suelo	29
3.2. COMPONENTE AGUA	31
3.2.1. AGUAS SUPERFICIALES.....	31
3.2.1.1. Cuencas hidrológicas.....	31
3.2.1.2. Balance hídrico	32
3.2.1.2.1. Coeficientes de cultivo	34
3.2.1.2.2. Escurrimiento	36

3.2.1.2.2.1. Coeficientes de escurrimiento	36
3.2.1.2.3. Percolación profunda	39
3.2.1.2.4. Recarga.....	40
3.2.2. AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	41
3.2.2.1. Delimitación de acuíferos.....	41
3.2.2.2. Piezometría	41
3.2.2.3. Recarga y abatimiento de acuíferos a partir de datos piezométricos.....	42
3.3. COMPONENTE VEGETACIÓN	42
3.3.1. Estudios de la vegetación	42
3.3.2. Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI).....	43
3.4. FRAGILIDAD NATURAL.....	46
3.4.1. Concepto de fragilidad	46
3.4.1.1. Relieve	47
3.4.1.2. Suelo	48
3.4.1.3. Vegetación	48
3.4.2. Mapa de fragilidad	49
3.5. INTEGRACIÓN DEL SUBSISTEMA NATURAL (SUELO, AGUA, VEGETACIÓN)	49
3.5.1. Suelo	50
3.5.2. Agua superficial y subterránea	51
3.5.3. Vegetación nativa.....	52
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1. COMPONENTE SUELO	54
4.1.1. CAPACIDAD AGROLÓGICA O APTITUD DEL SUELO.	54
4.1.1.1. Clases de suelo agrícola.....	54

4.1.1.2. Clases de suelo para uso pecuario	55
4.1.1.3. Asociación de la aptitud de suelo y acciones tecnológicas de uso sustentable	56
4.1.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO	60
4.1.3. EROSIÓN HÍDRICA Y EÓLICA	66
4.2. COMPONENTE AGUA	66
4.2.1. AGUA SUPERFICIAL	66
4.2.1.1. Balance hídrico.	70
4.2.1.2. Evapotranspiración.	70
4.2.1.3. Escurrimiento.	72
4.2.1.4. Percolación profunda.	72
4.2.1.5. Recarga.....	74
4.2.2. AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	74
4.2.2.1. Abatimiento de los principales acuíferos	74
4.3. COMPONENTE VEGETACIÓN.....	81
4.3.1. Distribución de especies vegetales.....	81
4.3.2. Uso del suelo.	94
4.3.3. Fragilidad natural	104
5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y ORDENAMIENTO ECOLÓGICO	127
5.1. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS NATURALES.....	127
5.1.1. Disponibilidad de recursos en áreas de uso agrícola.....	127
5.1.2. Disponibilidad de recursos en áreas de uso pecuario.....	132
5.2. DETERIORO DE LOS RECURSOS NATURALES.....	134
5.2.1. Deterioro de recursos naturales en áreas agrícolas.	137
5.2.2. Deterioro de recursos naturales en áreas de uso pecuario	138

5.3. FRAGILIDAD NATURAL DE LOS RECURSOS NATURALES.....	139
5.4. RECONVERSIÓN PRODUCTIVA COMO ESTRATEGIA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO	140
5.4.1. Áreas agrícolas.	145
5.4.2. Áreas pecuarias	150
4.4.3. Áreas Forestales	151
6 CONCLUSIONES.....	161
7. BIBLIOGRAFÍA.....	163

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1	Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos agrícolas.....	15
2	Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos de uso pecuario.....	16
3	Coeficientes para transformar valores provenientes del tanque evaporimetro tipo A en ETP.....	34
4	Valores de Kc en cultivos anuales y de vegetación natural.....	35
5	Árbol de decisiones para la construcción del mapa de fragilidad.....	50
6	Aptitud de suelo agrícola asociado al manejo de reconversión.....	59
7	Aptitud de suelos de uso pecuario asociados al manejo de reconversión.....	59
8	Número de hectáreas de las clases de aptitud productiva de suelos agrícolas combinados con niveles de degradación.....	61
9	Estudios piezométricos iniciales y finales en ocho acuíferos del estado de Zacatecas.....	75
10	Nivel estático de ocho acuíferos y las superficies asociadas a cada nivel.....	80
11	Tipos de vegetación, uso del suelo y superficie asociada.....	83
12	Indicadores de sustentabilidad de los cultivos más importantes en el estado de Zacatecas.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Mapa de aptitud de suelo en áreas de uso agrícola del estado de Zacatecas	57
2	Mapa de aptitud de suelo en áreas de uso pecuario del estado de Zacatecas	58
3	Mapa de la cantidad máxima de humedad que puede almacenarse en el suelo	62
4	Contenido de materia orgánica del suelo	63
5	Mapa del estado de degradación del suelo	64
6	Mapa de aptitud modificada por la degradación del suelo.....	65
7	Mapa de erosión hídrica potencial	67
8	Mapa de erosión eólica en áreas agrícolas	68
9	Cuencas hidrológicas del estado de Zacatecas	69
10	Evapotranspiración anual en el estado de Zacatecas	71
11	Escurrimiento superficial anual en el estado de Zacatecas.....	73
12	Mapa de identificación de posibles sitios de recarga del acuífero.....	76
13	Acuíferos de mayor explotación en el estado de Zacatecas	77
14	Niveles estáticos de los acuíferos de mayor explotación en los estudios iniciales	78
15	Niveles estáticos de los acuíferos de mayor explotación en los estudios finales	79
16	Diferencias entre los niveles estáticos valorados entre estudios.....	84
17	Distribución espacial de las comunidades vegetales presentes en el estado de Zacatecas.....	85
18	Distribución espacial del matorral desértico micrófilo en el estado de Zacatecas.....	86
19	Distribución espacial del matorral desértico rosetófilo en el estado de Zacatecas.....	87
20	Distribución espacial del matorral crasicale en el estado de Zacatecas.....	88
21	Distribución espacial del mezquital en el estado de Zacatecas.....	89

22	Distribución espacial del chaparral en el estado de Zacatecas	90
23	Superficie dedicada a la agricultura de temporal.....	91
24	Superficie dedicada a la agricultura de riego.....	92
25	Distribución espacial del pastizal natural en el estado de Zacatecas.....	95
26	Distribución espacial del pastizal inducido en el estado de Zacatecas.....	96
27	Distribución espacial del pastizal halófilo en el estado de Zacatecas.....	97
28	Distribución espacial del pastizal-huizachal en el estado de Zacatecas.....	98
29	Distribución espacial del bosque de encino en el estado de Zacatecas.....	99
30	Distribución espacial del bosque bajo abierto en el estado de Zacatecas.....	100
31	Distribución espacial del pino-encino en el estado de Zacatecas	101
32	Distribución espacial del encino-pino en el estado de Zacatecas	102
33	Distribución espacial de la vegetación halófila en el estado de Zacatecas	103
34	Fragilidad del bosque bajo abierto.....	105
35	Fragilidad del bosque de encino	106
36	Fragilidad del bosque de encino-pino	107
37	Fragilidad del bosque de pino.....	108
38	Fragilidad del bosque de pino-encino	109
39	Fragilidad del bosque de táscate	110
40	Fragilidad del chaparral	111
41	Fragilidad del matorral crasicaule	112
42	Fragilidad del matorral desértico micrófilo	113
43	Fragilidad del matorral desértico rosetófilo	114
44	Fragilidad del mezquital	115
45	Fragilidad del pastizal–huizachal	116
46	Fragilidad del pastizal inducido.....	117

47	Fragilidad del pastizal natural	118
48	Fragilidad del pastizal halófilo	119
49	Fragilidad de la selva baja caducifolia	120
50	Fragilidad del matorral subtropical	121
51	Fragilidad de la vegetación desértico micrófilo	122
52	Fragilidad de vegetación halófila	123
53	Fragilidad de vegetación nativa	124
54	Mapa de disponibilidad de recursos naturales en áreas agrícolas	130
55	Mapa de disponibilidad de recursos naturales en áreas de agostadero	131
56	Mapa de deterioro de los recursos naturales en áreas agrícolas	135
57	Mapa de deterioro de los recursos naturales en áreas de agostadero	136
58	Erosión hídrica estimada producida por el cultivo del frijol	147
59	Erosión hídrica estimada producida por cereales	148
60	Erosión hídrica estimada producida por el cultivo del frijol en surcos al contorno	152
61	Erosión hídrica estimada producida en agostadero bajo pastoreo continuo	153
62	Erosión hídrica estimada producida en agostadero bajo pastoreo rotacional	154
63	Erosión hídrica estimada producida por nopal nativo con baja cobertura	155
64	Erosión hídrica estimada producida por nopal nativo con media cobertura	156
65	Erosión hídrica estimada producida por nopal nativo con alta cobertura	157
66	Erosión hídrica estimada con matorrales (<i>Atriplex canescens</i>) en bordos al contorno	158
67	Erosión hídrica estimada con matorrales (<i>Atriplex canescens</i>) asociado con nopal rastrero	159
68	Erosión hídrica estimada producida por la asociación pino-encino	160

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sustentable solo es posible si sus objetivos se cumplen bajo el marco de la planeación de uso del territorio nacional. Los procesos productivos, económicos y sociales que se han llevado a cabo en el estado de Zacatecas, han conducido a este territorio a un deterioro continuo de los recursos naturales (Echavarría *et al.*, 2007), lo que en la actualidad se traduce en un decremento de la capacidad productiva y de la sostenibilidad de los ecosistemas (Jiménez y Lamo, 1998).

Para planear el uso del territorio se cuenta con los estudios de ordenamiento ecológico (OE), que de acuerdo con la SEMARNAP, se define jurídicamente como: El instrumento de política ambiental cuyo objetivo es regular el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos (SEMARNAP, 2000).

De manera general, OE es considerado como un proceso de planeación de los usos del suelo con el propósito de garantizar la funcionalidad y sostenibilidad del medio natural, la población y la actividad productiva y con ello, lograr un equilibrio entre la transformación y la conservación del medio (SEMARNAP, 2000).

El término “desarrollo sustentable” se empezó a utilizar con frecuencia a partir de 1987 (WCED, 1987), cuando la Comisión Mundial del Medio Ambiente y el Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas, en un informe conocido como “Nuestro futuro común”, lo definió como: “el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. En este

concepto se integran las necesidades básicas de la presente generación, la capacidad de los sistemas naturales y las necesidades de las generaciones futuras.

El enfoque de desarrollo sustentable en el que se basa el ordenamiento ecológico, no pretende tener una orientación hacia la conservación, el desarrollo o la economía, sino una perspectiva equilibrada que permita alcanzar las metas planteadas. La interrelación entre los aspectos natural, social y económico es importante en el ordenamiento ecológico, pues en el funcionamiento integral de las variables de cada aspecto, participan la periodicidad de los procesos, los estilos de desarrollo económico, el marco institucional, las formas de producción y el uso de tecnología, entre otros componentes.

Los estudios de ordenamiento se deben apoyar en información proveniente de varias fuentes. Las bases de datos y la información con base cartográfica, pueden ser integradas en los sistemas de información geográfica (SIG), para mejorar la capacidad de análisis de la gran cantidad de datos disponibles. Estos datos son delimitados por la división política de cada Estado, siendo en este caso, el estudio de ordenamiento del estado de Zacatecas.

El presente es un estudio de planeación bajo la perspectiva de desarrollo sustentable, con una propuesta de intervención tecnológica, a la cual le antecede un inventario y el diagnóstico de los elementos suelo, agua y vegetación, como los recursos naturales mayormente afectados por el uso de tecnología. Como producto del estudio de ordenamiento, se presenta una serie de acciones tecnológicas que pueden contribuir a encauzar las actividades productivas en el marco de la reducción de la degradación y la sustentabilidad de los recursos naturales.

Dada la amplitud de los estudios de ordenamiento ecológico, la SEMARNAP (2000), los ha dividido en tres subsistemas; el natural, el productivo y el socioeconómico. La información que aquí se presenta, abarca solo estudios del subsistema

natural, específicamente de los factores suelo, agua y vegetación, que son los que se encuentran sujetos a mayor explotación, los de mayor representatividad espacial y están en estrecha relación con los asentamientos humanos y la actividad económica; esto permite la integración final con los sistemas productivo y socioeconómico, los cuales constituyen etapas subsecuentes del presente estudio.

2. OBJETIVO

El objetivo general de los estudios que condujeron al presente documento fue:

Determinar las potencialidades productivas del territorio del estado de Zacatecas, los factores que los limitan, el deterioro ambiental y la problemática implícita en ello, particularmente lo que tiene que ver con el suelo, el agua y vegetación para el ordenamiento ecológico; se proponen acciones de intervención tecnológica para dar sustentabilidad a las acciones productivas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en el Campo Experimental Zacatecas, dependiente del INIFAP. El estudio se basó en la metodología desarrollada por SEMARNAP (2000), la cual fue adaptada a las condiciones y disponibilidad de información en el estado de Zacatecas. La base principal del trabajo fue información secundaria, que es toda aquella información colectada en mapas, estudios geohidrológicos, fotografía aérea e imágenes satelitales. Se incluyeron algunos indicadores que describen mejor la condición de deterioro del estado de Zacatecas. Los límites del estado de Zacatecas utilizados aquí, fueron los definidos por la Secretaría de Programación y Presupuesto en 1981 (SPP, 1981). Cambios posteriores a esta fecha no están incluidos en el presente estudio.

La primera etapa se refiere a la evaluación agrológica de los suelos, la cual da una idea de su potencialidad o aptitud. Para ello se usaron las cartas de suelos escala 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del estado de Zacatecas. Dichas cartas fueron digitalizadas con la intención de favorecer el manejo y almacenamiento de la información y permitió su uso y transformación por medio de sistemas de información geográfica, el uso de paquetes de análisis estadístico y geoestadístico, y la generación de índices para producir nueva cartografía.

3.1. COMPONENTE SUELO

3.1.1. Mapa de capacidad agrológica (aptitud productiva)

La definición de la capacidad agrológica (también llamado de uso potencial o de aptitud productiva), parte del conocimiento teórico de las capacidades de que disponen los suelos de acuerdo a la clasificación de la FAO/UNESCO (1970) modificada por INEGI (1981). Las bases de datos utilizados para la definición de la capacidad agrológica fueron los siguientes:

1. Carta edafológica escala 1:50,000, elaborado por CETENAL (1972). Las 120 cartas correspondientes al estado de Zacatecas fueron digitalizadas.
2. Mapa de pendientes elaborado a partir del modelo de elevación digital desarrollado por INEGI a una escala de 1:250,000, con resolución de 180 X 180 m. La pendiente se expresó en grados y en porcentajes.

3. Mapa de los climas de México, desarrollado por INIFAP (Medina, *et al.*, 1998) el cual consideró para su elaboración la relación precipitación – evapotranspiración, lo que ayudó a determinar los períodos en que la humedad es deficitaria.
4. Mapa de fases fisicoquímicas del suelo, elaborado a partir de información del INEGI, que muestra las principales limitantes físicas de los suelos, como pedregosidad en distintos grados (fase gravosa, fase pedregosa y fase lítica), presencia de caliche (fase petrocálcica), tepetate (fase dúrica) o yeso (fase petrogypsica). También señala las características químicas del suelo, como áreas salinas, salinosódicas o sódicas.
5. Mapa de uso del suelo desarrollado por la UNAM (1995) para delimitar las áreas de uso agrícola y pecuario.

En el Cuadro 1 se presenta el diagrama de decisión para las áreas agrícolas y en el Cuadro 2, los criterios de decisión para separar las áreas con actividades pecuarias. Cada uno muestra las características, físicas y ambientales, que idealmente debe reunir un suelo para pertenecer a las clases de capacidad agrológica correspondiente. A partir de esto, se identificaron los casos que cumplen con las características de cada clase, los cuales, una vez clasificados, son representados en mapas.

No todos los casos suelos encuentran clasificación bajo estos criterios generales, ya que hay combinaciones que quedan excluidos de esos criterios. Estos casos fueron asignados a la clase inmediata inferior.

Las unidades taxonómicas que maneja la clasificación FAO-UNESCO, permite la separación entre ellas al identificar atributos del suelo como profundidad, presencia de sales o sodio, textura, cantidad de materia orgánica, etc. Las fases

físico-químicas proporcionan información relevante de los niveles de pedregosidad, presencia de condiciones salinas, sódicas o de yeso, tepetate o caliche, las cuales son limitantes para el desarrollo adecuado de las actividades agrícolas.

En lo que se refiere a las pendientes se consideraron valores menores a 6° , como el mínimo aceptable para el desarrollo de actividades agrícolas. En este caso la metodología SEMARNAP (2000) utilizó como valores de pendiente de hasta 15° para seleccionar áreas de la clase 1 y 2 de los suelos agrícolas, sin embargo para el presente estudio, se decidió utilizar los valores indicados, considerando éste como el límite para realizar labores agrícolas que no provoquen degradación del suelo.

Respecto al aspecto ambiental en que se desarrollaron y producen los suelos estudiados, se utilizó el mapa de climas, el cual proporcionó información sobre la cantidad de agua disponible para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos.

Cuadro 1. Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos agrícolas.

CRITERIOS DE DECISIÓN	CLASE					
	UNO	DOS		TRES	CUATRO	
Tipo de suelo dominante	Castañozem Feozem Vertisol	Acrisol Andosol Nitosol Cambisol Xerosol	Rendzina Arenosol	Planosol Regosol Yermosol Solonetz Histosol Gleysol Solonchak	Rendzina Arenosol	Litosol
	Y	Y		Y	Y	
Tipo de suelo codominante	Castañozem Feozem Vertisol	Acrisol Andosol Nitosol Cambisol Xerosol Vertisol Feozem Castañozem		Planosol Regosol Yermosol Solonetz Histosol Gleysol Solonchak	Rendzina Arenosol	
	Y	Y	Y	Y	Y	O
Pendiente*	0.0° - 6.0°	0.0° - 6.0°	0.0° - 6.0°		15° - 25°	> 25°
	Y	Y		O		O
Fases físicas y/o químicas	Sin fases, Gravosos	Salina-sódica Dúrica Petro-cálcica		Pedregosos Salino-sódico		Lítica Petrogypsica
	Y		Y	O	Y	
Disponibilidad de humedad**	Ústico Údico		Údico Ústico Xérico	Ácuico	Árido	

Fuente: SEMARNAP (2000).

*Se usaron valores límite de pendiente de 6° para clases 1 y 2.

**Basado en mapa de climas desarrollado por INIFAP (Medina *et al.*, 1998)

Cuadro 2. Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos de uso pecuario.

CRITERIOS DE DECISIÓN	CLASE				
	UNO	DOS	TRES	CUATRO	
Tipo de suelo Dominante	Castañozem Feozem Vertisol Andosol Acrisol Nitosol Luvisol Cambisol	Rendzina Gleysol Xerosol Histosol Planosol Yermosol Fluvisol	Regosol Arenosol Solonchak	Xerosol Yermosol	Litosol Solonetz
	Y	Y	Y	Y	
Tipo de suelo codominante	Castañozem Feozem Vertisol Andosol Acrisol Nitosol Luvisol Cambisol	Rendzina Gleysol Xerosol Histosol Planosol Yermosol Fluvisol	Regosol Arenosol Solonchak	Regosol	
	Y	O	O		O
Pendiente	15° - 25°	15° - 25°	15° - 25°		> 25°
	Y	O			O
Fases físicas y/o químicas	Sin fases, Gravosos	Salina-sódica Petro-cálcica	Pedregosa, Salino-sódica		Lítica, Petro-gysica
	Y	O	O		O
Disponibilidad de humedad*	Ústico Údico	Arídico (0 – 90 días) Xérico	Arídico (0 días)		Ácuico

 Fuente: SEMARNAP (2000). *Basado en mapa de climas desarrollado por INIFAP (Medina *et al.*, 1998)

3.1.2. Degradación del suelo

Con el mapa de capacidad agrológica o de aptitud, fue posible establecer el potencial del recurso suelo para el Estado. Sin embargo, ésta clasificación no involucra el dinamismo que los procesos naturales e inducidos por el hombre provocan en los recursos naturales. Para llegar a ello se desarrolló otro tipo de cartografía que permitiera definir el grado de degradación que sufre el recurso suelo, independientemente de su aptitud productiva.

Para la realización de ese mapa se estableció que de los seis tipos de degradación establecidos por la FAO, a partir de la reunión sobre degradación de suelos realizada en Roma en 1974 (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980) y que son: la erosión hídrica y eólica; la degradación biológica, asociada con la disminución de materia orgánica y fertilidad del suelo; la degradación química, que se refiere a problemas de acidificación y toxicidad; el exceso de sales y sodificación; y la degradación física, la cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo (porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural), la degradación biológica, la erosión (hídrica y eólica) son los de mayor importancia en el Estado.

La conjunción de la erosión hídrica y eólica y la degradación biológica producen la disminución de la capa arable y la fertilidad del suelo, los cuales, al trabajar conjuntamente, provocan la degradación de mayor importancia para las actividades agrícola y pecuaria. Para llevar a cabo la definición de las áreas de mayor degradación se generaron mapas del contenido de materia orgánica del suelo, capacidad de reserva de humedad del suelo, erosión hídrica potencial y erosión eólica.

3.1.2.1. Materia orgánica del suelo

El mapa de contenido de materia orgánica se desarrolló a partir de datos de 1476 muestreos de suelo realizados por INEGI en el estado de Zacatecas. Los datos se interpolaron por el método Kriging (Isaaks and Srivastava, 1989), dando lugar al mapa estatal de materia orgánica.

3.1.2.2. Reserva de humedad del suelo

El mapa de reserva de humedad del suelo se basó en la fórmula de lámina de riego, la cual es la siguiente:

$$Lámina\ a\ (mm) = (CC - PMP) * Dap * Pr \quad Ec. 1$$

Donde:

CC= Capacidad de campo

PMP= Punto de marchitamiento permanente

Dap= Densidad aparente

Pr= Profundidad de suelo

Para determinar la CC se utilizó la fórmula empírica siguiente:

$$CC = 0.233[0.53 * \%Arcilla + 0.25 * \%Limo + 0.023 * \%Arena]^{1.45} \quad Ec. 2$$

Dicha fórmula requiere los valores del porcentaje de arcilla, limo y arena, los que se obtuvieron con base a determinaciones de textura de suelo realizados por INEGI.

A partir de los valores de CC, se calcularon los de PMP por medio de la siguiente fórmula empírica:

$$PMP = CC * 0.595 \quad \text{Ec. 3}$$

El cálculo de DA se derivó de la fórmula de porosidad siguiente:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Dap}{Dr} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

ε = porosidad

Dap= Densidad aparente

Dr= Densidad real (2.65 kg cm⁻³)

Si se asume que el porcentaje de saturación es igual a la porosidad, entonces, se utilizó la fórmula siguiente para estimar el porcentaje de saturación:

$$\% \text{ de saturación} = \frac{(1.86 * CC)}{100} \quad \text{Ec. 5}$$

Sustituyendo el valor constante de Dr y cambiando porosidad por el porcentaje de saturación, se tiene:

$$DA = 2.65 * (1 - \% \text{ saturación}) \quad \text{Ec. 6}$$

Por último, se utilizó la profundidad de suelo asociada a los valores de textura, los cuales se midieron por horizontes hasta llegar al material parental. La suma de los horizontes por cada perfil permitió estimar un solo valor de profundidad por sitio de muestreo, lo que generó un número de 1476 puntos. Sin embargo, se incluyeron los valores de cada horizonte estudiado, por lo que, se utilizaron en total 4655 puntos.

Utilizando la Ec. 1, se estimó el valor de lámina máxima que puede ser almacenada en un punto dado.

El mapa producido consistió de valores de lámina total que un suelo puede almacenar, por lo que, para su elaboración, se utilizó la suma de la lámina total estimada para cada punto de muestreo. Estos valores se interpolaron por kriging (Isaaks and Srivastava, 1989). El producto permitió observar la distribución de la capacidad de almacenamiento del suelo y los sitios donde se ha producido un mayor deterioro al reducirse dicha capacidad.

3.1.2.3. Erosión hídrica potencial

Para estimar los niveles de erosión hídrica en el estado de Zacatecas, se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978), la cual considera los siguientes factores:

$$E = R K L S C P$$

Ec. 7

Donde:

E = Erosión hídrica ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia ($MJ\text{-}mm\ ha^{-1}\text{-}h^{-1}$)

K = Factor de erodabilidad del suelo ($t\text{-}ha\text{-}h/ MJ^{-1}\text{-}mm^{-1}\text{-}ha^{-1}$)

L = Factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S = Factor de grado de la pendiente (adimensional)

C = Factor de la vegetación (adimensional)

P = Factor de práctica mecánica de control de la erosión (adimensional).

Un mapa de erosión potencial permite detectar los sitios de mayor vulnerabilidad a la erosión y es fácil de construir, ya que no existe la necesidad de conocer el estado actual de los cultivos o vegetación nativa, así como las prácticas mecánicas realizadas al suelo. Esto quiere decir que los componentes de vegetación (C) y el factor de práctica mecánica (P) no se incluyen en la construcción de un mapa de erosión potencial, quedando la ecuación como sigue:

$$E = R K L S$$

Ec. 8

Los valores de los parámetros de la USLE se estimaron utilizando la metodología de Figueroa (1991). Para la estimación del factor R se usó el mapa de isoerosividad, que divide al país en catorce regiones; el estado de Zacatecas se ubica en la región 4; la ecuación es la siguiente:

$$R = 2.8959X + 0.002983X^2$$

Ec. 9

El factor R de la USLE se estima en términos de $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ y X es el promedio de la lluvia anual del Estado en mm, la cual se estimó a partir de 98 estaciones meteorológicas ubicadas dentro del Estado (Medina y Ruiz, 2004). Dicha información se interpoló y manejó la información como una matriz de datos (no de manera puntual), lo que permitió el uso de sistemas de información geográfica (SIG), mediante el programa IDRISI (Eastman, 1995).

Para la asignación de valores del parámetro K, se utilizó una tabla de erosionabilidad o parámetro K, desarrollada por Figueroa (1991). El factor K está en función de la textura y la clase de suelo. Como se mencionó con anterioridad, el mapa de clases de suelo del Estado se obtuvo a partir de la digitalización de las 120 cartas de edafología de INEGI (CETENAL, 1972) de escala 1:50, 000. Las texturas se obtuvieron de información igualmente generada por INEGI. Con esto fue posible asignar un valor del parámetro K a clases y texturas de suelo, con lo que se generó un mapa de valores de K para el Estado.

En cuanto a la estimación del parámetro LS, se asignaron valores a combinaciones de pendiente y la longitud de la misma. Para esto se utilizó un programa de cómputo denominado "Erode", el cual fue producido especialmente para el programa IDRISI (Eastman, 1995); éste genera una serie de valores de LS, los cuales al ser asignados a combinaciones de longitud y pendiente, producen un mapa de valores de LS; estos valores se multiplican por los de R y K, con lo que se genera un mapa final de valores de erosión hídrica potencial, de acuerdo con la Ec. 8.

El producto final es un mapa categorizado de valores de erosión hídrica que va desde 0 hasta más de 50 ton ha^{-1} . Aunque el mapa generado consiste de valores continuos, para facilitar su manejo y uso, se decidió generar categorías predominantes, lo que simplifica la información y da una idea de las áreas que corren el mismo riesgo de ser afectadas por la erosión hídrica.

3.1.2.4. Erosión eólica

La erosión eólica en el estado de Zacatecas es tan importante como la hídrica, ya que ocasiona pérdidas de suelo de igual o mayor magnitud, que las producidas por la erosión hídrica (Amante, 1985, citado por Figueroa *et al*, 1991); por ello se decidió incluir este factor como uno de los importantes en la degradación del suelo. Para determinar las pérdidas de suelo por erosión eólica, se siguió la metodología definida por Figueroa *et al*. (1991), en la que se utilizó el modelo desarrollado por Woodruff y Siddoway (1965). Se trata de un modelo relativo a la erosión que se presenta en Garden, Kansas, EUA y fue diseñado exclusivamente para predecir erosión eólica en áreas agrícolas. El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$E = f(I', K', C', L', V') \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

I' = Erosionabilidad del suelo ($\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)

K' = Rugosidad del suelo (adimensional)

C' = Factor climático (%)

L' = Longitud equivalente del terreno (m)

V' = Cantidad equivalente de cubierta vegetal (t ha^{-1})

La relación entre los factores de la ecuación es complicada y aún no ha sido derivada otra que exprese a E como una función de las cinco variables independientes. Así, la ecuación es resuelta en los siguientes cinco pasos, donde los dos últimos involucran soluciones gráficas; en cada paso se evalúa el efecto de una variable adicional.

Paso 1. Determinar la erosionabilidad $E_1 = I'$.

Paso 2. Definir el efecto de la rugosidad, K' y encontrar la erosionabilidad $E_2 = I' * K'$.

Paso 3. Calcular el efecto de la velocidad del viento local y la humedad del suelo superficial, C' y obtener la erosionabilidad $E_3 = I' * K' * C'$.

Paso 4. Valorar el efecto de la longitud del terreno, L' , y encontrar $E_4 = I' * K' * C' * f(L)$. Esta determinación no es una simple multiplicación, porque L' , K' y C' están interrelacionadas. Este paso de la ecuación se resuelve con un nomograma.

Paso 5. Determinar el efecto de la cubierta vegetal, V , y estimar la erosión anual actual para un terreno específico. $E_5 = E_4 * f(V)$. La relación entre V y E no es simple, por lo que su solución también es gráfica (Figuroa, 1991).

3.1.2.4.1. Erosionabilidad del suelo (I')

Para la elaboración del mapa del factor I' , se utilizó la tabla de descripción de grupos de erosionabilidad eólica y se asoció con las clases texturales predominantes del suelo en la capa superficial. Los valores asignados fueron de arena media (entre 3 y 5 % de agregados del suelo mayores a 0.84 mm), lo que produjo valores de $469 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Para la clase media se utilizó la textura franco arenoso (25% de agregados de suelo mayores a 0.84 mm), la que produce $193 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por último, para la clase fina se usó la clasificación de “suelos franco arcillo limosos, con menos del 35% de arcilla”, en la que el 50% de los agregados del suelo son mayores a 0.84 mm, esto se tomó de los datos de textura producidos por INEGI donde se encontró un valor medio de 25% en 1632 sitios muestreados.

3.1.2.4.2. Rugosidad del suelo (K')

El factor K' es una medida del efecto de bordos originados por los equipos de labranza y siembra sobre la tasa de erosión. Para obtener K', fue necesario determinar el equivalente de rugosidad Kr, mediante la expresión:

$$Kr = 1.5748 * (h^2 / s) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

h = altura de bordos (cm)

s = espaciamiento entre bordos (cm)

En este caso, por ser un modelo diseñado específicamente para las áreas agrícolas, se utilizaron los valores promedio de 76 cm de espaciamiento entre bordos, el cual es el más comúnmente usado en las áreas agrícolas de Zacatecas, y una altura de 25 cm.

El valor de Kr se relaciona con rugosidad por medio de una curva; de ella se obtienen los valores, con los que se produjo un mapa del valor K'. Al multiplicar los mapas K' e l' se obtiene E₂ (paso 2), con lo cual se muestra que los factores (K' e l') no son independientes por lo que, requieren su combinación continua.

3.1.2.4.3. Factor climático (C')

Para el cálculo de este factor se requiere la velocidad del viento; para ello se utilizó información de 22 estaciones de la Red de Monitoreo Agroclimático del estado de Zacatecas del INIFAP; se obtuvieron valores promedio mensuales y anuales los cuales se asociaron a las coordenadas geográficas de las 22 estaciones involucradas, lo que permitió su interpolación por medio de geoestadística (Isaac and Srivastava, 1989). Por medio del programa GS⁺ (Robertson, 1998) se calcularon semivariogramas, y se obtuvieron los parámetros de cada uno de ellos (nugget, sill y rango), tanto para los valores anuales, como para algunos meses y periodos del año, con fines de verificar la correlación espacial entre los datos anuales y mensuales. Con los semivariogramas y sus parámetros, se realizó una interpolación de los datos a través del sistema de información geográfica IDRISI (Eastman, 1995). Con este procedimiento fue posible conocer la distribución de la velocidad de viento en m seg^{-1} y verificar la distribución de la misma entre meses y periodos del año con mayor intensidad de viento (marzo-junio).

El factor climático es un porcentaje del valor medio del factor C' de Garden City, Kansas, EUA, (valor relativo); con el mapa de velocidad de viento generado por interpolación para el estado de Zacatecas, se calculó un factor de acuerdo con la ecuación de Chepil *et al* (1962) citado por Figueroa *et al*, (1991):

$$C_1 = \frac{100 V^3}{0.26(P - E)^2}$$

Ec. 12

Donde:

C_1 = Índice climático local anual (expresado como porcentaje del de Garden City, Kansas)

V = Velocidad media anual del viento en $m\text{ seg}^{-1}$ a 9.1 m de altura

$100/0.26$ = Constante usada para expresar a C_1 , como un porcentaje del valor anual medio del $C(0.26)$ para Garden, City, Kansas

$P-E = 10 (P/E)$ = Índice de precipitación- evaporación (adimensional) de Thornthwaite, que se calcula así:

$$115 \left(\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P/25.4}{1.8T_i + 22} \right)^9 \right) \quad P_i \geq 12.7\text{ mm}, T_i \geq 1.7^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

P_i = Precipitación pluvial mensual (mm)

T_i = Temperatura media mensual ($^\circ\text{C}$)

Cuando los valores de P_i y T_i son menores de 12.7 mm y 1.7°C , se usan estos como los valores mínimos.

Para desarrollar el índice de precipitación- evaporación se utilizaron los valores medios mensuales provenientes de una serie de 40 años y 98 estaciones distribuidas en el estado de Zacatecas y sus alrededores. Por cada mes se generó un mapa de precipitación y temperatura, los cuales se relacionaron de acuerdo con la ecuación 12, utilizando para ello el programa IDRISI (Eastman, 1995); este mapa se relacionó con el de velocidad de viento anual, siguiendo la misma ecuación 12.

Dado que el modelo predictivo (Woodruff y Siddoway , 1965) tiene un periodo de tiempo base de un año y debido a la variación espacial de la velocidad del viento dentro del Estado impide obtener un valor único, sino más bien un gradiente de ellos, se desarrollaron mapas de los meses con mayor y menor intensidad de viento, para observar si los valores obtenidos corresponden a la distribución del porcentaje total a través del año; esta distribución fue presentada por Figueroa, *et al.*, (1991) y es semejante a la reportada por Echavarría *et al.*, (2003).

Una vez generado este mapa se multiplicó por el mapa denominado E2, para producir el mapa E3 (paso 3).

3.1.2.4.4. Longitud equivalente del terreno (L')

La longitud equivalente del terreno es la distancia desprotegida en el terreno, medida a lo largo de la dirección prevaleciente de la erosión eólica. Este factor permite conocer el cálculo de l' en un campo amplio sin protección. El mapa de longitudes provino de la estimación de longitudes de terreno generado por el programa "Erode", el cual esta diseñado para IDRISI (Eastman, 1995). De este mapa de longitudes para el Estado, se categorizaron los valores más comunes que son distancias de 100 a 500 m de longitud de terreno. Dadas la variación de las características de los terrenos agrícolas del estado de Zacatecas, se optó por usar solo algunos valores promedio, los cuales representan el promedio de las variaciones presentes en el nomograma usado para calcular los valores de corrección de la longitud del terreno.

El paso 4 valora el efecto de la longitud del terreno L' y para encontrar E_4 , no se realiza una multiplicación, sino que se resuelve con un nomograma que aparece en la metodología de Figueroa *et al.* (1991).

3.1.2.4.5. Cantidad equivalente de cubierta vegetal (V')

La cubierta vegetal ejerce un efecto sobre la erosión y depende del tipo de vegetación, la cantidad y de la orientación de residuos de cultivos de granos pequeños; este último se define como la condición de referencia y se refiere a manojos de tallos de cultivos de granos pequeños de 25 cm de longitud, sobrepuestos en forma horizontal en dirección del viento en surcos a 25 cm. La cantidad equivalente de cubierta vegetal se obtuvo multiplicando R' , S' y K_o , lo que produce $f(R')$. Por último, la relación de variables para determinar E_5 se hace a través de una solución gráfica, utilizando un nomograma que relaciona E_4 y el factor V , de lo que se obtiene E_5 .

El mapa final estima la producción de erosión eólica en las áreas agrícolas.

3.1.2.5. Integración del mapa de degradación del suelo

La integración del mapa de degradación del suelo esta basada en su definición (UNCED, 1992), como “El proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir bienes y servicios”. De los seis tipos de degradación establecidos (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980) que son: la erosión hídrica y eólica; la degradación biológica, asociada con la disminución de materia orgánica y fertilidad del suelo; la degradación química, que se refiere a problemas de acidificación y toxicidad; el exceso de sales y sodificación; y la degradación física, la cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo (porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural), tres de ellos son los mas importantes en el estado de Zacatecas; la erosión hídrica y eólica; la degradación biológica, asociada con la disminución de materia orgánica y fertilidad del suelo y la degradación física, la cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo (porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural). Tanto la erosión hídrica como la eólica y la degradación física se expresan en términos de la

capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, ya que el impacto de compactación, escurrimiento, erosión, etc., se ve reflejada en esta propiedad del suelo.

Para integrar el efecto degradativo actual a la aptitud teórica de los suelos, se utilizó el mapa de reserva de humedad del suelo, el mapa del estado de la materia orgánica en el suelo y los mapas de aptitud de suelos agrícolas y pecuarios.

El mapa de humedad del suelo se categorizó de la siguiente manera:

- Clase baja; incluye los suelos con capacidad de almacenamiento de 1 a 8 cm de lámina de agua
- Clase media; incluye los suelos con capacidad de almacenamiento de 8 a 16 cm de lámina de agua
- Clase alta; incluye los suelos con capacidad de almacenamiento mayor a 16 cm de lámina de agua

Del mapa de materia orgánica del suelo se crearon cuatro clases que son:

Del 0 al 1% de materia orgánica se considera bajo

Del 1 al 2% de materia orgánica se considera medio – bajo

Del 2 al 3% de materia orgánica se considera medio

Del 3 al 4% de materia orgánica se considera alto

Los mapas de aptitud de suelo agrícola y pecuario, se mantuvieron en sus categorías originales, las cuales son cuatro y corresponden a clases de suelo y sus usos potenciales.

Finalmente, al integrarse los tres mapas, reserva de humedad, materia orgánica y aptitud (agrícola y pecuaria, respectivamente), se generó un mapa que presenta la degradación del suelo en tres niveles (alto, medio y bajo); además, el mapa muestra como la aptitud del suelo se ha modificado por efecto de la degradación. También describe cual de las clases de aptitud del suelo se ha degradado con mayor intensidad.

3.2. COMPONENTE AGUA

3.2.1. Aguas superficiales

3.2.1.1. Cuencas hidrológicas

La cuenca es un terreno donde el agua, sedimentos y materiales disueltos drenan a un punto en común a lo largo de un arroyo, humedal, lago o río. Sus márgenes están marcados por los puntos más altos de este terreno. Para facilitar el entendimiento de las aguas superficiales, se decidió dividir el estado de Zacatecas en cuencas. Las cuencas se dividen en áreas más pequeñas conocidas como subcuencas, las cuales pueden ser de diferente superficie. Al igual que las cuencas, las subcuencas se encuentran también delimitadas por puntos altos de un terreno y también confluyen a un cauce principal de la cuenca.

Para la delimitación de las subcuencas del Estado, se usaron cartas hidrológicas superficiales de INEGI, a escala 1:250,000.

3.2.1.2. Balance hídrico

El estudio está basado en la ecuación de balance hídrico:

$$R = P - ETR - E - Pp$$

Ec. 14

Donde:

R = Recarga del acuífero (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

ETR = Evapotranspiración real (mm)

E = Escurrimiento (mm)

Pp = Percolación profunda (< 60 cm de profundidad de suelo)

Con esta ecuación de balance, se facilitó el análisis de la recarga de agua de los acuíferos del estado de Zacatecas, donde se consideraron datos de precipitación, evaporación, temperatura, evapotranspiración, constantes de cultivo y tipo de suelo. Otro factor incluido en la ecuación es el escurrimiento producido por la precipitación pluvial. Un último factor usado fue el de percolación profunda, agregado como condición para no sobrestimar el total de la recarga.

Para la estimación de la precipitación se consideró la serie histórica de 1961 al 2003, con base en el estudio de 98 estaciones (Medina y Ruiz, 2004). Con los datos se realizó una interpolación para construir mapas de precipitación, uno para cada mes, hasta llegar a componer un mapa anual. El mapa presenta un rango de precipitaciones que va desde 300 a 900 en clases de 100 mm.

De igual manera se usaron los datos de Medina y Ruiz (2004) para elaborar mapas mensuales de evaporación; estos mapas mensuales se empalmaron para conformar la salida de un mapa anual, el cual será de utilidad en la formación de mapas de evapotranspiración.

Los datos de temperatura fueron tomados de Medina y Ruiz (2004) para producir un mapa de temperatura media anual con un rango de <12 a > 18 °C, en clases de un grado centígrado.

La evapotranspiración (ET) es el conjunto de los procesos de evaporación y la transpiración.

El cálculo de la ET es esencial para la estimación del uso de agua en los cultivos y para estudiar el efecto del estrés de la sequía sobre el desarrollo ellos con modelos de simulación (Van Kraalingen y Stol, 1997).

La evapotranspiración de referencia (ET_o) o evapotranspiración potencial (ETP), se estimó a partir de los datos del tanque evaporímetro tipo "A". El cálculo consistió en utilizar la evaporación acumulada promedio por cada mes y multiplicada por los coeficientes del Cuadro 3 (Medina y Ruiz, 2004), los cuales representan el coeficiente de transformación de valores del tanque evaporímetro a valores de evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o). Dichos coeficientes se deberán multiplicar por los valores de evaporación medidos en el tanque evaporímetro tipo A (Doorenbos and Pruitt, 1977). La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente.

Cuadro 3. Coeficientes para transformar valores provenientes del tanque evaporimetro tipo A en ETP.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.70	0.70	0.60	0.60	0.60	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70	0.70

3.2.1.2.1. Coeficientes de cultivo

Un coeficiente de cultivo, K_c , es un coeficiente de ajuste que permite calcular la ET a partir de la ETP o E_{To} . Estos coeficientes dependen fundamentalmente de las características propias de cada cultivo, por tanto, son específicos para cada uno de ellos y dependen de su estado de desarrollo y de sus etapas fenológicas por ello, son variables a lo largo del tiempo. Dependen también de las características del suelo y su humedad, así como de las prácticas agrícolas y del riego. Estos se obtuvieron mediante estudios realizados por el Campo Experimental Zacatecas del INIFAP (Cuadro 4). Los K_c se multiplicaron por las imágenes formadas de la ETP o E_{To} , para la elaboración de imágenes digitalizadas con los métodos que se describen posteriormente para conocer el gasto hídrico específica por los cultivos.

Los valores de K_c aumentan conforme lo hace la superficie foliar y el cubrimiento del suelo por la vegetación o por un cultivo; del mismo modo, K_c disminuye cuando decrece el periodo fisiológico de los cultivos o de la vegetación.

Cuadro 4. Valores de Kc en cultivos anuales y de vegetación natural.

MESES	COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc)					
	FRIJOL	CHILE	CEBOLLA	PASTOS	MATORRAL	BOSQUE
	TEMPORAL	RIEGO		ANUAL		
Enero	0.10		0.725	0.375	0.188	0.20
Febrero	0.10		0.60	0.35	0.175	0.30
Marzo	0.10		0.40	0.50	0.250	0.40
Abril	0.10	0.48		0.75	0.375	0.50
Mayo	0.10	0.70		0.87	0.435	0.68
Junio	0.10	1.03		0.90	0.450	0.85
Julio	0.52	1.00		0.885	0.443	0.73
Agosto	0.82	0.93		0.87	0.435	0.61
Septiembre	0.975	0.60		0.71	0.355	0.50
Octubre	0.785		0.30	0.55	0.275	0.425
Noviembre	0.10		0.60	0.48	0.240	0.35
Diciembre	0.10		0.85	0.40	0.200	0.20

Fuente: Mojarro *et al.*, (2004).

Para facilitar el manejo de la información se definieron áreas homogéneas de uso de suelo, de acuerdo con las cartas de uso del suelo realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 1995). Se seleccionaron áreas donde se practica agricultura de temporal, de riego, de agostadero de matorral y de pastizal y el bosque. En las áreas de temporal se consideró al frijol porque es el cultivo predominante en el Estado; en las de riego el cultivo de chile en el ciclo de cultivo primavera-verano y el de cebolla como cultivo de riego en el ciclo de otoño-invierno. Las áreas de agostadero se dividieron en pastizal y matorral. Para el bosque se consideró al pino como la vegetación nativa predominante.

3.2.1.2.2. Escurrimiento

Otro factor considerado en la ecuación del balance hídrico es el escurrimiento. La precipitación pluvial juega el rol más importante en la generación del escurrimiento superficial (Serna y Velásquez, 1988a). Al igual que en el caso de otros cálculos, la delimitación de áreas homogéneas de uso del suelo, fue determinante para establecer los niveles de escurrimiento que se pueden producir. Se utilizaron mapas de uso pecuario o agostadero (pastizal, matorral y suelo desnudo), forestal y de uso agrícola (temporal y riego) para obtener el escurrimiento, además se consideraron también mapas de evapotranspiración de los cultivos y de precipitación. Los mapas de escurrimiento mensuales se sumaron para obtener un mapa de escurrimiento anual.

La determinación del escurrimiento se basó en el modelo lineal de esorrentía propuesto por Blackburn *et al.* (1984) con datos experimentales de escurrimiento, obtenidos en lotes de escurrimiento por INIFAP.

3.2.1.2.2.1. Coeficientes de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se define (Mondragón, 2004), como la relación del caudal que fluye sobre el terreno y las unidades hidrogeomorfológicas, que integran a la cuenca.

Con la información de la precipitación pluvial y del escurrimiento superficial expresado como lamina escurrida, se estimó el coeficiente de escurrimiento (CE) y la cantidad de lluvia umbral para iniciar el escurrimiento (P_0), de acuerdo con el parámetro del modelo lineal de esorrentía propuesto por Blackburn *et al.* (1984):

$$L_{esc} = CE(PP - P_0)$$

Ec. 15

Donde:

L_{esc} = Lámina de escurrimiento medida (mm)

CE = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

PP = Precipitación (mm)

P_0 = Precipitación necesaria para iniciar el escurrimiento (mm)

El coeficiente de escurrimiento se estimó a partir de la lámina escurrida en varios lotes experimentales de 3 X 22 m (66 m²), ubicados en dos municipios de Juchipila y Pánuco, Zacatecas (Echavarría *et al.*, 2004, Serna y Velásquez 1987; 1988b, Velásquez y Serna, 1988 y Serna, 1990). Para generar los valores del CE y P_0 , se utilizaron los datos colectados en los lotes, en los cuales se obtuvieron durante varios ciclos de 1986 al 2004. Con la información obtenida, se hizo un análisis de regresión lineal mediante el programa SAS (SAS, 1992), para estimar el escurrimiento.

El modelo de regresión utilizado fue:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_i$$

Ec. 16

Donde:

Y = Escurrimiento (mm)

B_0 = Intercepto (mm)

B_1 = Pendiente

X_i = Lámina de precipitación (mm) o LP

Para llegar a la ecuación de Blackburn *et al.* (1984), se hicieron las siguientes asunciones:

Cuando $Y = 0$; entonces $X_i = P_0$, la cual representa el umbral o inicio de escurrimiento y se obtiene así:

$$\beta_0 + \beta_1 X = 0$$

$$\beta_1 X = -\beta_0$$

$$X = \frac{-\beta_0}{\beta_1} = P_0$$

Se asume que $B_1 = C_{esc}$

Donde:

C_{esc} = Coeficiente de escurrimiento

Por lo tanto, sustituyendo tenemos:

$$Esc = Lesc(LP - P_0)$$

Ec. 17

Esta ecuación es la propuesta por Blackburn *et al.* (1984).

3.2.1.2.3. Percolación profunda

Este se agregó a la ecuación de balance hídrico para mejorar la precisión del modelo, ya que restringe la recarga e impide una sobre valoración del mismo.

La restricción consiste en seleccionar aquellos puntos ubicados en el Estado, cuya capacidad de almacenamiento rebase los 16 cm de lámina. Aplicando la ecuación de la lámina de riego, la cual se expresa así:

$$LR = \frac{CC - PMP \times DA \times Pr}{100} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

LR = Lámina de riego

CC = Capacidad de campo

PMP = Punto de marchites permanente

DA = Densidad aparente

Pr = Profundidad

Despejando Pr se obtiene:

$$Pr = \frac{LR}{CC - PMP \times DA} \times 100 \quad \text{Ec. 19}$$

Considerando los siguientes valores promedio:

LR= 16 cm

CC= 33%

PMP= 14%

DA = 1.4 gr cm³

$$Pr = \frac{16}{33 - 14 \times 1.4} \times 100$$

El resultado obtenido representa un estrato de profundidad de suelo que va de 57 a 64 cm, la cual se convierte en el umbral de profundidad de suelo, el cual, una vez que se encuentra saturado de humedad, podrá penetrar más allá del rango definido y se considera que dicha humedad servirá como recarga, ya que habrá rebasado el nivel que las raíces de los cultivos que se establecen comúnmente en el Estado.

Para definir la profundidad límite, se utilizó el mapa de reserva de humedad, el cual fue elaborado como se describió en la sección del componente suelo.

3.2.1.2.4. Recarga

La recarga de un acuífero proviene del agua de lluvia, la cual intenta penetrar hacia el acuífero y esto dependerá de la posición de la cuenca donde la lluvia sea depositada. Si el agua de lluvia se deposita en los bordes medios y superiores de la cuenca (cuenca media y alta), el agua iniciara su infiltración hacia el acuífero, penetrando a través del suelo; y solo aquella que no sea aprovechada por la vegetación nativa del bosque y agostadero, podrá alcanzar el acuífero. También existe la posibilidad de que a través de un flujo preferencial, debido a fracturas y fallas geológicas, el agua de lluvia se

mueva hacia el material poroso del acuífero con mayor rapidez. Por otro lado, si el agua se deposita en la parte baja de la cuenca y no es captada por las plantas o cultivos que en ella crecen, podrá ir lentamente profundizando hasta llegar al acuífero. Este cálculo de la recarga se estimó a partir de la ecuación de balance hídrico (Eq. 14), con la cual se generaron mapas de los posibles sitios, considerando solo la posibilidad de que el agua de recarga, es aquella depositada en la parte baja de la cuenca que no fue utilizada por las plantas y sin considerar la posibilidad de un flujo preferencial por fracturas o fallas geológicas (Peña y Arcos, 2004).

3.2.2. Aguas subterráneas

3.2.2.1. Delimitación de acuíferos

Para delimitar los acuíferos se utilizaron las coordenadas proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA).

3.2.2.2. Piezometría

Se utilizaron datos de piezometría medidos por la CNA (datos no publicados), los cuales representan el nivel estático del agua de los pozos en estudio, los cuales sirven para conocer el nivel de abatimiento o recarga de los acuíferos durante un periodo determinado. Dichos estudios se realizaron en tiempos diferentes, durante el año y en acuíferos diferentes. En el estudio se consideraron únicamente acuíferos en los que se han realizado mediciones de piezometría: Aguanaval, Calera, Benito Juárez, Chupaderos, Ojocaliente, Loreto, Guadalupe Bañuelos y La Blanca; estos comprenden un área compacta de mayor explotación acuífera en el centro del Estado.

3.2.2.3. Recarga y abatimiento de acuíferos a partir de datos piezométricos.

Con la información de piezometría se interpolaron los valores georeferenciados por medio de geoestadística (Isaaks y Srivastava, 1989). De cada estudio realizado en los acuíferos del Estado, se estimó una proyección del nivel estático que mostraba el acuífero al momento del estudio. Posteriormente se realizaron operaciones aritméticas entre los mapas, restando el estudio subsiguiente del anterior, para crear una imagen de diferencias positivas y negativas, las cuales expresan las recargas (valores positivos) y abatimiento (valores negativos) del acuífero.

3.3. COMPONENTE VEGETACIÓN

3.3.1. Estudios de la vegetación

Para evaluar el componente vegetación se utilizó la carta de uso del suelo realizada por la Universidad Autónoma de México (UNAM) en 1995. Las clases de vegetación definidas son las siguientes:

1. Bosque bajo abierto
2. Bosque de encino
3. Bosque de encino-pino
4. Bosque de pino
5. Bosque de pino-encino
6. Bosque de táscate
7. Chaparral
8. Cuerpo de agua
9. Matorral crasicaule
10. Matorral desértico micrófilo
11. Matorral desértico rosetófilo

12. Matorral subtropical
13. No aplicable
14. Pastizal halófilo
15. Pastizal –huizachal
16. Pastizal inducido
17. Pastizal natural
18. Riego
19. Riego eventual
20. Selva baja caducifolia
21. Selva baja subcaducifolia
22. Temporal
23. Vegetación desértico micrófila
24. Vegetación halófila
25. Zona urbana

Los tipos de vegetación fueron convertidos a vectores para sobreponerlos a ortofotos aéreas que cubren todo el Estado; con esto, se generaron nuevos vectores. Adicionalmente, se utilizaron los vectores de vegetación de INEGI, y al sobreponerse sobre los vectores iniciales ya corregidos con la fotografía aérea, la delimitación de áreas que se obtuvo es mas precisa.

3.3.2. Índice de vegetación de la diferencia normalizada (ndvi)

Las imágenes multiespectrales han sido utilizadas para la valoración de diversos tipos de vegetación nativa desde la década de los 70's. Los datos de las diferentes plataformas satelitales como LANDSAT-TM, SPOT, e IRS LISS-II, han sido utilizados con fines de clasificación y mapeo de la vegetación nativa, así como la medición de la productividad y detección de plantas tóxicas (Tueller 1989; Everitt *et al.*, 1993; Clark *et al.*, 2001; Hunt *et al.*, 2003). A partir del uso de las imágenes satelitales, se desarrollo el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), que utiliza imágenes multiespectrales de satélite y de la relación de la reflexión en la imagen de la región roja visible

(área de color rojo que representa la absorción máxima cercana a la clorofila α) y la región del infrarrojo cercano (NIR), produce el NDVI a través de la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)} \quad \text{Ec. 20}$$

Este índice representa la diferencia en la absorción y reflexión de la longitud de onda del rojo, el cual es fuertemente absorbida por la vegetación verde, y la longitud de onda del infrarrojo cercano, el cual es fuertemente reflejada por la vegetación verde (Hill *et al.*, 1999). El NDVI fue originalmente propuesto como un medio para estimar biomasa verde (Tucker, 1979). Las bases de la relación entre el NDVI y la biomasa verde parecen estar relacionadas con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (Sellers, 1985).

Los datos del NDVI derivado del AVHRR o del SPOT Vegetación son los más usados para monitoreos regionales porque su tamaño de píxel es grande (1 km²). Estos datos son colectados diariamente y compuestos en períodos cortos de una semana, 10 días o dos semanas para generar imágenes libres de nubes. Estas imágenes muestran la distribución espacial de la vegetación en respuesta a los cambios de precipitación sobre grandes áreas (Hunt y Miyake, 2006).

El NDVI derivado de imágenes de satélite ha sido fuertemente ligado a las condiciones de la vegetación y a la biomasa de la vegetación en la superficie de la tierra (Tan y Shih, 1997; Fang *et al.*, 1998; Stoms *et al.*, 1998; Jiang e Islam, 1999; Ochi y Murai, 1999).

El rango de valores del NDVI va de -1 a 1; valores grandes de éste índice indican que la superficie de la tierra está cubierta con vegetación densa y saludable; es decir, que no presenta estrés por déficit de humedad, plagas o

enfermedades; valores negativos indican la presencia de nubes, nieve, agua o suelo sin vegetación (Yin y Williams, 1997).

En este estudio se utilizó el mapa de NDVI de los valores promedio de la primera decena del mes de octubre de 1998 a 2003 para relacionarlos con los tipos diferenciados de vegetación nativa e inducida en el estado de Zacatecas. Una reclasificación de los mismos, permitió inferir el estado actual de salud de cada especie vegetal definida.

Los valores obtenidos de NDVI van desde 36 a 234. Se construyeron cinco clases que son:

Clase 1= 1 a 50; NDVI muy bajo

Clase 2= 50 a 100; NDVI bajo

Clase 3= 100 a 150; NDVI medio

Clase 4= 150 a 200; NDVI alto

Clase 5= 200 a 250; NDVI muy alto

3.4. FRAGILIDAD NATURAL

3.4.1. Concepto de fragilidad

El medio ambiente está formado por elementos naturales que son influidos en diversos grados por la acción humana, lo que da como resultado desde ambientes o paisajes naturales, hasta ambientes muy afectados por la acción del hombre, como las áreas urbanas, minas, presas, etcétera.

La capacidad de asimilación de los impactos antropogénicos es diferente, dependiendo de la capacidad del medio para enfrentarlos. Lo anterior fundamenta los conceptos de **resistencia**, **resiliencia** y **fragilidad**, los cuales muestran los comportamientos diferentes del medio natural frente a un agente de presión, principalmente a la actividad humana.

La resistencia muestra la habilidad de una unidad territorial para evitar desplazamientos desde el lugar inicial o estado de equilibrio dinámico (Seybold *et al.*, 1991). Este primer concepto señala que cualquier medio tiene una capacidad de permanencia dentro de un equilibrio dinámico. A mayor resistencia, menor capacidad de movilización, y a menor resistencia, mayor movilidad. La capacidad de permanencia o la resistencia dependerá del arreglo y la estructura de los componentes que integran la unidad territorial, y de la magnitud de la presión ejercida sobre esta unidad.

Una unidad territorial puede romper su capacidad de resistencia al manifestarse un agente de presión y desplazarse hacia otro sitio o condición; sin embargo, existe una capacidad de retorno al estado inicial a pesar del impacto. A esta condición de extensión y retorno se le llama **elasticidad**, y la velocidad con la cual regresa se le llama **resiliencia** (Whisenant, 1999).

El tercer concepto que se muestra es el de **fragilidad**, que puede derivarse de la asociación resistencia-resiliencia. La fragilidad, de manera general se considera como *la capacidad intrínseca de la unidad territorial a enfrentar agentes de cambio, basado en la fortaleza propia de los componentes y en la capacidad y velocidad de regeneración del medio* (SEMARNAP, 2000).

Por lo anterior, se asume que un territorio frágil es más susceptible a experimentar cambios sustanciales de manera más rápida que un territorio poco frágil. Sin embargo, en el análisis de fragilidad no se consideran elementos sociales o económicos y éstos deberán incorporarse posteriormente, al estudiar los subsistemas social y productivo, que son etapas adicionales en estudios del ordenamiento territorial.

Para la construcción del mapa de fragilidad, se ha considerado la información cartográfica digital de los tres componentes naturales ya descritos (suelo, agua y vegetación). Éstos se evalúan por separado y posteriormente se integran en un producto final. Los criterios rectores para evaluar los niveles de fragilidad son los siguientes:

3.4.1.1. Relieve

Se evalúa en función de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, la cual considera la profundidad como resultado del nivel de la degradación y la topografía. Las clases en que se dividió el mapa fueron:

Clase 1= Suelo con capacidad para almacenar de 0 a 5 cm de lámina de agua

Clase 2= Suelo con capacidad para almacenar de 5 a 10 cm de lámina de agua

Clase 3= Suelo con capacidad para almacenar de 10 a 20 cm de lámina de agua

Clase 4= Suelo con capacidad para almacenar mas de 20 cm de lámina de agua

3.4.1.2. Suelo

Se evalúa en función del concepto de erosión hídrica potencial y la posibilidad de cambio de sus propiedades físicas y químicas. Las clases en que se dividió el mapa fueron:

Clase 1= Pérdidas de suelo de 0 a 2 ton ha⁻¹ año⁻¹

Clase 2= Pérdidas de suelo de 2 a 7 ton ha⁻¹ año⁻¹

Clase 3= Pérdidas de suelo mayores a 7 ton ha⁻¹ año⁻¹

En este caso, las clases se fundamentaron en valores reportados por Serna y Echavarría (2002).

3.4.1.3. Vegetación

Se considera el estado actual de las categorías de vegetación definidas a través del uso del NDVI. A partir de las imágenes de NDVI, de las cuales se excluyeron áreas agrícolas debido a que estas han sido fuertemente alteradas, se usaron los valores reales, que van desde 36 a 234, de los que se construyeron cinco clases que son:

Clase 1= Muy bajo; valores de 1 a 50

Clase 2= Bajo; valores de 50 a 100

Clase 3= Medio; valores de 100 a 150

Clase 4= Alto; valores de 150 a 200

Clase 5= Muy Alto; valores de 200 a 250

3.4.2. Mapa de fragilidad.

Para la construcción del mapa de fragilidad, se consideraron cinco niveles: muy alta, alta, media, baja y muy baja, de acuerdo con la convergencia de los parámetros y los criterios siguientes que permitieron la determinación de la fragilidad (Cuadro 5):

1. Se considera que en el Estado no existe ningún tipo de vegetación, suelo o relieve que no haya sido perturbado o que pudiera considerarse de fragilidad muy baja, ya que cualquiera de sus variantes ha estado expuesta, de alguna forma, a agentes limitantes o de perturbación.
2. Cada uno de los elementos en juego (vegetación, suelo y relieve) tiene el mismo valor relativo, es decir, ninguno se pondera sobre los otros dos.
3. La presencia del elemento más alto determina la clasificación del grupo, es decir, si en un polígono cualquiera un elemento presenta alta fragilidad y los dos restantes tienen alguna categoría más baja, el polígono se clasifica con un valor de fragilidad alta.

3.5. INTEGRACIÓN DEL SUSBSISTEMA NATURAL (SUELO, AGUA, VEGETACIÓN)

Como parte final de la metodología seguida para la caracterización y el diagnóstico de los tres principales recursos naturales y utilizando los productos cartográficos previamente desarrollados (suelo y agua), se obtuvieron algunos productos de integración del subsistema, que son: disponibilidad y deterioro del suelo y del agua, oportunidades y limitantes del suelo y del agua para las actividades agrícolas. El mapa de fragilidad natural no se asoció a los recursos agua y suelo, ya que representa solo la vegetación nativa, se presentará y se discutirá por separado.

Cuadro 5. Árbol de decisiones para la construcción del mapa de fragilidad.

FRAGILIDAD				
BAJA	MEDIA	MEDIA ALTA	ALTA	MUY ALTA
Alta o media capacidad de reserva de humedad	Alta o media capacidad de reserva de humedad	Alta, media, baja o muy baja capacidad de reserva de humedad	Baja o muy baja capacidad de reserva de humedad	Baja o muy baja capacidad de reserva de humedad
Baja erosión hídrica	Media erosión hídrica	Alta, media o baja erosión hídrica	Alta, media o baja erosión hídrica	Media o baja erosión hídrica
Valores muy alto, alto y medio de NDVI	Valores muy alto, alto y medio de NDVI	Valores muy alto, alto y medio de NDVI	Valores alto y medio de NDVI	Valores alto y medio de NDVI
	Valores muy bajos y bajos de NDVI + alta y media de capacidad de reserva de humedad+baja erosión hídrica	Valores muy bajos y bajos de NDVI + alta y media de capacidad de reserva de humedad+media erosión hídrica	Valores muy bajos y bajos de NDVI + alta y media de capacidad de reserva de humedad+media erosión hídrica	

3.5.1. Suelo

Para el recurso suelo se considera como disponible para el uso productivo, todos los suelos que tienen una profundidad o desarrollo edáfico que rebasa 30 cm, que no presentan erosión severa ($>20 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) ni condiciones salinas, sódicas o salino-sódicas; es decir, que tienen una alta capacidad para el desarrollo de la actividad agropecuaria. En este caso se utilizó el mapa de reserva de humedad del suelo para separar las áreas de mayor profundidad, seleccionando aquellos que pueden almacenar de 8 a 12 cm de lámina de agua. Con las condiciones anteriores se elaboró el mapa de suelo disponible el desarrollo de actividad agropecuaria.

3.5.2. Agua superficial y subterránea

La disponibilidad de aguas superficiales se refiere a aquellas zonas donde existe un volumen de escurrimiento que permita el aprovechamiento de agua para varios usos sin que haya problemas permanentes de déficit de ella; los niveles de escurrimiento mayores a 100 mm se consideraron como áreas de escurrimiento “disponible” y los menores a este valor, como “no disponible”.

En cuanto a la disponibilidad de aguas subterráneas, se considera como acuíferos disponibles los que están en explotación; los sobreexplotados tendrán una condición de uso limitado. Se crearon cuatro clases de abatimiento de acuíferos a partir de las diferencias de abatimiento del manto freático mostrado en los últimos 30 años:

Abatimiento bajo de 0 – 5 m

Abatimiento medio de 5 – 10 m

Abatimiento alto de 10 – 20 m

Abatimiento muy alto > 20 m

De los 34 acuíferos del Estado, 10 se consideran sobreexplotados y el resto como de baja disponibilidad de agua, ya que su baja explotación no se debe a un uso controlado, sino a la menor disponibilidad del recurso

Finalmente, se presentan las posibles combinaciones de los elementos disponibles:

- a) Sin recursos
- b) Suelo disponible

- c) Agua subterránea con bajo abatimiento
- d) Agua subterránea con bajo abatimiento y suelo disponible
- e) Agua subterránea con medio abatimiento
- f) Agua subterránea con medio abatimiento y suelo disponible
- g) Agua subterránea con alto abatimiento
- h) Agua subterránea con alto abatimiento y suelo disponible
- i) Agua subterránea con muy alto abatimiento
- j) Escurrimiento disponible
- k) Escurrimiento y suelo disponible
- l) Escurrimiento y abatimiento bajo
- m) Escurrimiento, abatimiento bajo y suelo disponible
- n) Escurrimiento y abatimiento medio
- o) Escurrimiento, abatimiento medio y suelo disponible
- p) Escurrimiento y abatimiento alto
- q) Escurrimiento, abatimiento alto y suelo disponible
- r) Escurrimiento y abatimiento muy alto

Las clases resultantes representan tanto disponibilidad como deterioro, por lo que al separarse, se presentaron en dos mapas excluyentes.

3.5.3. Vegetación nativa

Las clases de fragilidad de la vegetación nativa se asociaron a niveles de intervención tecnológica, lo que constituye la propuesta para el componente vegetación.

La información así integrada, en mapas de disponibilidad, se uso para realizar una propuesta de intervención tecnológica con criterios de sustentabilidad y apoyado en las recomendaciones tecnológicas actuales, en la que se integró la información generada en el estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio está constituido por una etapa de **caracterización**, una de **diagnóstico** y una **propuesta** de uso de tecnología basada en resultados obtenidos. Las dos primeras están orientadas a la identificación de limitaciones, dinámica del medio ambiente y potencialidades, tomando en cuenta los recursos suelo, agua y vegetación, tal como se estableció en el objetivo general. La última parte intenta aprovechar la información generada por el estudio, para integrarla con información generada por otros trabajos de investigación, y orientar la intervención tecnológica acorde a las condiciones actuales de los recursos, manteniendo el criterio de sustentabilidad; también se complementa el estudio de ordenamiento territorial del estado de Zacatecas.

La **caracterización** sirve para responder preguntas como: ¿con qué recursos se cuenta?, ¿cuánto se tiene de ello y donde se localizan?; esto permite identificar, la disponibilidad de ellos en la región y, las formas de uso y manejo. El **diagnóstico** evalúa la situación de los recursos naturales, de la población y de las actividades productivas que ésta realiza, así como, responder a la pregunta del estado en que se encuentran los recursos y trata de explicar el porque de su estado.

Para este caso, se considera como **potencialidad**, a las características que denotan una aptitud o cualidad para el desarrollo de una actividad, por lo que tiene una condición de disponible (únicamente desde el punto de vista de las

propiedades del suelo). Se califica como **limitante** a la condición o el conjunto de condiciones que restringen el desarrollo de cierto uso, por sus características naturales o porque pueden desencadenar impactos considerables. Los terrenos con limitantes pueden considerarse como no disponibles, pero no necesariamente deteriorados.

4.1. COMPONENTE SUELO

4.1.1. Capacidad agrológica o aptitud de suelo

4.1.1.1. Clases de suelo agrícola

Las clases y superficie de suelo agrícola resultantes en el estado de Zacatecas se describen a continuación, el mapa se presenta en la Figura 1.

Clase 1 (Superficie =145,629 ha). Suelos con propiedades adecuadas para la actividad agrícola intensiva; no muestran ninguna limitante o estas son de poca importancia.

Clase 2 (Superficie =577,164 ha). Suelos con alguna o algunas limitaciones menores, que hacen necesaria la aplicación de técnicas para el tratamiento del suelo. En general, pueden producir buenos rendimientos.

Clase 3 (Superficie =236,877 ha). Suelos con un mayor número de limitantes simultáneas (baja fertilidad, o aridez excesiva, pendientes moderadas, salinidad y/o sodicidad, etc.). Es posible aprovecharlos para la agricultura.

Clase 4 (Superficie= 205,018 ha). Suelos de muy baja o nula aptitud agrícola. Poseen una capa fértil muy delgada, inferior a 10 cm, o fases líticas, con alta pedregosidad superficial; pueden tener pendientes superiores a 25°, con gran susceptibilidad a la erosión hídrica.

4.1.1.2. Clases de suelo para uso pecuario

Las clases y superficie de suelo que resultaron para uso pecuario se describen a continuación; el mapa se presenta en la Figura 2.

Clase 1(Superficie = 289,454 ha). Los suelos de esta clase presentan características que permiten el desarrollo de actividades de pastoreo. Presentan suelos con poca o nula pendiente, que permiten el crecimiento de pastos y otra vegetación nativa para el consumo por el ganado.

Clase 2 (Superficie = 1'387,529 ha). Suelos que requieren de técnicas de bajo costo para poder llevar a cabo pastoreo o que pueden ser utilizados por cierto tipo de ganado. Requieren de técnicas de manejo de pastizales como la rotación de potreros.

Clase 3 (Superficie = 111326 ha). Suelos con limitantes que obligan al uso de alta tecnología para su aprovechamiento. Puede haber elevado costo económico y en deterioro físico de los suelos.

Clase 4 (Superficie = 2'303,955 ha). Suelos con características desfavorables para el desarrollo de esta actividad.

4.1.1.3. Asociación de la aptitud del suelo y acciones tecnológicas de uso sustentable

El Cuadro 6 presenta el tipo de actividad productiva que debiera asociarse a cada clase de aptitud productiva en suelos agrícolas. En el caso en que se realicen actividades que no corresponden al nivel de aptitud, se presentan las acciones de reconversión que pueden contribuir a lograr la productividad propia de cada nivel asignado. Las clases 3 y 4 que son las clases de menor aptitud, representan 441,895 ha en el Estado y requieren de la reconversión. Sin embargo, la clase tres, que son 236,877 ha se encuentran en un nivel de recuperación mayor que las correspondientes a la clase 4 (205,018 ha), las cuales presentan menor capacidad de recuperación. Las prácticas iniciales, requieren del establecimiento de una mayor cobertura, la cual se pudiera lograr con la siembra de cereales, así como prácticas mecánicas que favorezcan la retención de humedad (pileteo), establecimiento de plantas arbustivas y reducción de la labranza. Un nivel avanzado de mayor cobertura vegetal involucraría el pastoreo ligero con pequeños rumiantes.

De igual manera que en las áreas agrícolas, el Cuadro 7 presenta los niveles de aptitud presentados por los suelos de uso pecuario en el Estado. En caso de realizar actividades que no son apropiadas para el potencial natural del terreno, las prácticas de reconversión podrían ayudar a alcanzar los resultados productivos apropiados a cada clase de suelo. El manejo de la carga animal y el establecimiento de un sistema de pastoreo sustentable, son recomendados desde la Clase 2 en adelante. El inicio de una exclusión temporal (suspensión del pastoreo) es recomendado para las clases 3 y 4; estas dos últimas clases de aptitud pecuaria representan 2,415,281 ha. En el nivel más bajo de aptitud se tienen 2,303,955 ha, las cuales debieran excluirse temporalmente o cambiar de actividad; representan el 56% de la superficie pecuaria en Zacatecas. El área agrícola que debiera reconvertirse hacia actividades pecuarias representa el 19% del total que debe cambiar de actividad productiva en el agostadero. Esta última deberá ser abordada por programas de gobierno para su reconversión.

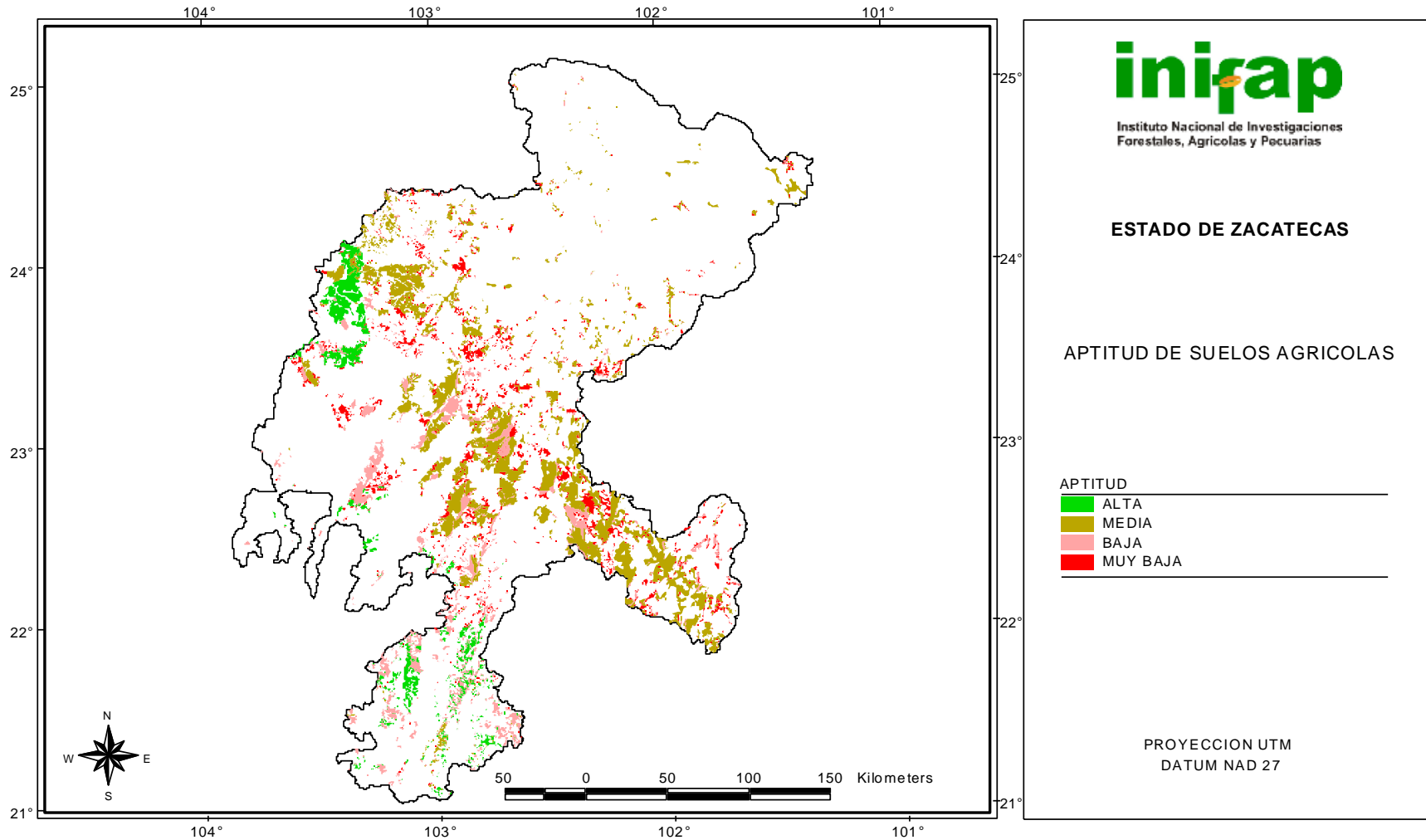


Figura 1. Mapa de aptitud del suelo en áreas de uso agrícola del estado de Zacatecas.

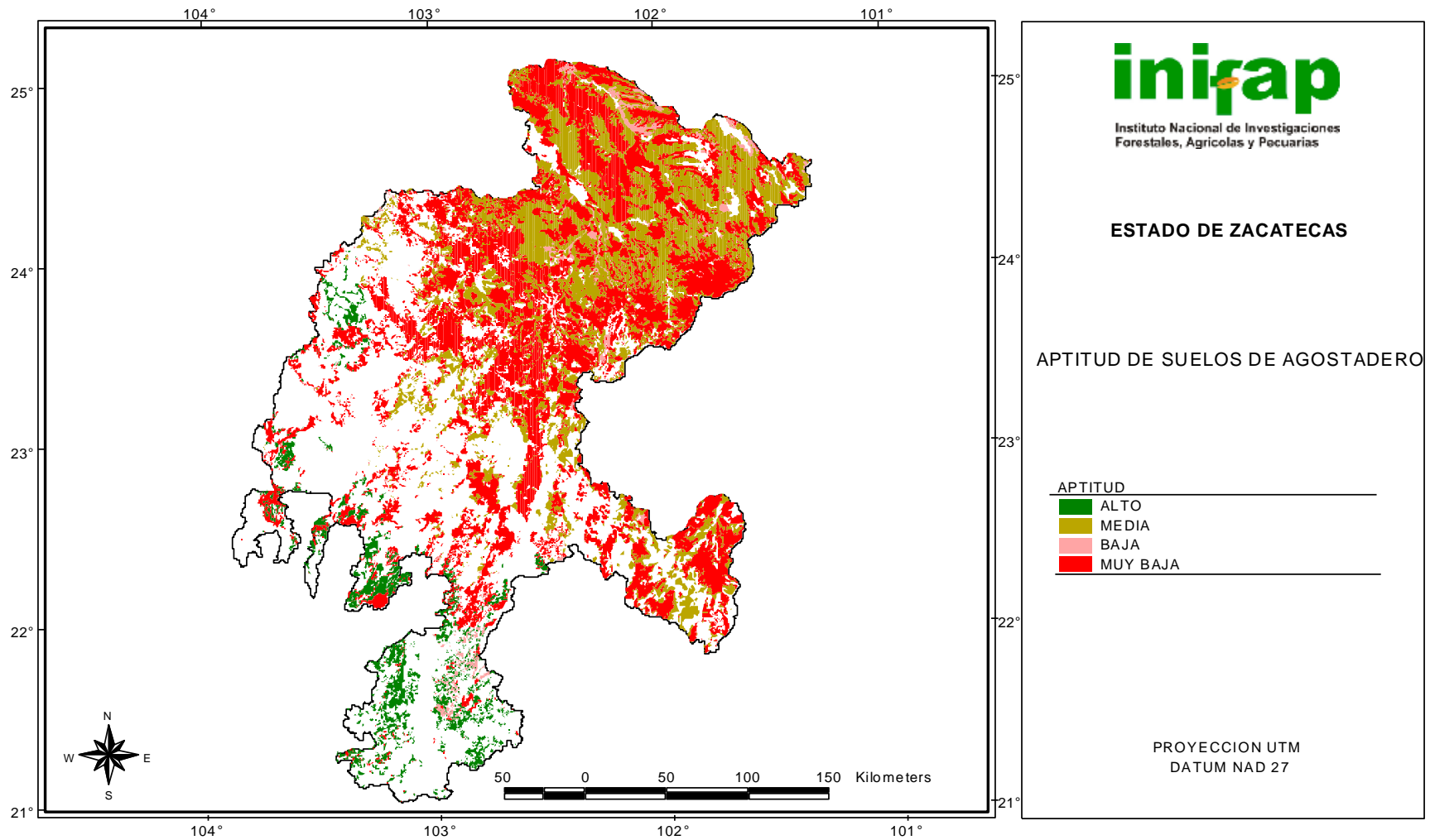


Figura 2. Mapa de aptitud del suelo en áreas de uso pecuario del Estado de Zacatecas.

Cuadro 6. Aptitud del suelo agrícola asociado al manejo de reconversión.

CLASIFICACIÓN	SUPERFICIE	CARACTERÍSTICAS	MANEJO SUGERIDO
Clase 1	145,629	Agricultura intensiva	Cambio tecnológico, conservación
Clase 2	577,164	Suelos con limitaciones menores	Conversión de cultivos, retención de humedad
Clase 3	236,877	Limitaciones diversas, uso condicionado	Reconversión productiva
Clase 4	205,018	Baja o nula aptitud	Reconversión productiva, recuperación de zonas degradadas

Cuadro 7. Aptitud de suelos de uso pecuario asociados al manejo de reconversión.

CLASIFICACIÓN	SUPERFICIE	CARACTERÍSTICAS	MANEJO SUGERIDO
Clase 1	289,454	Actividades pecuarias sin limitaciones	Cambio tecnológico, mejorar sistema de pastoreo
Clase 2	1' 387,529	Técnicas de bajo costo, aptitud media	Reducción de carga, inicio de sistemas de pastoreo
Clase 3	111,326	Necesidad de mayor nivel tecnológico	Exclusión temporal, inicio sistema de pastoreo
Clase 4	2'303,955	Baja o nula aptitud	Exclusión temporal, otras actividades

4.1.2. Degradación del suelo

El efecto de la degradación física del suelo, el cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del mismo, como son la porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural, se incrementa cuando se asocia a otros tipos de degradación, ya que la degradación física favorece el escurrimiento y la erosión hídrica y además, ésta contribuye al incremento de la degradación biológica, al reducir la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica del suelo, lo que agrava el efecto degradativo en los suelos e incrementa el riesgo de desertificación.

La degradación física se representó a partir del mapa de reserva de humedad máxima del suelo, el cual, representa la capacidad actual de los suelos de Zacatecas para almacenar humedad en función de su profundidad y propiedades texturales (Figura 3). El mapa resume el efecto de erosión hídrica y eólica y presenta, a través de la profundidad del suelo, el resultado del proceso degradativo. Un segundo tema involucrado es la degradación biológica, el cual aquí se representó por el contenido de materia orgánica en el suelo (Figura 4). La integración de ambos tipos de degradación, los cuales se consideraron los más importantes en el Estado, produjo el mapa del estado de la degradación de los suelos (Figura 5).

Sin embargo, dado que los mapas de aptitud del suelo se construyen en función de la clasificación de suelos, las fases físicas y químicas y el clima, el producto final es una definición estática de la aptitud del suelo. Para darle el dinamismo de la degradación del suelo, se integraron los mapas de aptitud y de la degradación del suelo, para crear uno que presenta una aptitud modificada por la degradación (Figura 6). La superficie de suelo bajo uso agrícola, modificados por la degradación, se presentan en el Cuadro 8. Se aprecia que las clases de aptitud que presentan los valores más altos, se asocian con los de degradación media. En total, la suma de esta combinación de categorías (aptitud-degradación media) produce 960,463 ha, lo que representa más de 82% de la superficie total. Esto es una indicación del continuo deterioro al que se ve sometido el suelo en el estado de Zacatecas y también una indicación de que su aptitud no es

estática y deberá considerarse en conjunto con el nivel de degradación, dando un dinamismo a la clasificación. Dado que la degradación en el Estado es un proceso intenso y constante, se utilizaron los mapas de degradación para determinar la disponibilidad del recurso suelo, ya que la degradación modifica la aptitud, tal como se presenta en la Figura 6.

Cuadro 8. Número de hectáreas de las clases de aptitud productiva de suelos agrícolas combinados con niveles de degradación.

APTITUD PRODUCTIVA	NIVEL DE DEGRADACIÓN		
	BAJO	MEDIO	ALTO
Clase uno	8,863	119,824	16,943
Clase dos	31,943	484,836	60,386
Clase tres	20,743	184,873	31,262
Clase cuatro	16,716	170,930	17,372

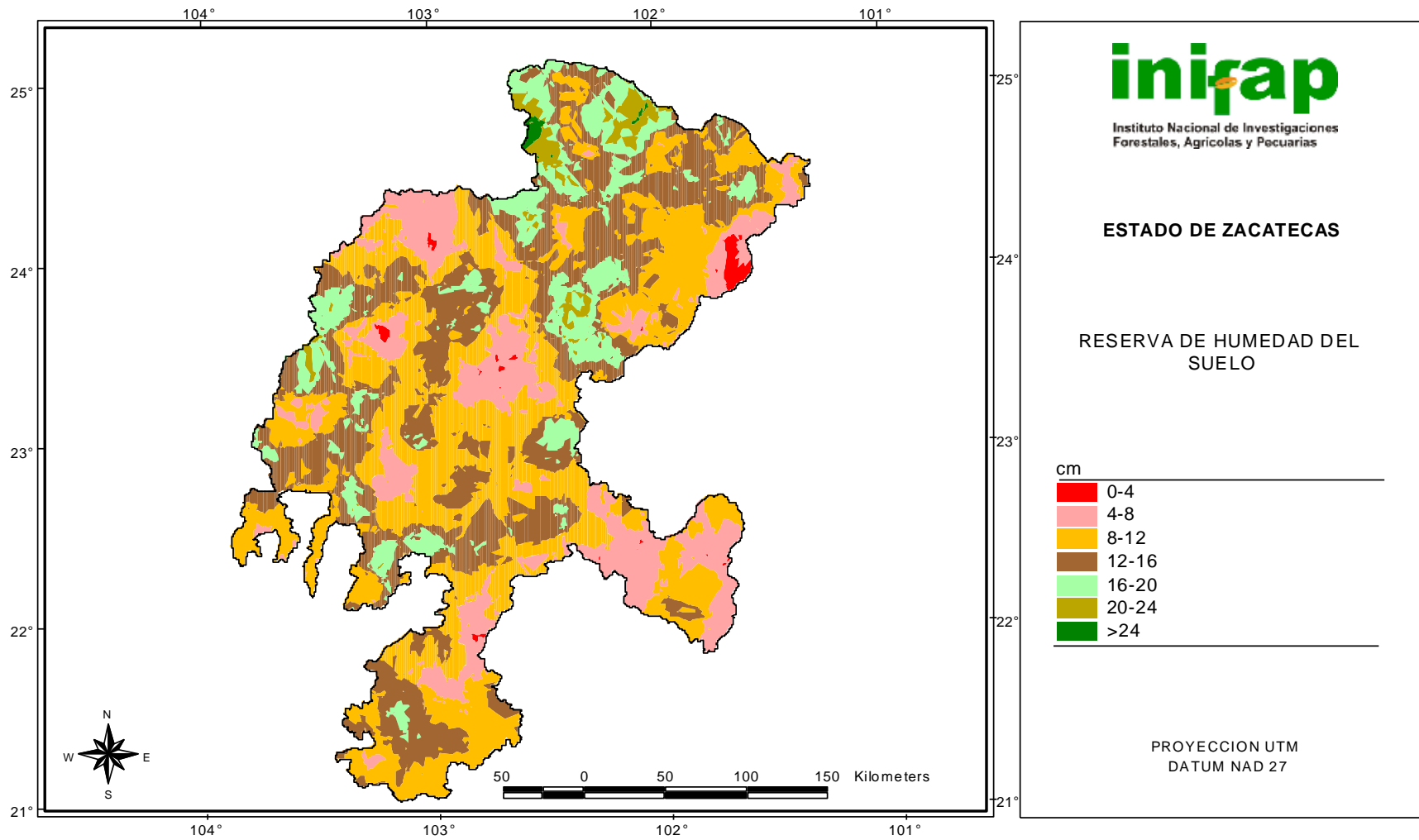


Figura 3. Mapa de la cantidad máxima de humedad que puede almacenarse en el suelo.

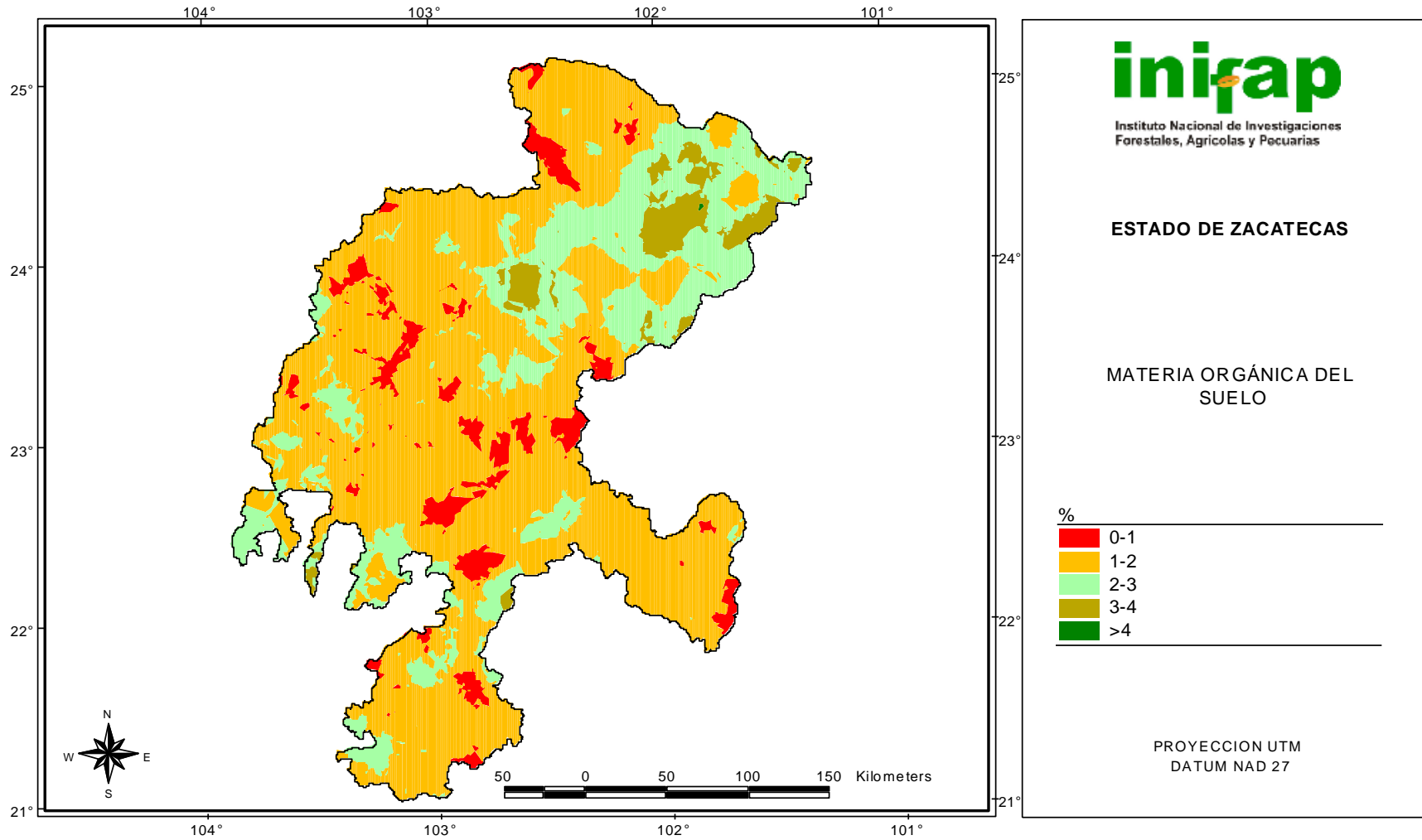


Figura 4. Contenido de materia orgánica del suelo.

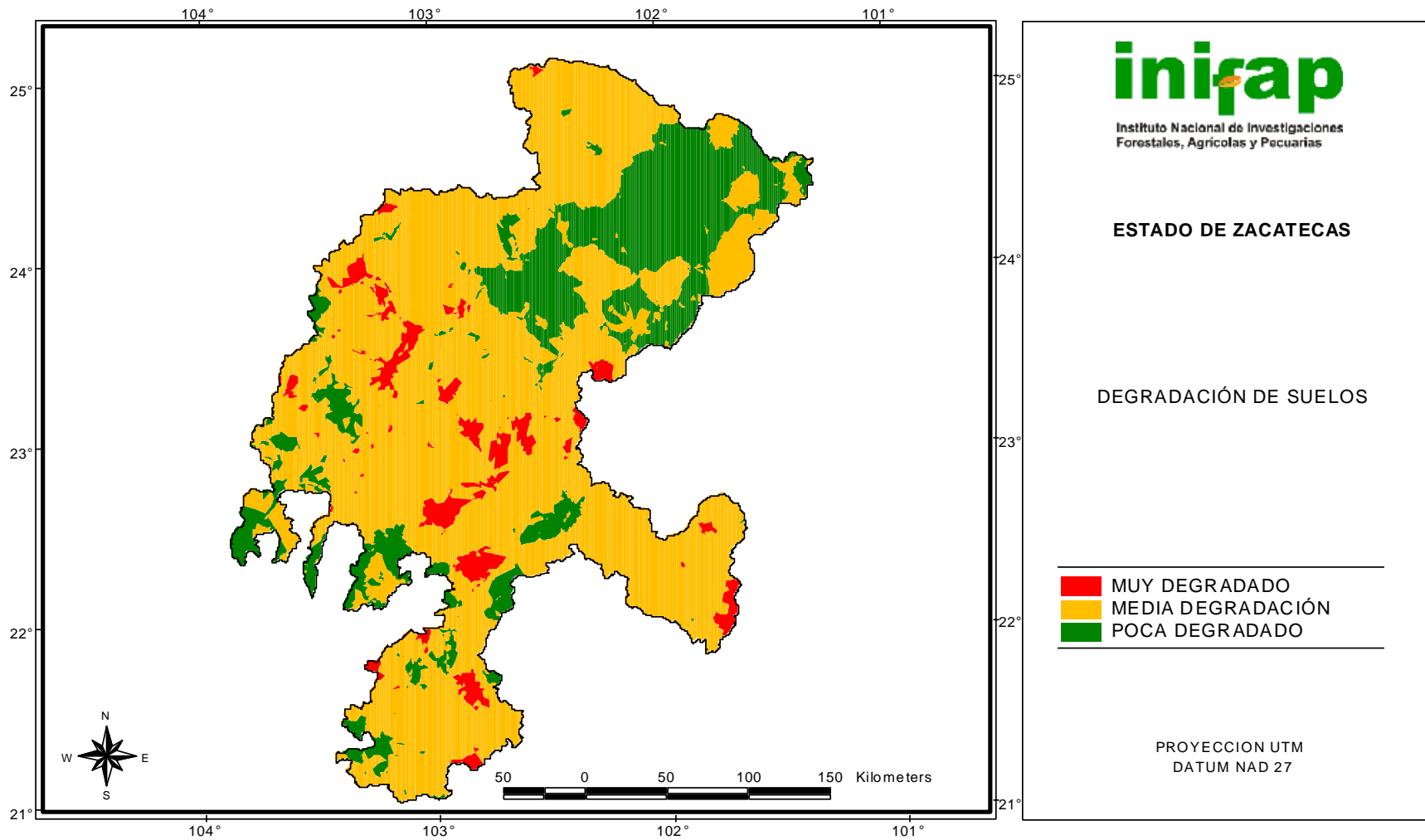


Figura 5. Mapa del estado de degradación del suelo.

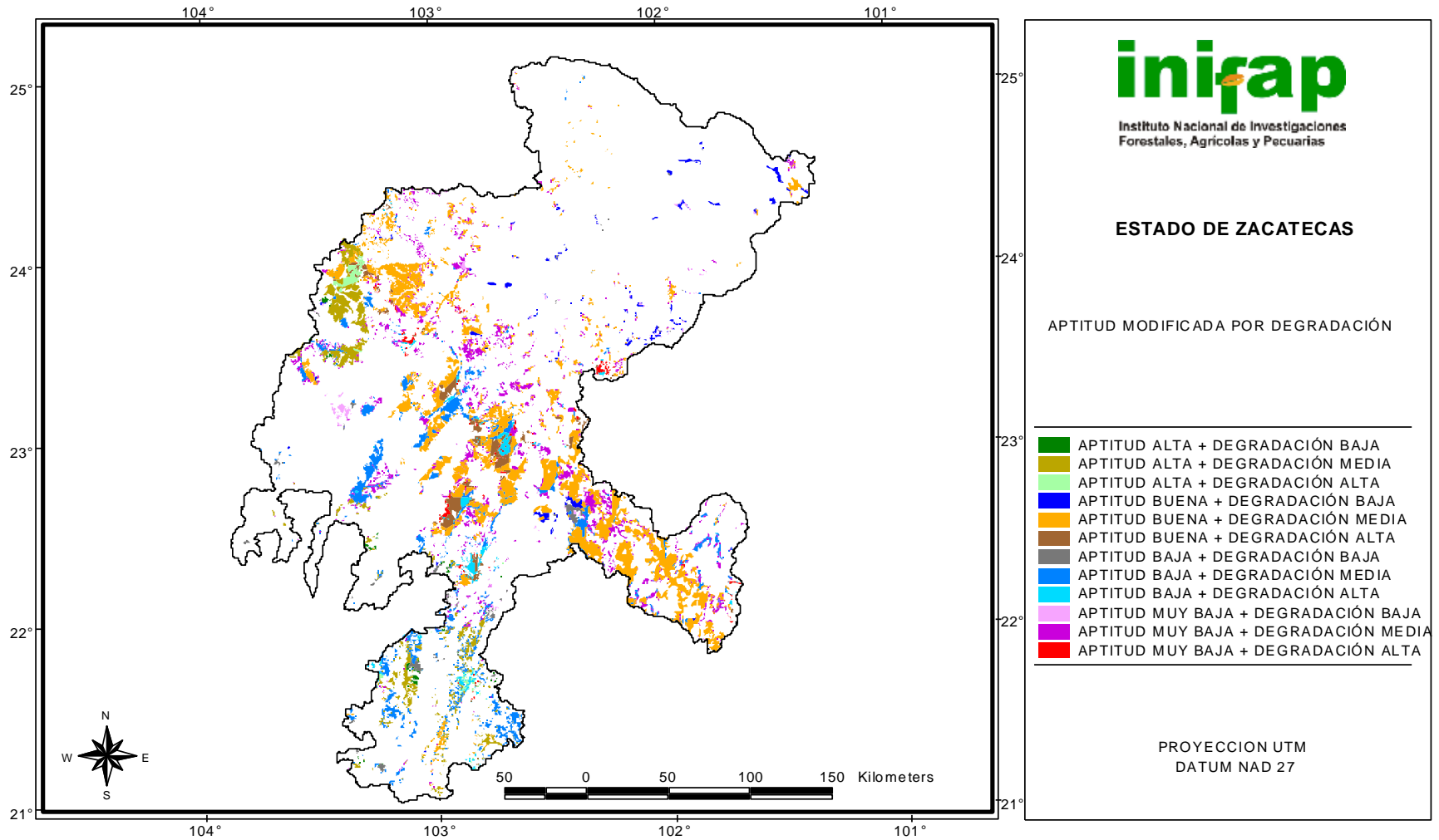


Figura 6. Mapa de aptitud modificada por la degradación del suelo.

4.1.3. Erosión hídrica y eólica

La valoración de la erosión hídrica y eólica se realizó por medio de modelos que ayudan a predecir los valores potenciales de erosión hídrica (Figura 7) y eólica (Figura 8). Los mapas permiten observar valores cuantitativos potenciales (bajo suelo desnudo), los que sirven para simular diferentes escenarios, en los cuales se puede valorar el efecto de una intervención tecnológica como las de reconversión. Los valores potenciales estimados de erosión hídrica van desde 0 hasta 350 ton/ha. En la Figura 7 solo se presentan categorías y los valores máximos caen dentro de la categoría de > 50 ton/ha. Los valores potenciales estimados de erosión eólica para las zonas agrícolas van desde 0 hasta 74 ton/ha, aunque en la Figura 8, se presentan solo valores máximos > 50 ton/ha. Los valores extremos de erosión hídrica potencial se presentan al sur del Estado y los de erosión eólica al noroeste del mismo.

4.2. COMPONENTE AGUA

4.2.1. Agua superficial

Para delimitar la disponibilidad del recurso agua en el estado de Zacatecas, se identificaron las cuencas (Figura 9) y subcuencas, con las cuales es posible delimitar de una manera más precisa, los recursos con que se cuenta en cada una de ellas.

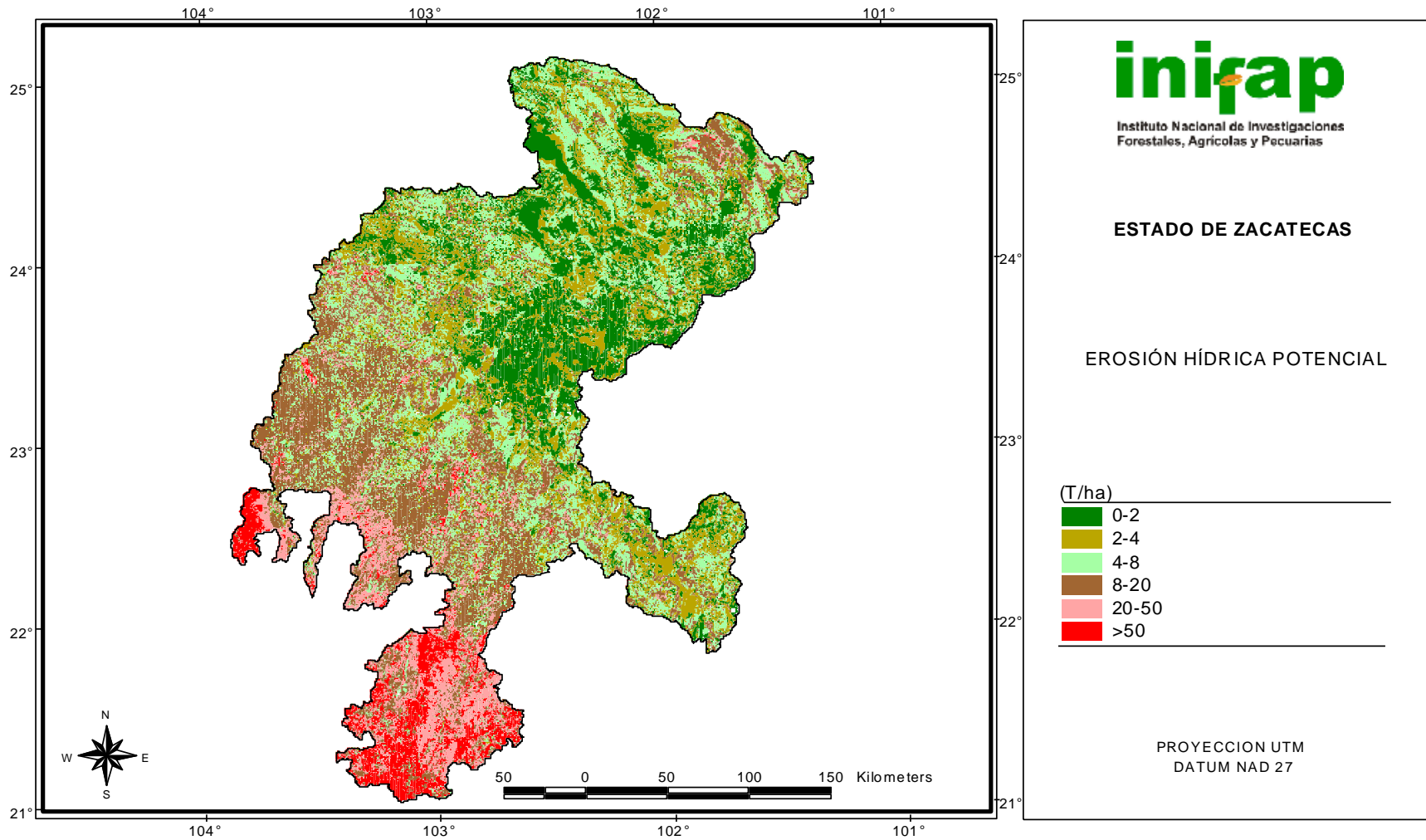


Figura 7. Mapa de erosión hídrica potencial.

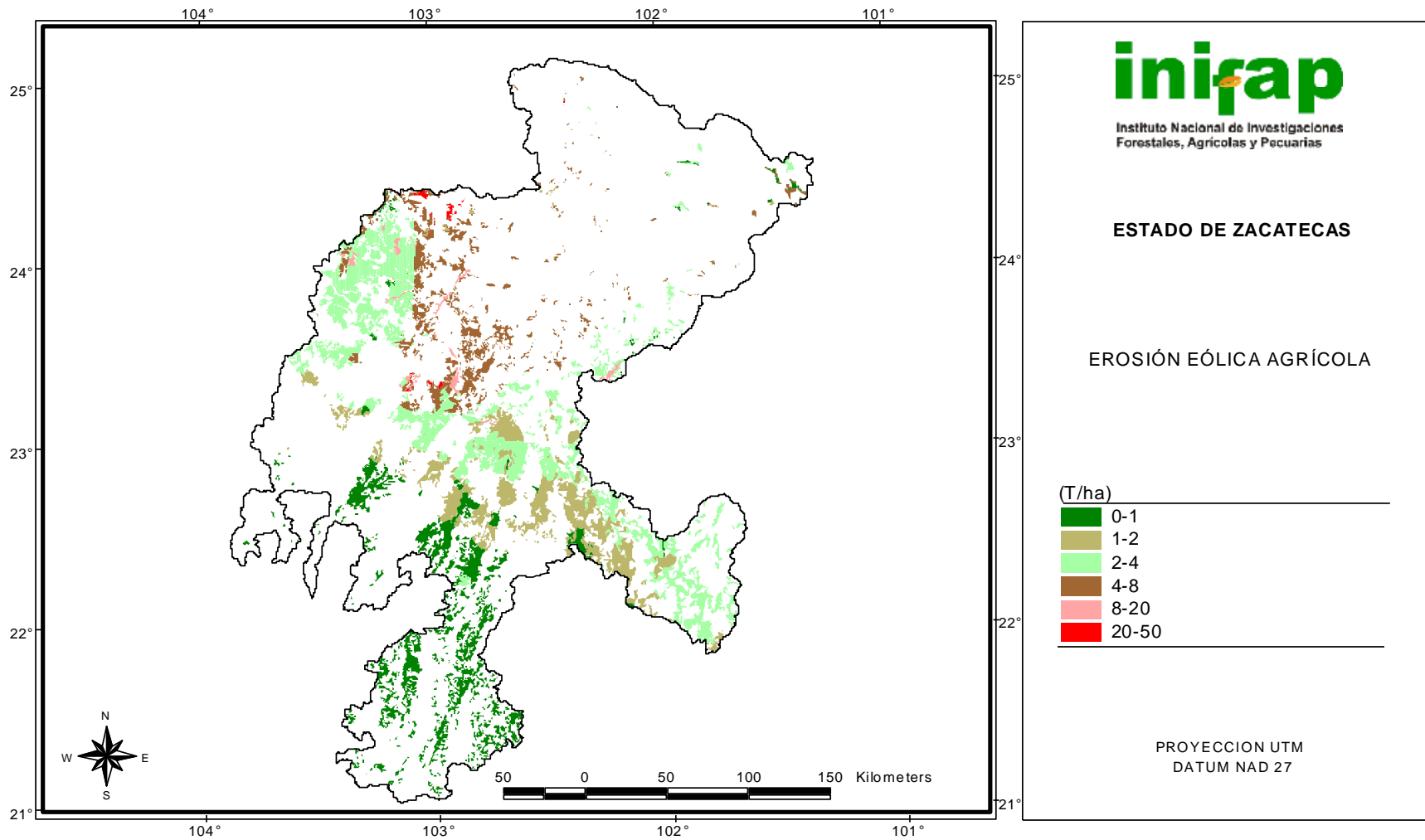


Figura 8. Mapa de erosión eólica en áreas agrícolas.

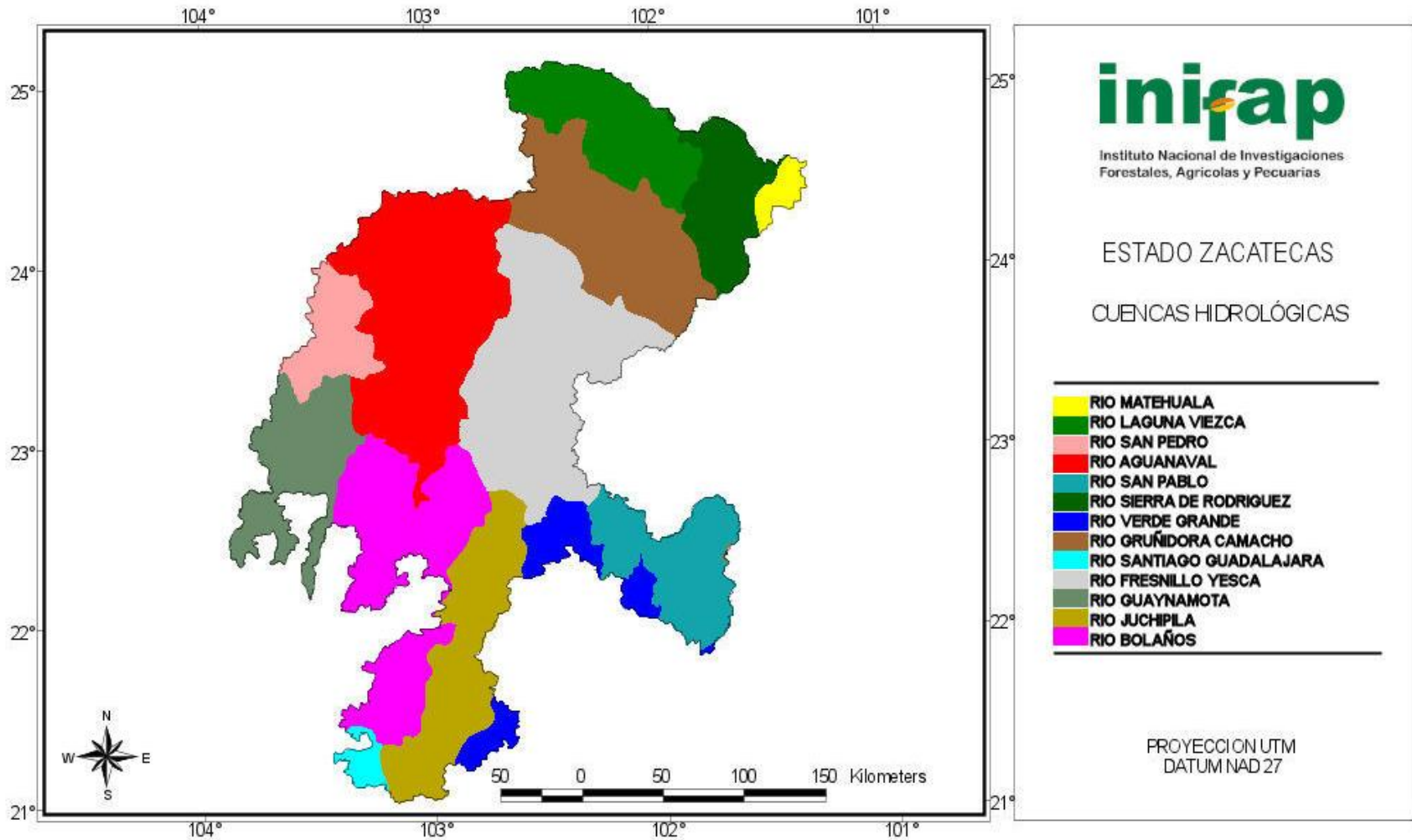


Figura 9. Cuencas hidrológicas del estado de Zacatecas.

4.2.1.1. Balance hídrico

El balance hídrico es un método mediante el cual es posible estimar la cantidad de agua disponible, la cual puede llegar a ser colectada y usada con fines de riego y para la recarga de acuíferos. El estudio esta basado en la ecuación 14; a continuación se presentan los resultados de cada componente.

4.2.1.2. Evapotranspiración

Se utilizaron datos de 98 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas y algunas colindantes, de una serie histórica de 1961 al 2003, aunque algunas no tenían datos en todos los años. Los datos de la precipitación y temperatura media anual, fueron interpolados para usarse en el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). La precipitación anual presenta un gradiente de incremento que va de norte a sur, con valores mínimos entre 200 y 300 mm en el extremo noroeste, hasta valores máximos de 800 a 900 mm en el suroeste. La temperatura media anual presenta los valores extremos de altas temperaturas anuales tanto en el norte como en el sur de Estado, con valores $> 18^{\circ}\text{C}$; en cambio los valores mínimos observados son $< 12^{\circ}\text{C}$ y se presentan en el centro oeste del Estado; estos últimos están asociados a regiones de gran altura. Para estimar la ETP, se utilizó el método del tanque evaporímetro (Figura 10). Los valores estimados van desde < 450 mm en el norte, hasta > 800 mm en suroeste y parte central del Estado, cubriendo el área de mayor producción agrícola, que va de este a oeste. Esto indica que durante el periodo de la estación de crecimiento de los cultivos, principalmente de temporal, estos se mantienen bajo una intensa demanda evapotranspirativa y una mala distribución de las lluvias, produce varios días sin humedad, lo que afecta el desarrollo y productividad.

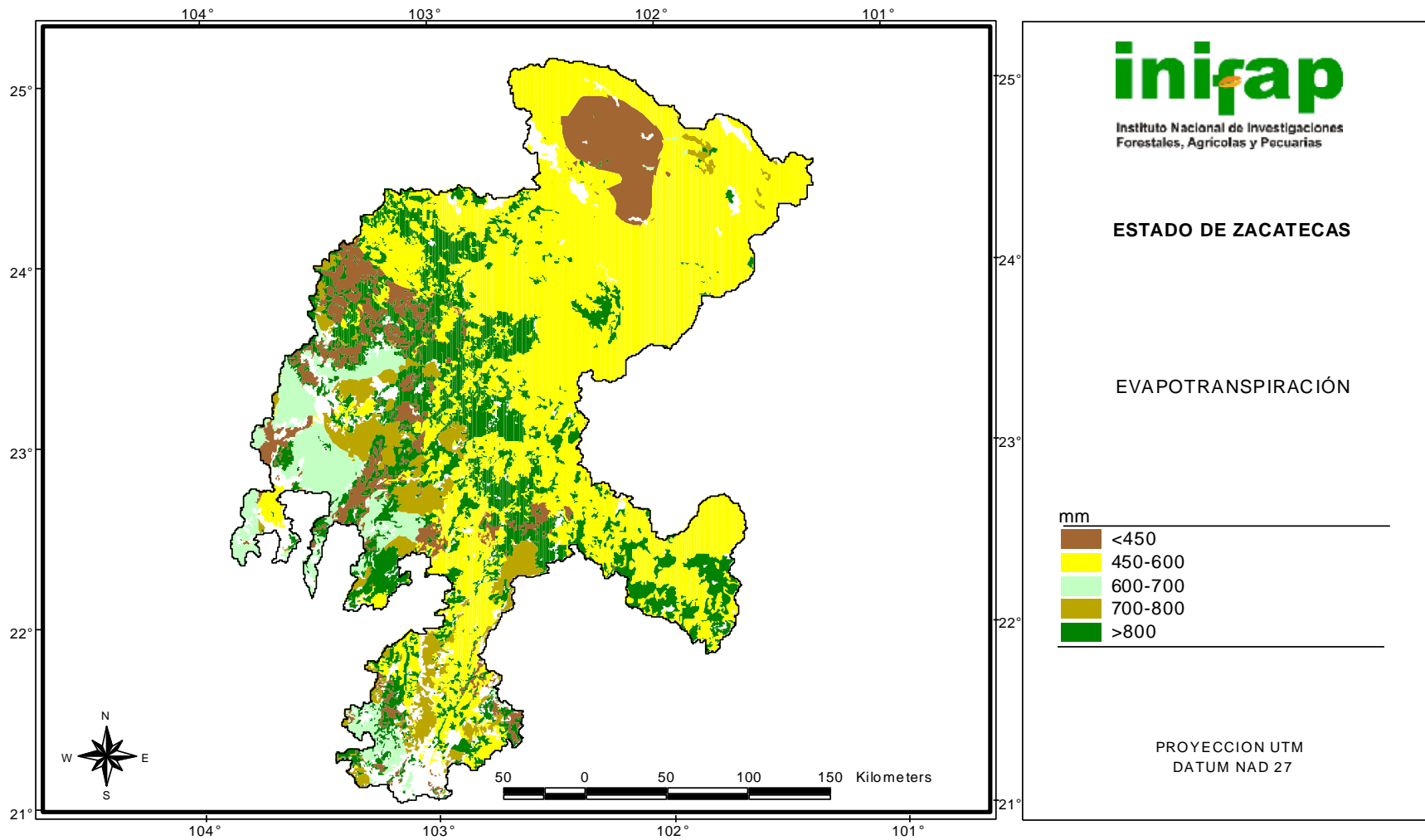


Figura 10. Evapotranspiración anual en el estado de Zacatecas.

4.2.1.3. Escurrimiento

Para estimar el escurrimiento se utilizó el método de ecuaciones lineales. La distribución del escurrimiento superficial estimada para el estado de Zacatecas (Figura 11), presenta un patrón que corresponde tanto a la topografía, como a la disponibilidad de agua de lluvia. Los menores valores de escurrimiento se observan en el centro y el norte del Estado, coincidiendo con las mayores tasas de ETP, lluvias promedio de 300 – 500 mm y la topografía del altiplano, la cual permite el establecimiento de cultivos por el mayor aprovechamiento del agua de lluvia. Valores de 100 a 200 mm se presentan tanto en el área agrícola, como la región centro-sur del Estado, donde se presentan mayores precipitaciones, aunque aquí se encuentran los más altos valores de pendiente del suelo. En el sur del Estado se presentan los valores más altos de escurrimiento, los cuales van de 200 a 300 mm anuales.

4.2.1.4. Percolación profunda

Un componente adicional a la fórmula de balance hídrico, la cual es una restricción que permite identificar sitios que rebasen 60 cm de profundidad y que se convierten en los mejores para contribuir a la recarga de acuíferos, fue incorporado mediante un mapa de reserva de humedad. Esta delimitación de áreas de mayor profundidad se convierte en una restricción a la ecuación de balance hídrico y limita las recargas de los acuíferos a los sitios donde se puede almacenar agua más allá de la profundidad que alcanza la raíz de los cultivos anuales que comúnmente se establecen en el estado de Zacatecas. El resultado muestra que grandes superficies localizadas al norte, así como las zonas del oeste y sur del Estado, pudieran contribuir a la recarga del acuífero.

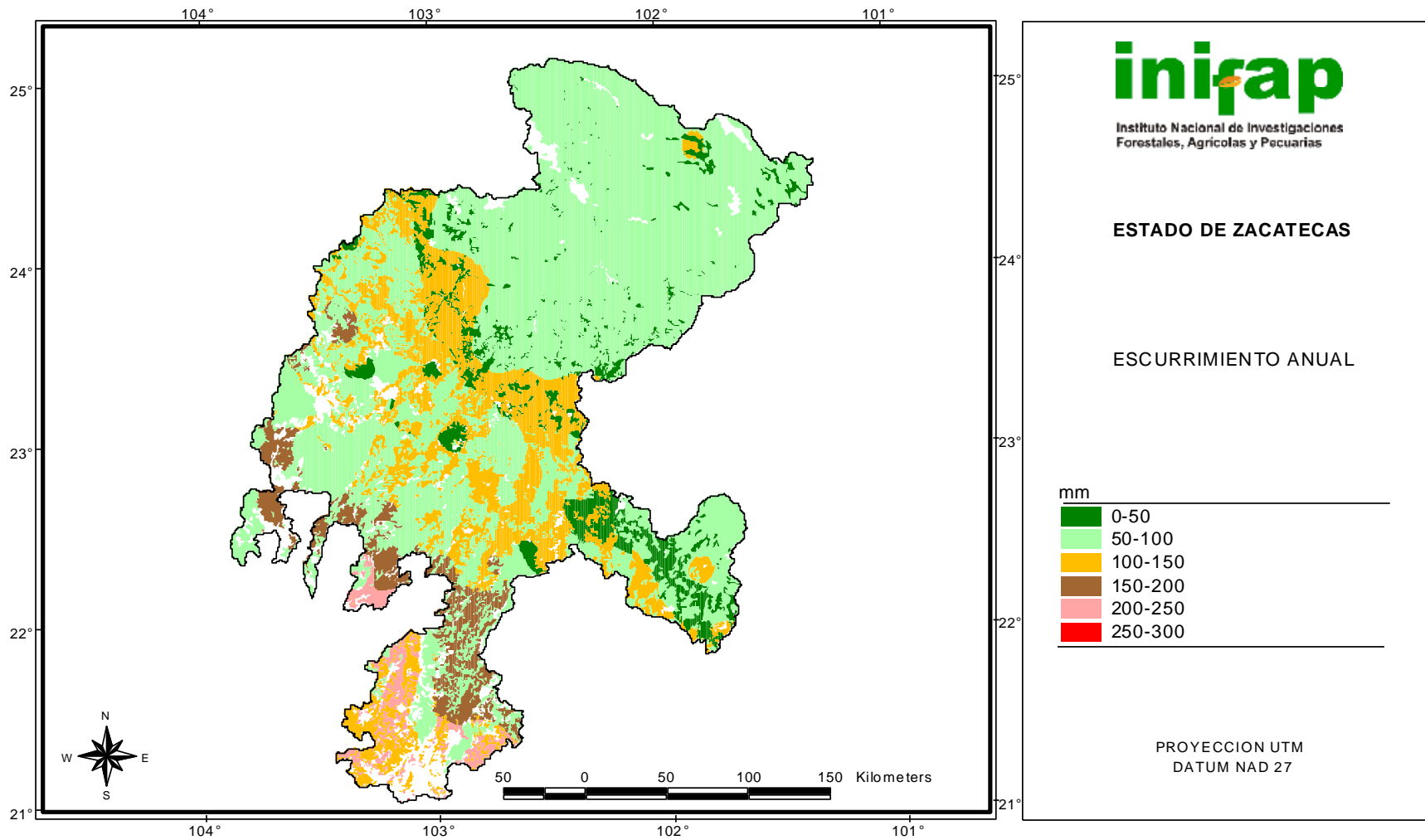


Figura 11. Escurrimiento superficial anual en el estado de Zacatecas.

4.2.1.5. Recarga

El mapa de recarga, producto de la ecuación de balance hídrico, muestra los sitios de recarga y su ubicación (Figura 12). La mayoría de los sitios identificados como susceptibles de contribuir a la recarga de acuíferos se localizan al norte, al oeste y extremo sur-oeste del Estado. Estos se localizan donde existe un exceso de agua y se cuenta con capacidad de almacenamiento en el suelo, mayor a 60 cm de profundidad. Sin embargo, estos sitios deberán ser evaluados y validados para incluir en algún plan de recarga de acuíferos.

4.2.2. Aguas subterráneas

4.2.2.1. Abatimiento de los principales acuíferos

El estado de Zacatecas cuenta con 34 acuíferos; la explotación con fines agrícolas, industriales y de servicio, se ha concentrado en ocho de ellos, formando un área compacta que se localiza en el centro del Estado (Figura 13); estos son:

1. Aguanaval
2. Calera
3. Benito Juárez
4. Chupaderos
5. Ojocaliente
6. Loreto
7. Guadalupe Bañuelos
8. La Blanca

Para valorar los cambios en los niveles estáticos de los acuíferos mencionados, se utilizaron los estudios de los niveles piezométricos realizados por CNA. Sin embargo, dichos estudios se efectuaron de manera independiente en cada acuífero y en fechas diferentes. Para observar los cambios de manera integrada en los ocho acuíferos, se utilizaron los estudios que aparecen en el Cuadro 9. A pesar de que los tiempos en que se realizaron los estudios de cada acuífero son muy diferentes, los resultados iniciales obtenidos de cada uno se unieron y se presentan en el Figura 14 y los estudios finales en la Figura 15. Asimismo, dado que los acuíferos se integraron y se reclasificaron utilizando valores de de niveles estáticos semejantes (van de 0 a 125, dividido en intervalos de 25 m) las superficies asociadas a cada nivel de abatimiento se presentan en Cuadro 10.

Cuadro 9. Fechas en que se realizaron estudios piezométricos iniciales y finales en ocho acuíferos del estado de Zacatecas.

NOMBRE DEL ACUÍFERO	ESTUDIO INICIAL	ESTUDIO FINAL
Aguanaval	Enero de 1980	Julio de 1997
Benito Juárez	Septiembre de 1990	Noviembre de 1998
Calera	Noviembre de 1989	Enero de 1999
Chupaderos	Mayo de 1980	Agosto de 1997
Guadalupe Bañuelos	Febrero de 1988	Septiembre de 1995
La Blanca	Febrero de 1981	Enero de 1997
Loreto	Febrero de 1970	Octubre de 1996
Ojocaliente	Enero de 1975	Marzo de 1994

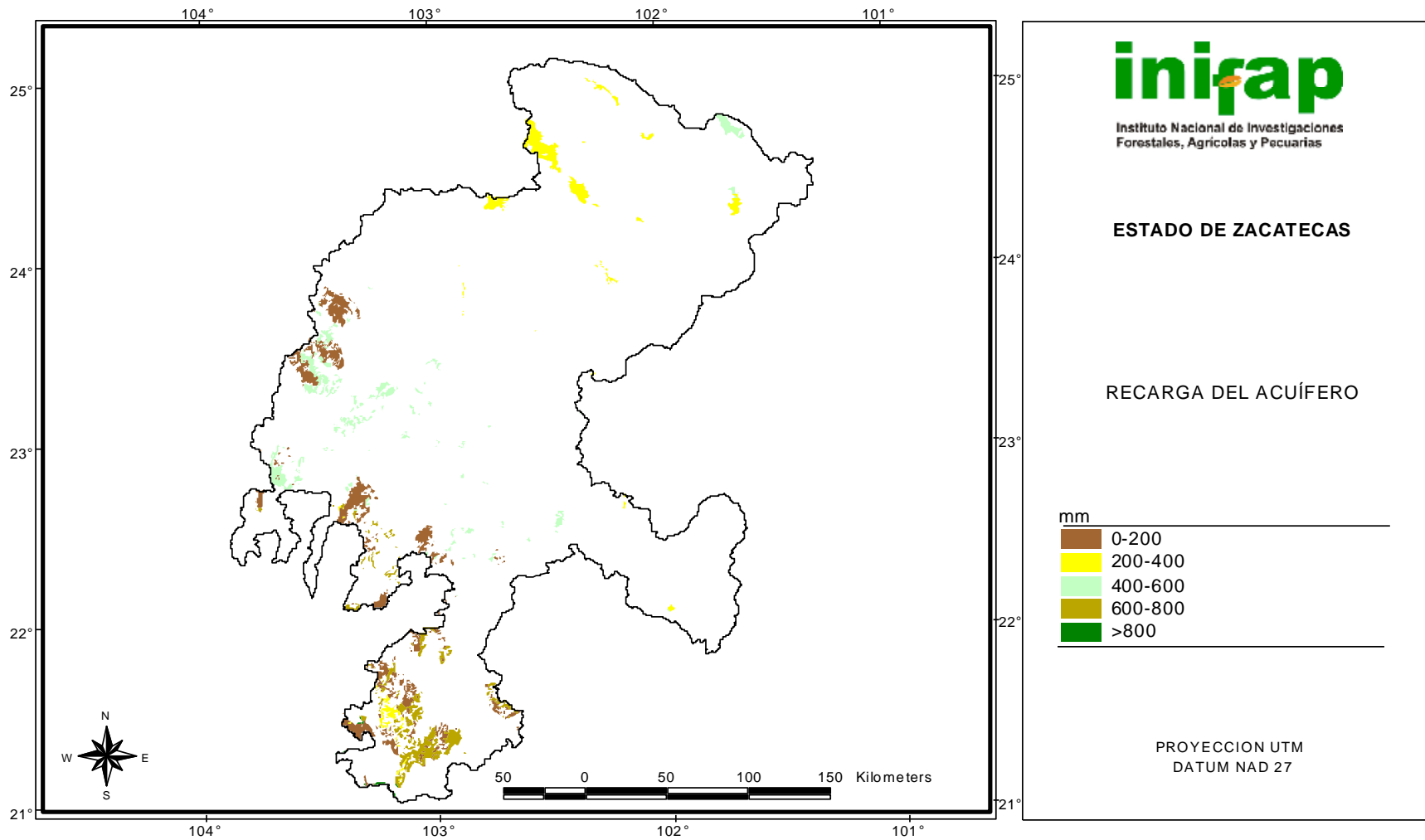


Figura 12. Mapa de identificación de posibles sitios de recarga del acuífero.

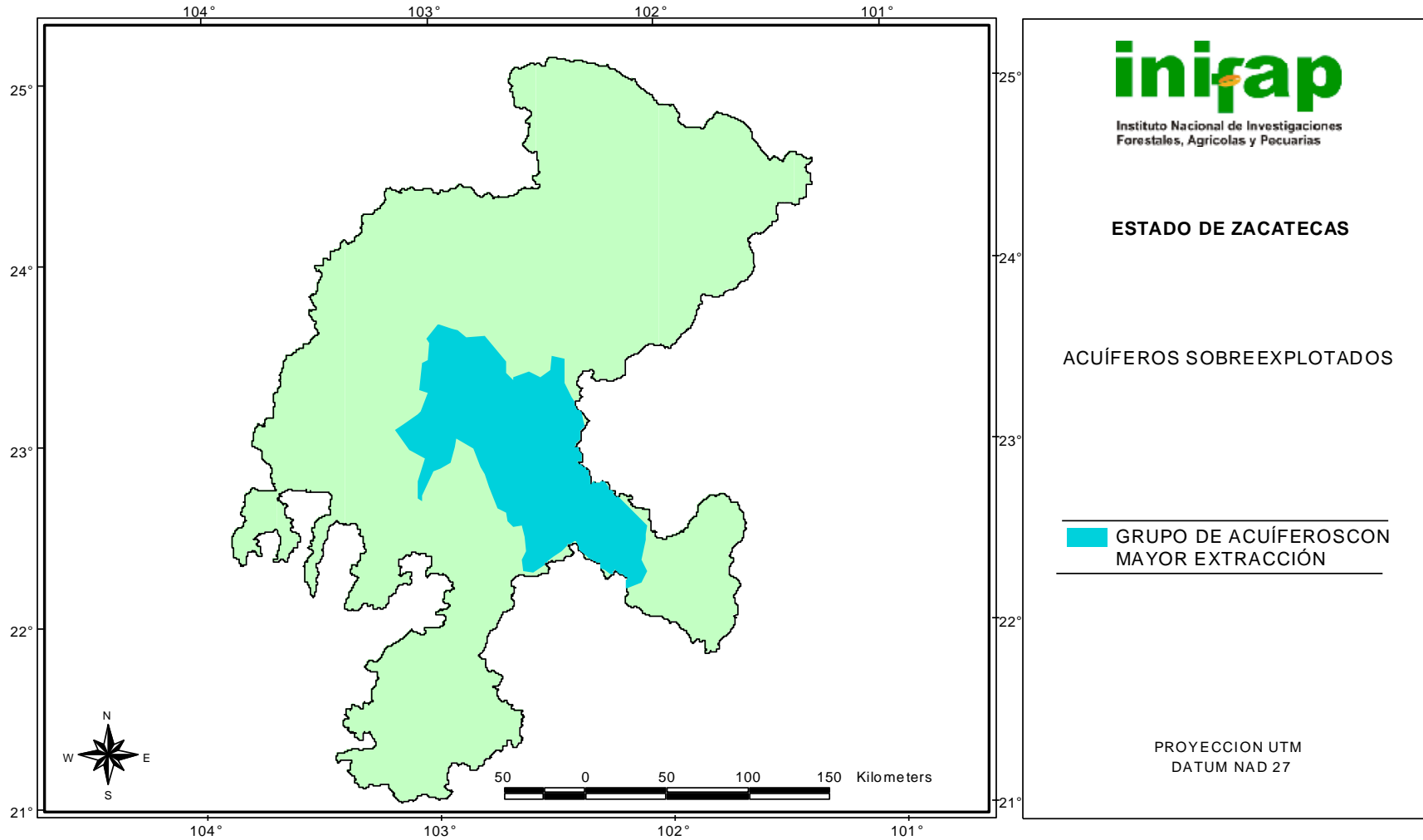


Figura 13. Acuíferos de mayor explotación en el estado de Zacatecas.

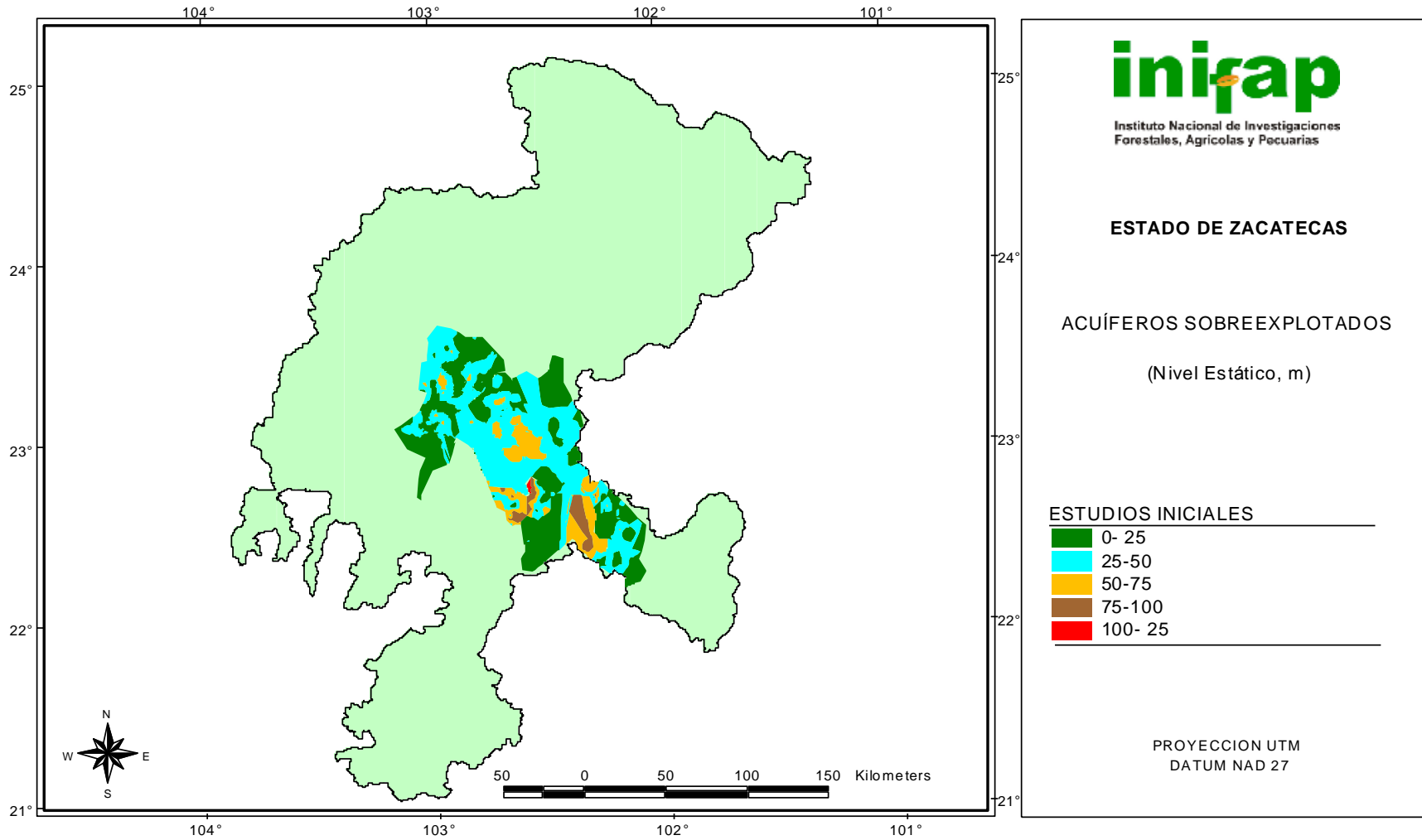


Figura 14. Niveles estáticos de los acuíferos de mayor explotación en los estudios iniciales.

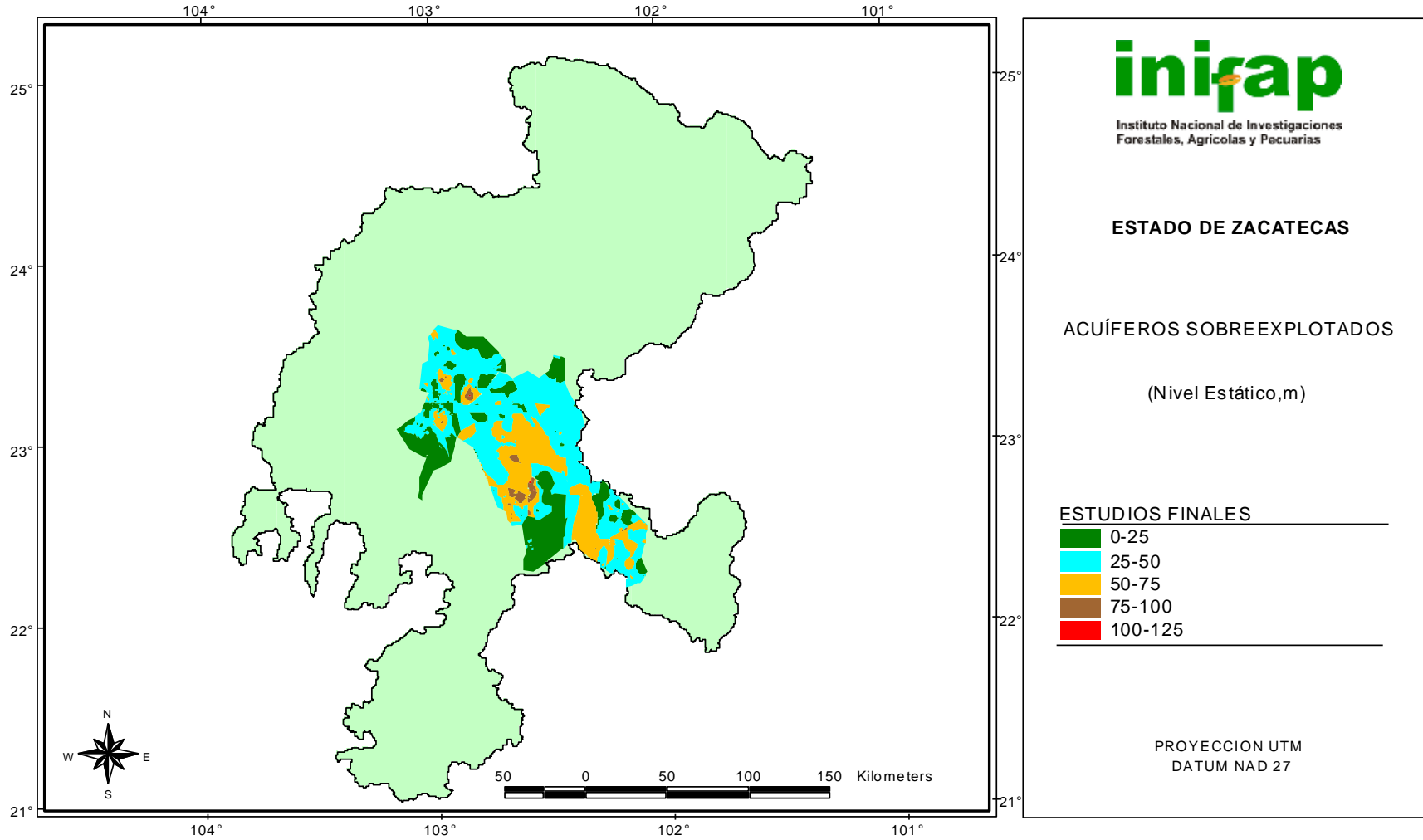


Figura 15. Niveles estáticos de los acuíferos de mayor explotación en los estudios finales.

Cuadro 10. Nivel estático de ocho acuíferos y las superficies asociadas a cada nivel.

ESTUDIO PIEZOMETRICO	NIVEL ESTÁTICO (m) Y SUPERFICIES ASOCIADAS (ha)				
	0 – 25 (SUPERFICIAL)	25 – 50 (BAJO)	50 – 75 (MEDIO)	75 – 100 (PROFUNDO)	> 100 (MUY PROFUNDO)
Inicial	180,891	225,460	72,220	5563	0
Final	99, 488	246,997	130, 278	5866	12

Los niveles estáticos en los estudios iniciales, presentan mayores superficies asociados a niveles estáticos superficiales (0-25 m) que los niveles profundos (75 – 100 m). En los estudios finales, se presenta un decremento en los niveles superficiales (0-25 m), se incrementan los valores de superficies asociadas a niveles medios (50 – 75 m) y se observa muy poco cambio en los niveles profundos (75-100 m) y muy profundos (100-125 m). La comparación de superficies asociadas a cada categoría, permite ver que los valores de niveles estáticos superficiales (0-25) han disminuido en un 55% en el tiempo transcurrido entre los estudios; el nivel bajo (25-50 m) se incrementó un 9%, el nivel medio (50-75) en un 80%, el nivel profundo (75-100 m) en 5% y no se ha incrementado la superficie asociada a un nivel estático de mayor profundidad (100-125 m). Estos cambios se pueden asociar a una dinámica que se observa en las figuras 14 y 15; en la Figura 14 se aprecian valores de nivel estático de entre 75 y 100 m, localizados al sur del Estado (acuíferos de Loreto, La blanca, Ojocaliente y Benito Juárez) y en la Figura 15 se observa un desplazamiento de estos niveles estáticos (75-100 m) en los acuíferos de Chupaderos, Calera y el Aguanaval; esto muestra el dinamismo, tanto de la explotación de acuíferos como en la superficie irrigada, ya que esta se incrementó de 82,570 ha en 1980 a 159,996 en 2007 (Bustamante, 2008). Por otro lado, el mantenimiento en las categorías de alto nivel estático (75-100 y 100-125), indican que algunos pozos sobreexplotados se han ido abandonando en el transcurso del tiempo, de lo que existe evidencia por tratarse de pozos de uso comercial usados para mediciones en estudios piezometricos. Las diferencias entre los niveles estáticos valorados entre los estudios inicial y final, se aprecian con mayor detalle en la Figura 16.

4.3. COMPONENTE VEGETACIÓN

4.3.1. Distribución de especies vegetales

Para clasificar las diferentes especies vegetales distribuidos en el Estado, se utilizó el sistema jerárquico definido en el Inventario Nacional Forestal 2000-2001 (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), el cual considera la secuencia formación-tipo de vegetación y uso del suelo-comunidad y otras coberturas. Una formación es el primer nivel jerárquico y, de acuerdo con el orden utilizado en el Inventario Nacional Forestal 2000-2001 (Palacio *et al.*, 2000), son comunidades de plantas de un área geográfica con características fisonómicas y ambientales similares y establecen ocho que son: cultivos, bosques, selvas, matorral, pastizal, vegetación hidrófila, otros tipos de vegetación y otras coberturas. El segundo nivel jerárquico son los tipos de vegetación y usos del suelo; se refieren a comunidades vegetales que se definen por diversos aspectos, como la fisonomía, la estructura, la fenología, y la composición florística. Se definieron 17 tipos de vegetación y uso. El tercer nivel hace referencia a las comunidades, las cuales son grupos de organismos pertenecientes a varias especies distintas que concurren en el mismo hábitat e interactúan; la caracterización se hace por la referencia a una o más especies dominantes.

En el Cuadro 11 se presentan las principales formaciones, tipos de vegetación y usos del suelo detectados en el estado de Zacatecas y sus comunidades vegetales. Además se incluye las zonas urbanas y vegetación no identificada.

La formación más abundante en el Estado es el matorral, cuyo tipo de vegetación es xerofila y el mezquital, cuyas comunidades mas importantes son el matorral desértico micrófilo, que es una comunidad de especies diferentes en la que predominan arbustos con foliolos pequeños. Especies típicas de este tipo de vegetación son la Gobernadora (*Larrea*

tridentata), el ocotillo (*Fouquieria splendens*), el hojasen (*Flourensia cerna*), el huizache (*Acacia farnesiana*) y el Mezquite (*Prosopis laevigata* y *Prosopis glandulosa* var. *torreyana*). Dicha comunidad ocupa el 17.8% de la superficie total del Estado. El matorral desértico rosetófilo abarca el 9.4%; que es una comunidad dominada por plantas con hojas en forma de roseta, con o sin espinas; las especies típicas son: Maguey (*Agave salmiana*), sotol (*Dasyllirion acrotrichum*), la palma china (*Yucca filifera*) y la Yuca (*Yucca carnerosana*).

El 5.8% es matorral crasicaule; es la vegetación con predominancia de cactáceas y cuyo género típico es *Opuntia spp* (nopal) entre otros, el mezquital (0.3%) (incluye huizachal) y que es vegetación arbórea o arbustiva, dominada por mezquites (género *Prosopis*) o huizaches (género *Acacia*), y que se desarrolla de preferencia en planicies con suelos profundos y otros como el chaparral, que es la vegetación densa y baja, con una composición florística característica como son varios tipos de encino blanco (*Quercus undulata*, *Quercus intricata*, *Quercus invaginata*, *Quercus microphylla*) y que representa un 0.3% del total, así como comunidades específicas de vegetación microfila (0.15 %), los que suman en total 33.75% del total de la superficie del Estado.

La distribución espacial de cada comunidad vegetal se observa de manera general en la Figura 17. El matorral microfilo (Figura 18) y rosetofilo (Figura 19) se localiza al norte del Estado, el crasicaule (Figura 20) en la parte central (abarca de este a oeste), el mezquital de norte a sur del Estado (Figura 21) y el Chaparral en el centro-sur (Figura 22).

La siguiente formación vegetal de importancia en el Estado es la conformada por los cultivos (Cuadro 11). Estos pueden ser de temporal, que ocupan el 20.7% de la superficie del estatal, de riego con 2.98% y una superficie de riego eventual con 0.015 %. La distribución espacial tanto de agricultura de temporal, como de la de riego es principalmente de Este a Oeste y del Centro al Sur; la de menor área se localiza en el norte (Figuras 23 y 24).

Cuadro 11. Tipos de vegetación, uso del suelo y superficie asociada

FORMACIÓN	TIPOS DE VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO	COMUNIDAD Y OTRAS COBERTURAS	SUPERFICIE (Ha)	PORCENTAJE (%)
BOSQUES	CONÍFERAS LATIFOLIADAS	Bosque bajo abierto	339,887	4.5
		Bosque de encino-pino	155,852	2.1
		Bosque de pino-encino	249,255	3.3
	CONIFERAS	Bosque de pino	108,526	1.4
		Bosque de táscate	6,152	0.1
LATIFOLIADAS	Bosque de encino	461,669	6.1	
MATORRAL	MATORRAL XEROFILO	Matorral crasicaule	438,554	5.8
		Matorral desértico micrófilo	1,344,873	17.8
		Matorral desértico rosetófilo	713,100	9.4
		Chaparral	25,224	0.3
		Vegetación desértico micrófilo	11,586	0.15
	MEZQUITAL	Mezquitil	22,097	0.3
PASTIZAL	PASTIZAL	Pastizal natural	1,155,653	15.3
		Pastizal – huizachal	8,999	0.12
		Pastizal halófilo	13,336	0.18
		Pastizal inducido	226,846	3.0
CULTIVOS	AGRICULTURA	Agricultura de riego	225,535	2.98
		Agricultura con riego eventual	1,158	0.015
		Agricultura de temporal	1,565,800	20.7
SELVA	CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	Selva baja caducifolia	112,808	1.5
		Matorral subtropical	265,308	3.5
OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN	OTROS TIPOS D VEGETACIÓN	Vegetación halófila	63,279	0.84
	ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE	Área sin vegetación aparente	3,519	0.05
OTRAS COBERTURAS	CUERPOS DE AGUA	Cuerpos de agua	14,618	0.2
	ASENTAMIENTO HUMANO	Zonas urbanas	24,828	0.32
S U M A			7,558,461	100.00

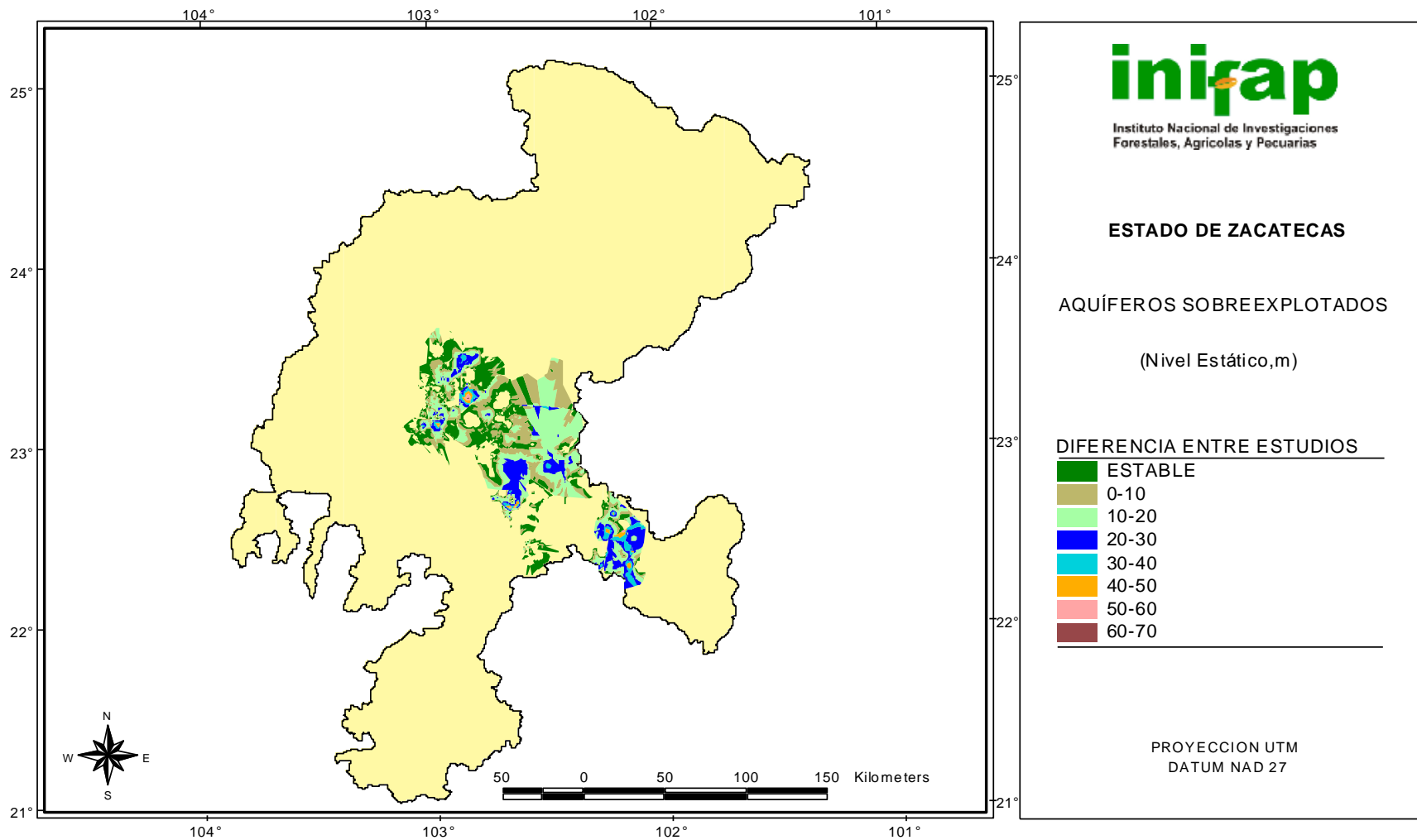


Figura 16. Diferencias entre los niveles estáticos valorados entre estudios.

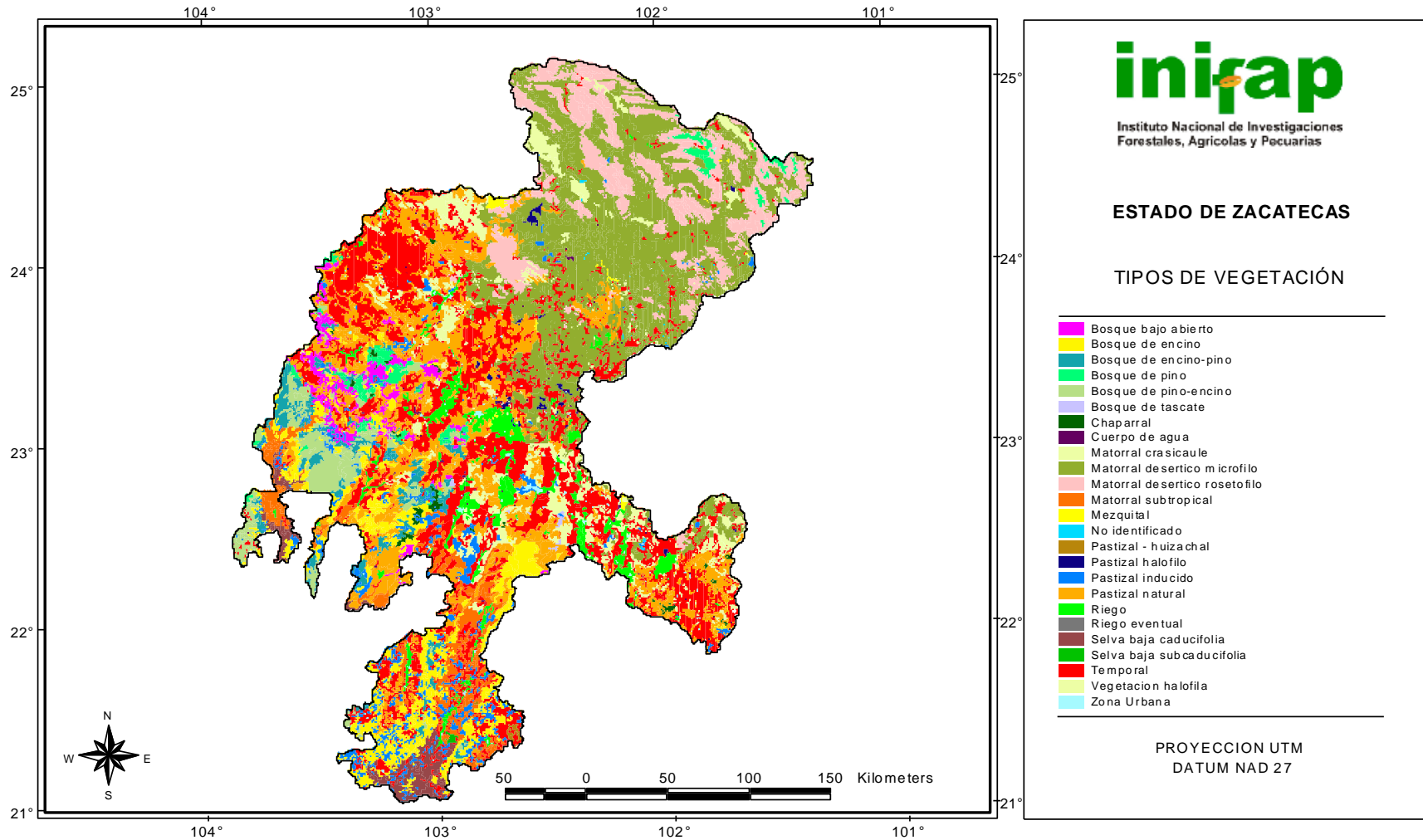


Figura 17. Distribución espacial de las comunidades vegetales presentes en el estado de Zacatecas.

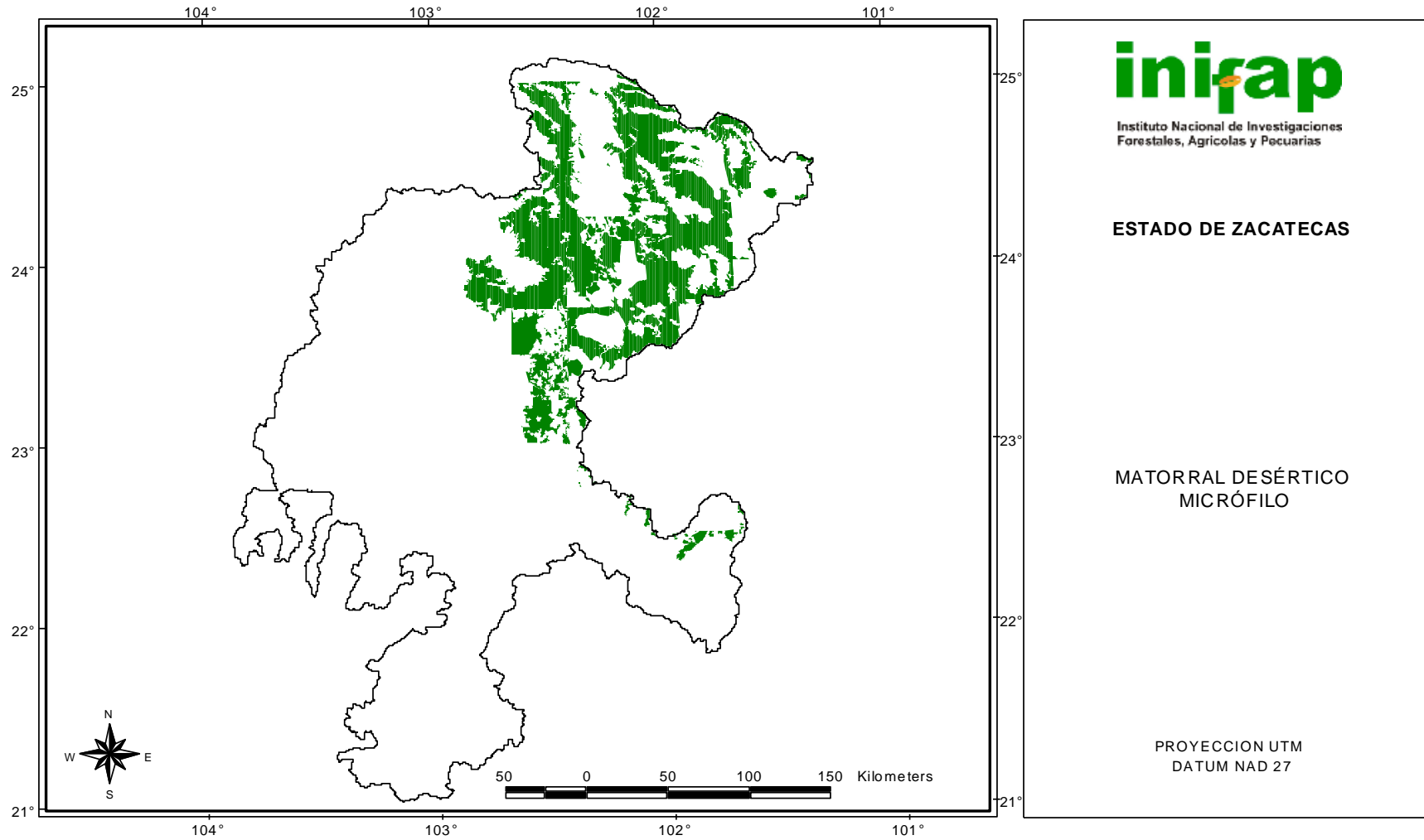


Figura 18. Distribución espacial del matorral desértico micrófilo en el estado de Zacatecas.

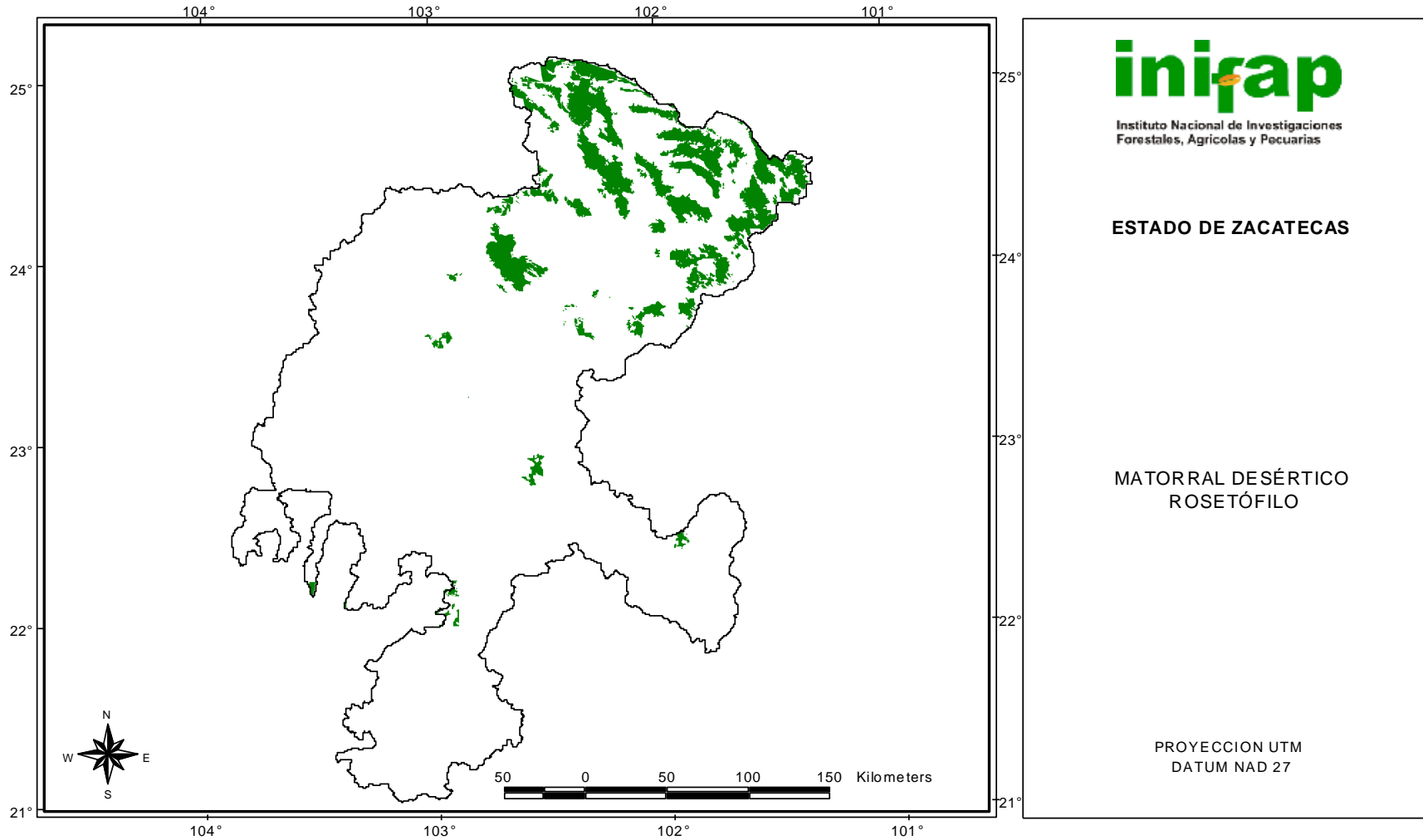


Figura 19. Distribución espacial del matorral desértico rosetófilo en el estado de Zacatecas.

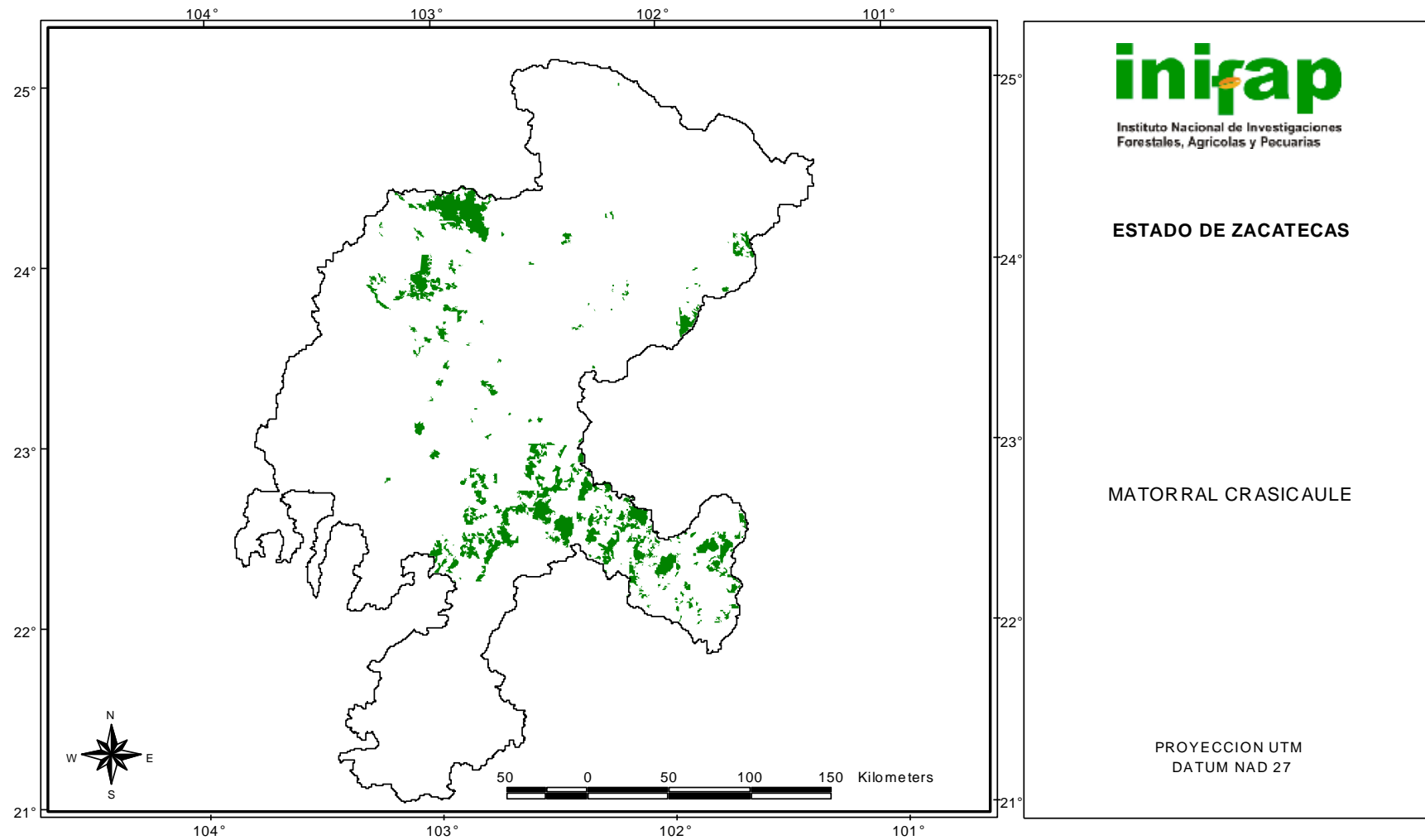


Figura 20. Distribución espacial del matorral crasicaule en el estado de Zacatecas.

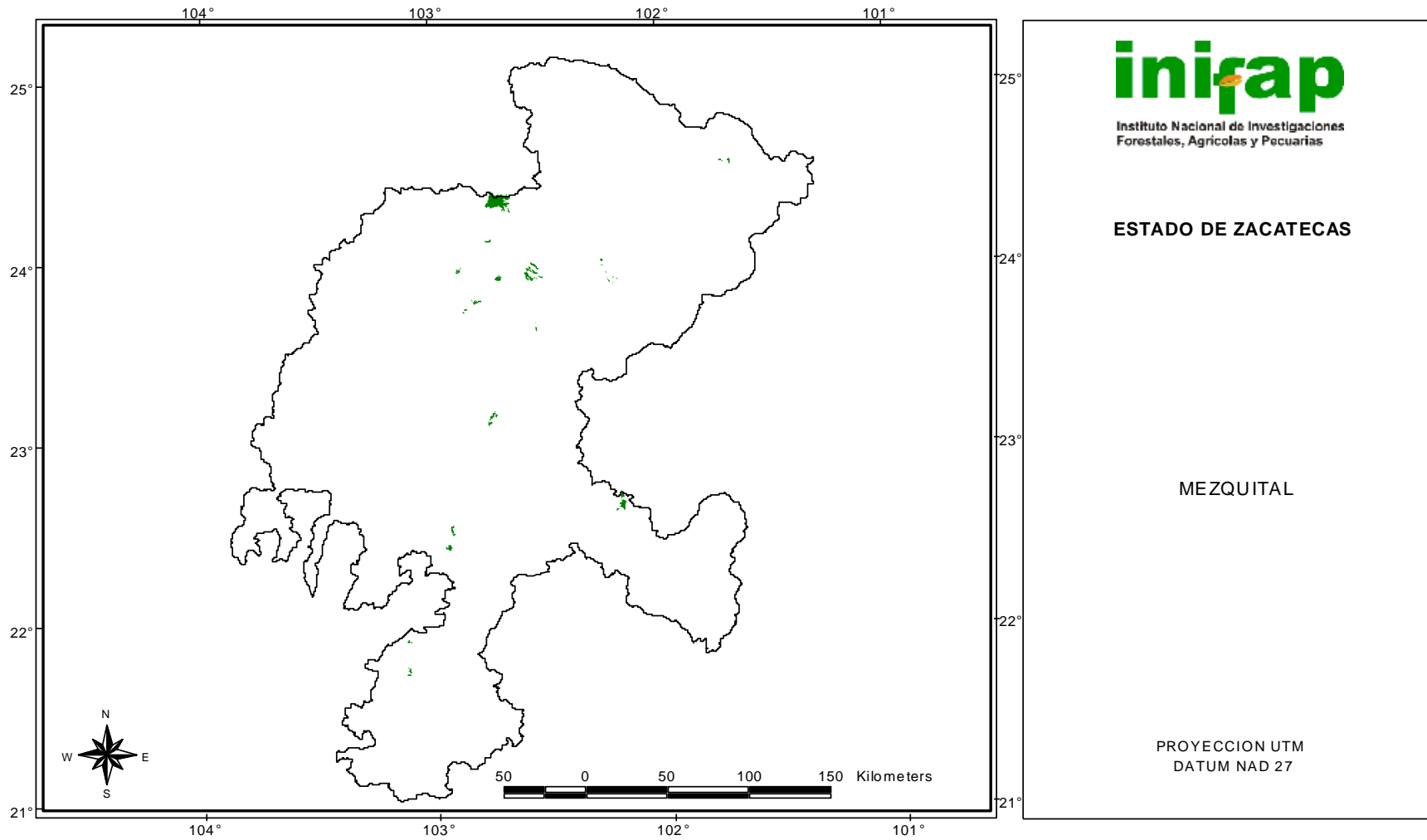


Figura 21. Distribución espacial del mezquital en el estado de Zacatecas.

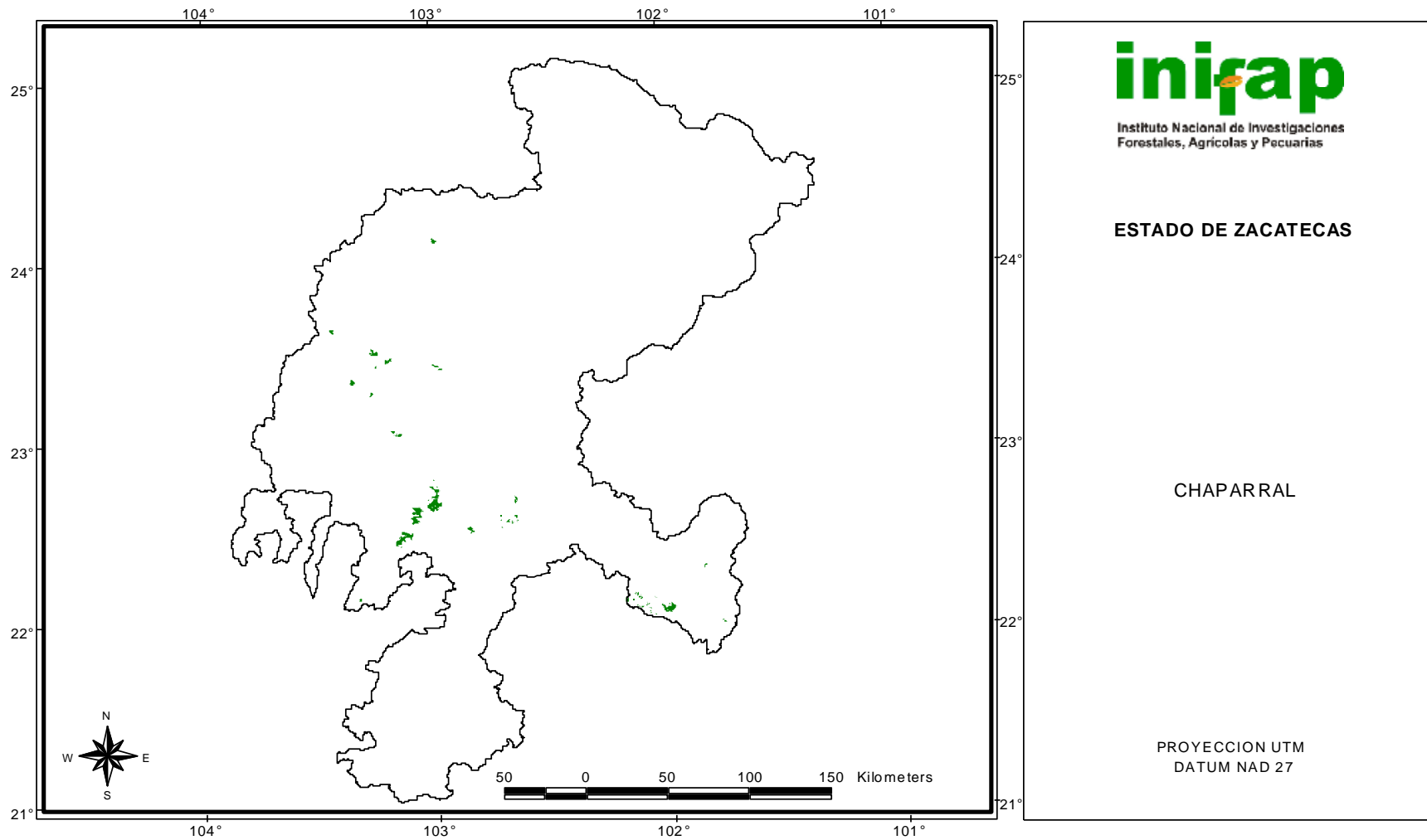


Figura 22. Distribución espacial del chaparral en el estado de Zacatecas.

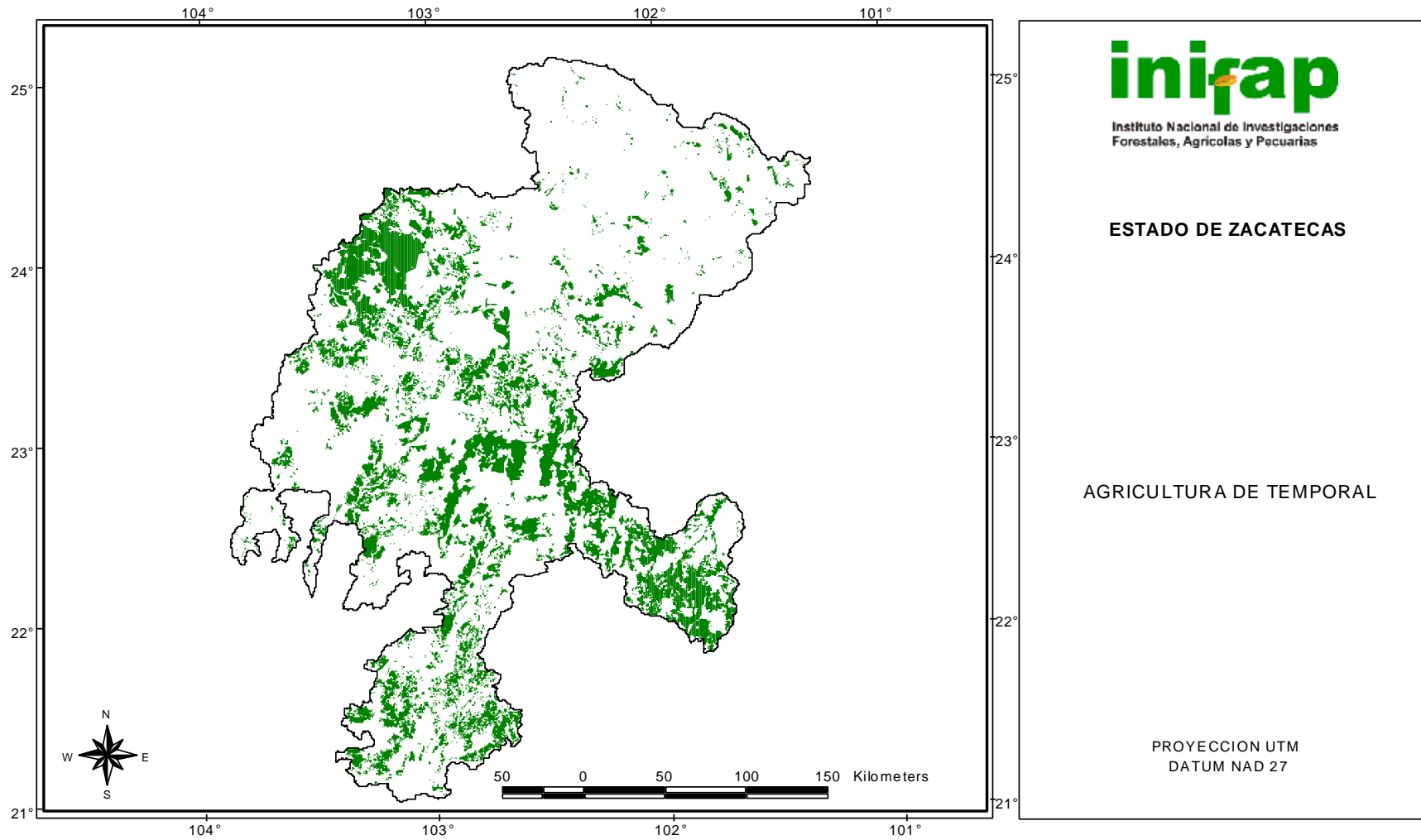


Figura 23. Superficie dedicada a la agricultura de temporal.

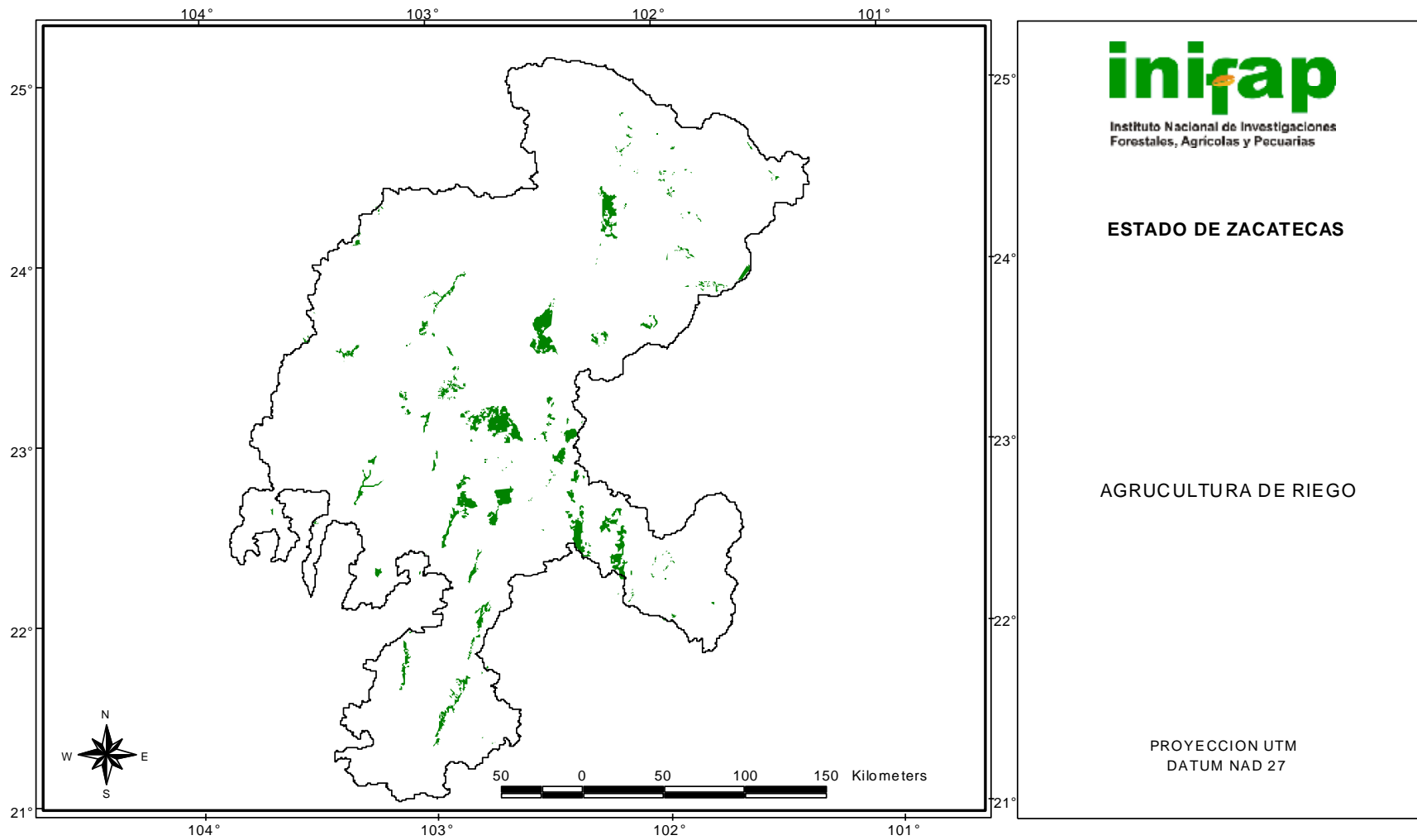


Figura 24. Superficie dedicada a la agricultura de riego.

El tercer grupo de formación vegetal por su importancia en superficie es el pastizal (Cuadro 11). Las comunidades vegetales en el Estado son: el pastizal natural, el cual representa el 15.3%, el pastizal inducido, que representa el 3%, el pastizal halófilo con 0.18% y la asociación pastizal huizachal que representa 0.12%; en suma es el 18.6% del total de la superficie del Estado. La distribución de estas comunidades se presentan en las Figuras 25 en el que se puede observar que el pastizal natural está distribuido en todo el Estado; en la Figura 26 se observa que la mayor parte del pastizal inducido se encuentra en el oeste del Estado; el pastizal halófilo en el norte (Figura 27) y el pastizal huizachal, en el sur del Estado (Figura 28).

El cuarto grupo de formación vegetal, en orden de importancia por la superficie que ocupa en el Estado, es el bosque (Cuadro 11). Los tipos de vegetación que constituyen esta formación son las latifoliadas, que incluye al bosque de encino y con una superficie es de un 6.1% (Figura 29). El bosque bajo abierto ocupa una superficie de 4.5% (Figura 30); la asociación pino-encino (3.3%) (Figura 31); el bosque de encino-pino (2.1%) (Figura 32); el bosque de pino con 1.4% de la superficie y el bosque de Táscate o Sabino (*Juniperus deppeana*) con 0.1%. En total, la formación bosque representa un 17.5% del total de la superficie estatal.

Como quinta formación de importancia en el Estado es la selva, cuyo tipo de vegetación presente es la selva caducifolia y subcaducifolia; presenta las comunidades vegetales de selva baja caducifolia y matorral subtropical (Cuadro 11). Ambas comunidades representan el 5% del total de la superficie del Estado; esta formada por arbustos o árboles bajos espinosos e inermes y caducifolios en la estación de sequía; es una comunidad de transición entre bosques o selvas de clima subhúmedo y vegetación de zonas áridas y semiáridas; la especie más comunes son la Vara dulce o Varaduz (*Eysenhardtia polystachya*).

Un sexto grupo vegetal de importancia en el Estado, es el denominado “otros tipos de vegetación”; agrupa tipos de vegetación no identificados o de menor importancia que los anteriores, como la vegetación halófila, que es la arbustiva o herbácea (ocasionalmente con dominancia de gramíneas), que se desarrolla sobre suelos con alto contenido de yeso

(gipsófila) o sales (halófila), en zonas áridas y semiáridas; una de las especies es el chamizo (*Atriplex canescens*); se localiza al norte del Estado (Figura 33) y ocupa sólo un 0.9% de la superficie total de la entidad.

Por último, existe la formación denominada “otras coberturas”, la cual abarca los asentamientos humanos y las áreas cubiertas de agua o cuerpos de agua; ésta representa el 0.5% del total.

4.3.2. Uso del suelo

Las áreas con la formación de matorral, pastizal y selva son utilizadas como sitios de pastoreo y representan el 57.35% de la superficie estatal. La explotación del recurso vegetal no se presenta aquí, pero se presentará el estado de fragilidad del mismo en las secciones siguientes. Las áreas forestales en el Estado cubre el 17.5% de la superficie; el estado de la vegetación se abordará mas adelante.

En lo que se refiere a la formación “cultivos”, que incluye los diferentes tipos de agricultura como tipos de vegetación, cubre el 23.7% del total del Estado. Su uso se presentó en el Cuadro 11. La suma de estas superficies, agrícola, pecuaria y forestal representan el 98.5% del total; el resto está ocupada por cuerpos de agua, áreas urbanas y áreas no identificadas.

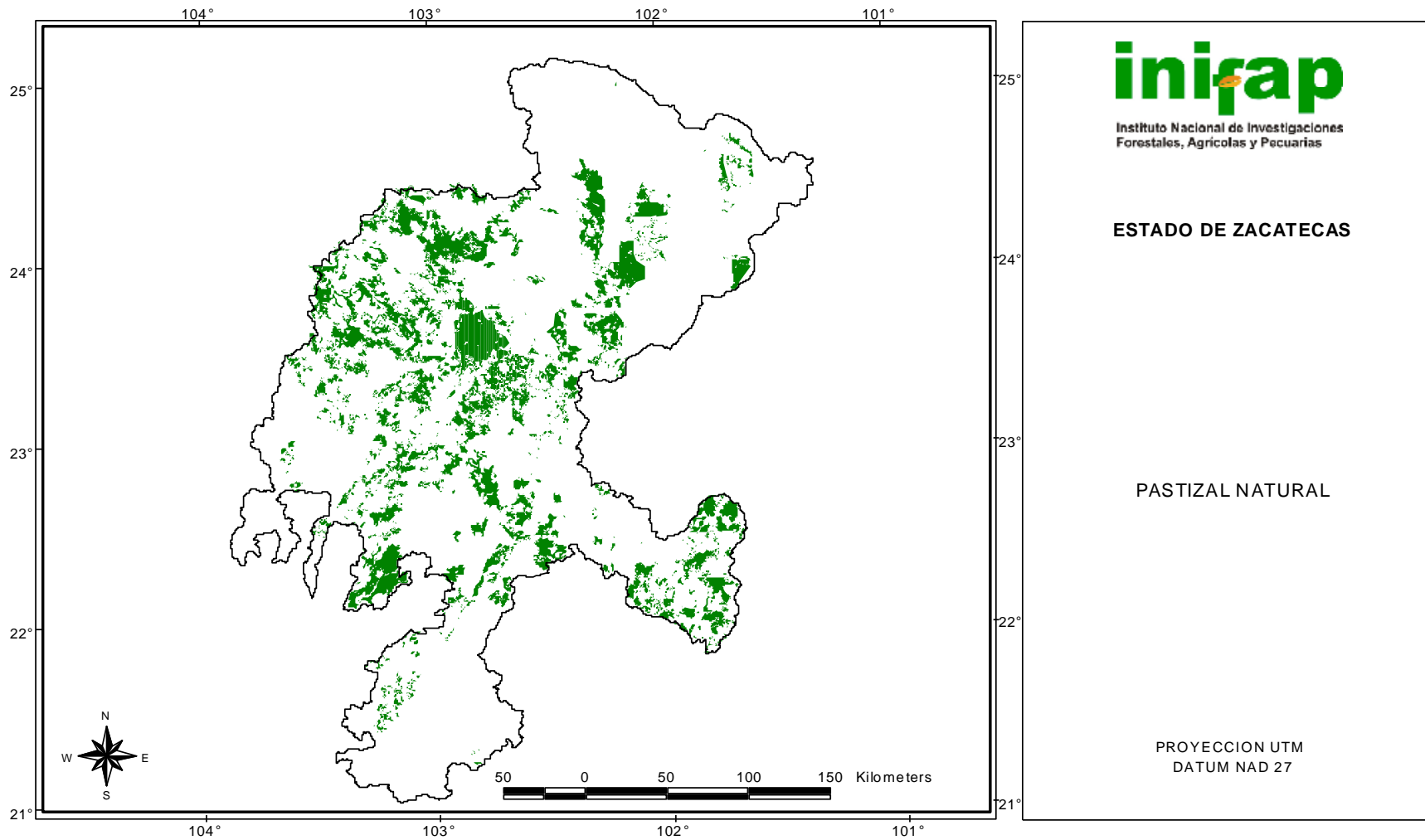


Figura 25. Distribución espacial del pastizal natural en el estado de Zacatecas.

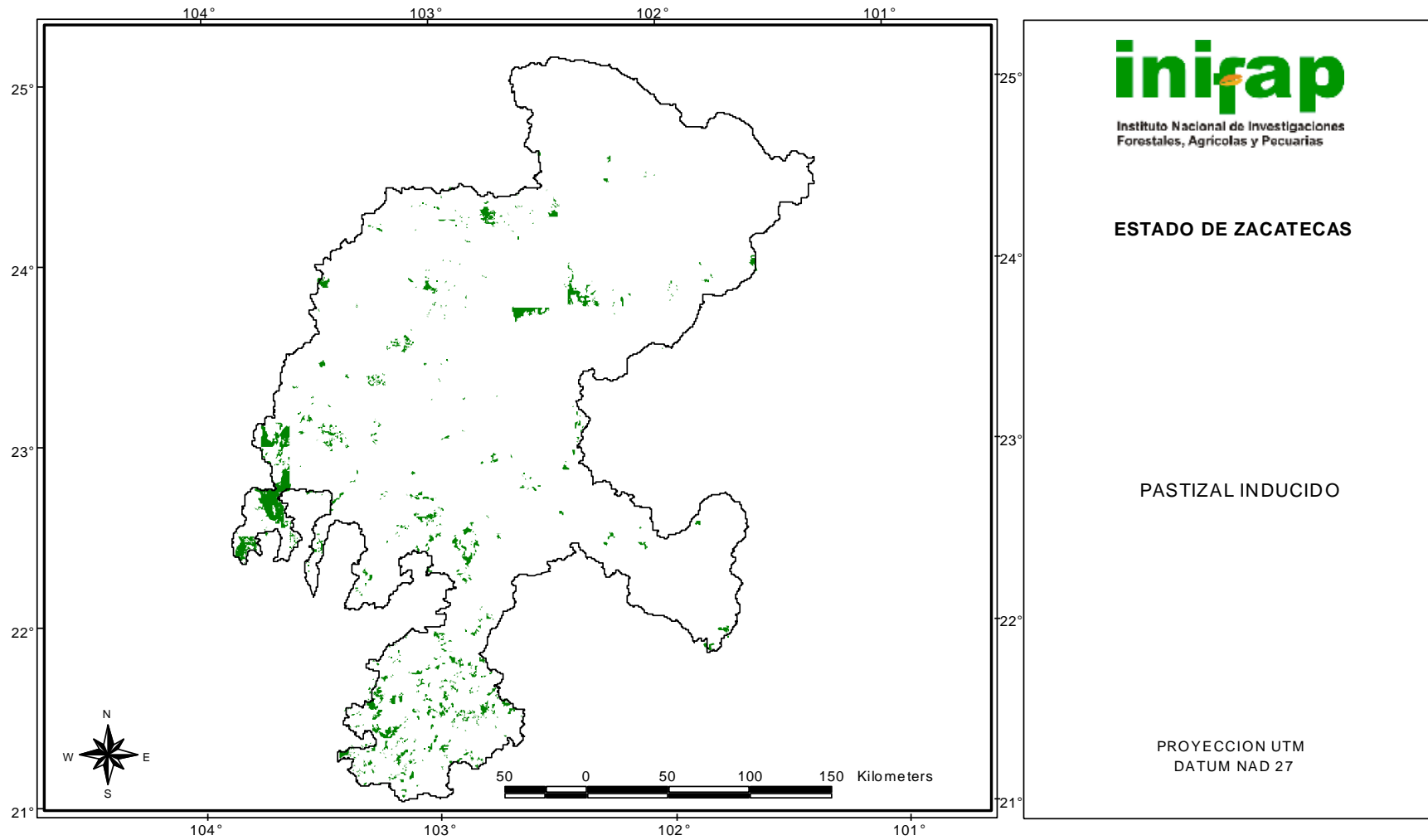


Figura 26. Distribución espacial del pastizal Inducido en el estado de Zacatecas.

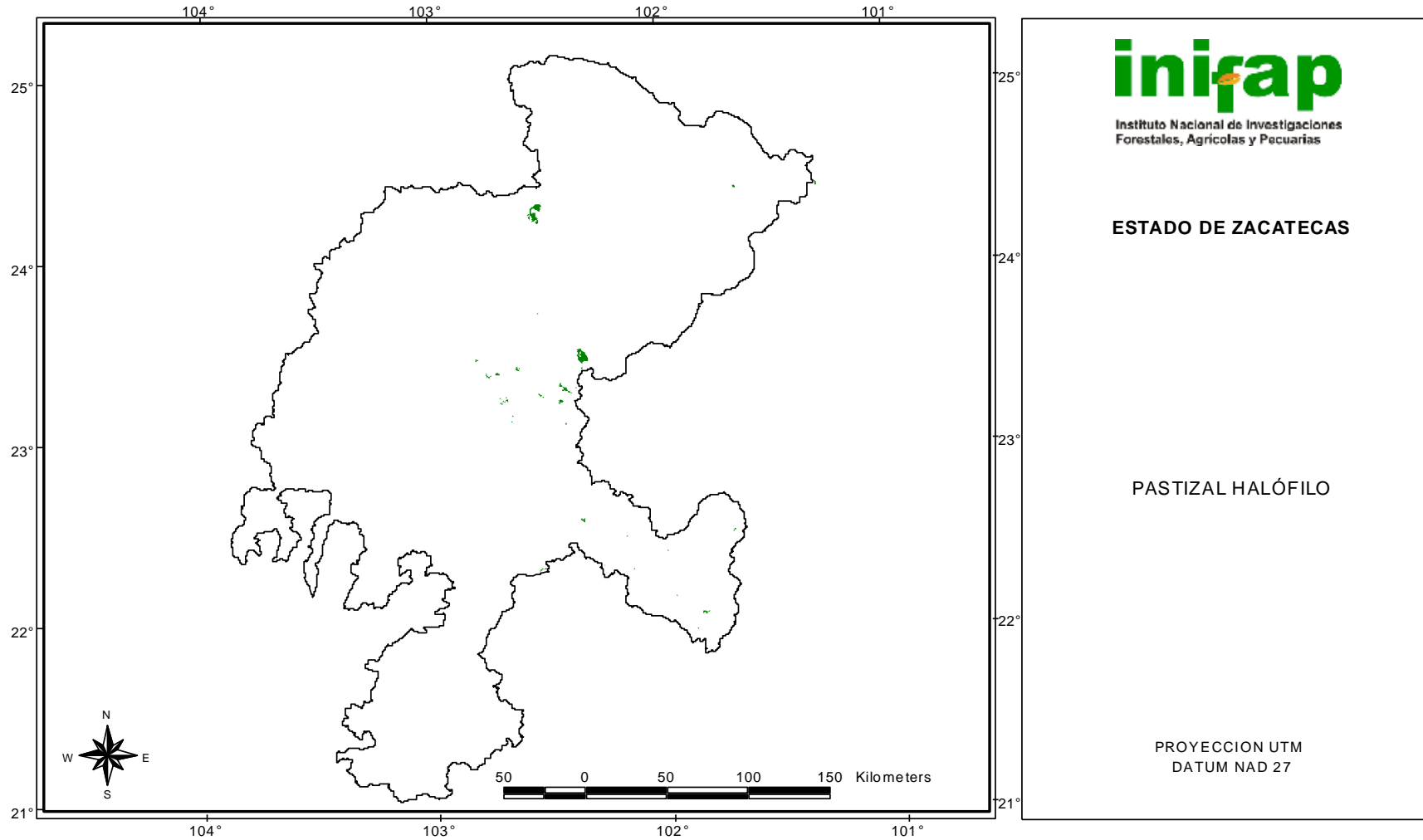


Figura 27. Distribución espacial del pastizal halófilo en el estado de Zacatecas.

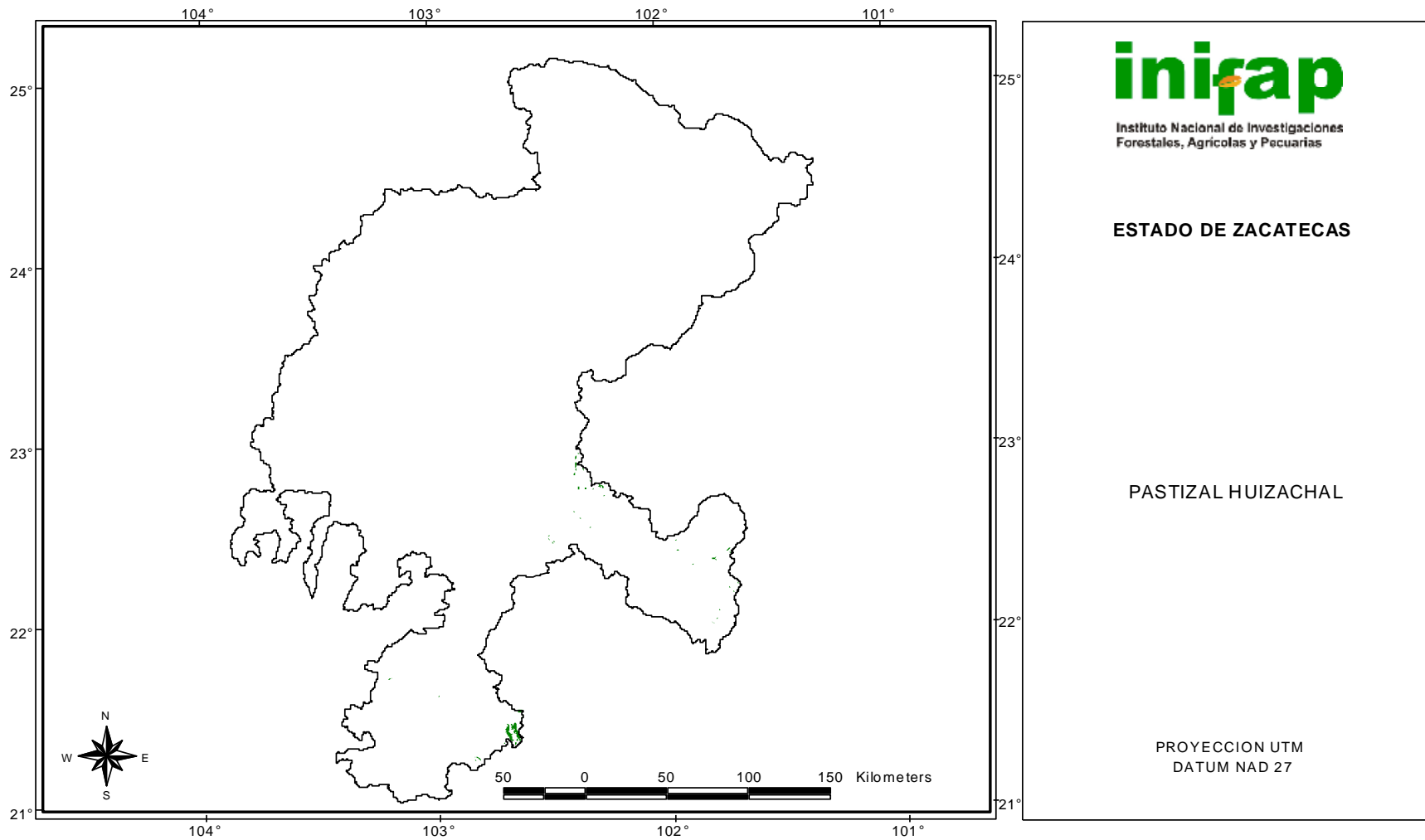


Figura 28. Distribución espacial del pastizal-huizachal en el estado de Zacatecas.

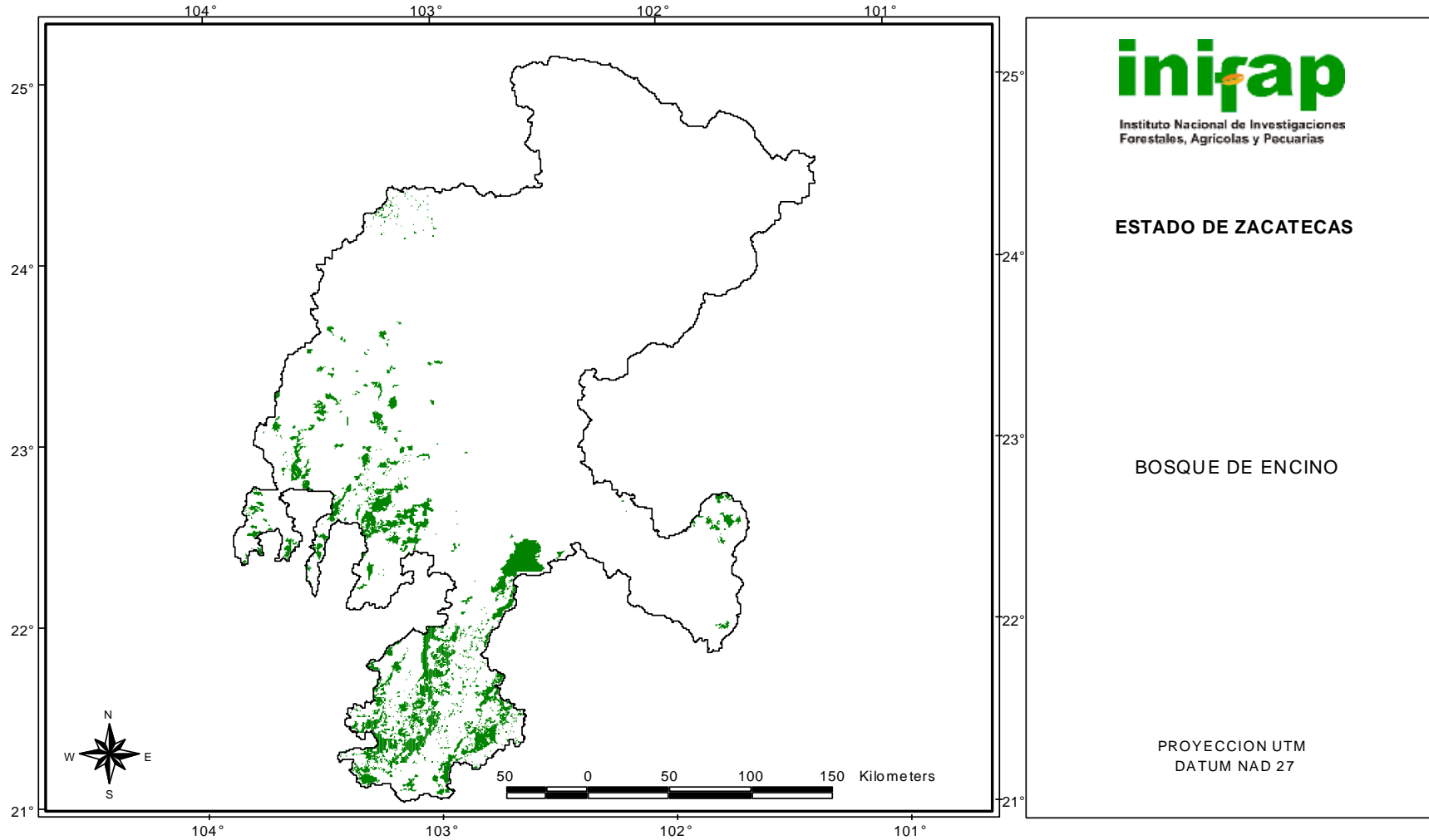


Figura 29. Distribución espacial del bosque de encino en el estado de Zacatecas.

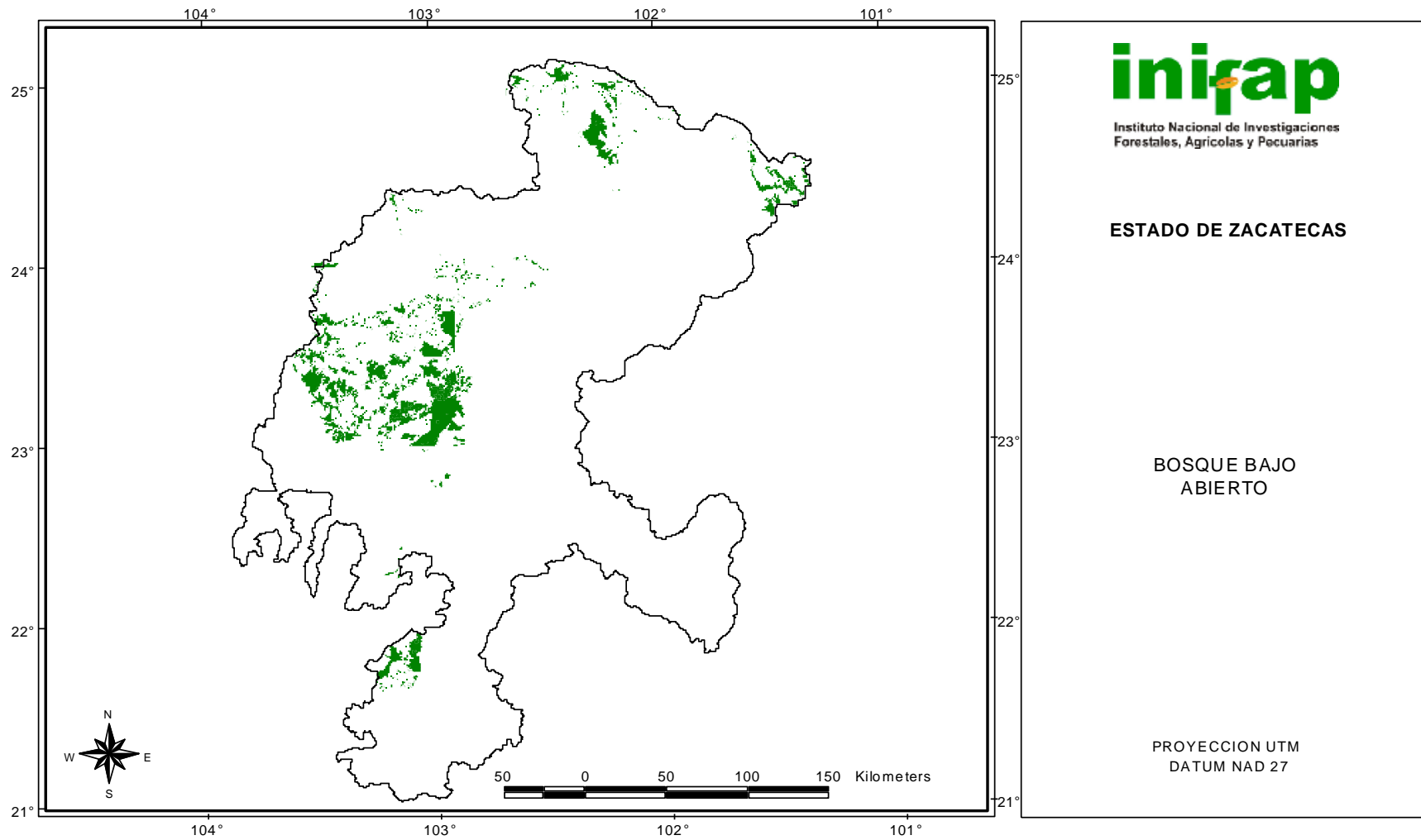


Figura 30. Distribución espacial del bosque bajo abierto en el estado de Zacatecas.

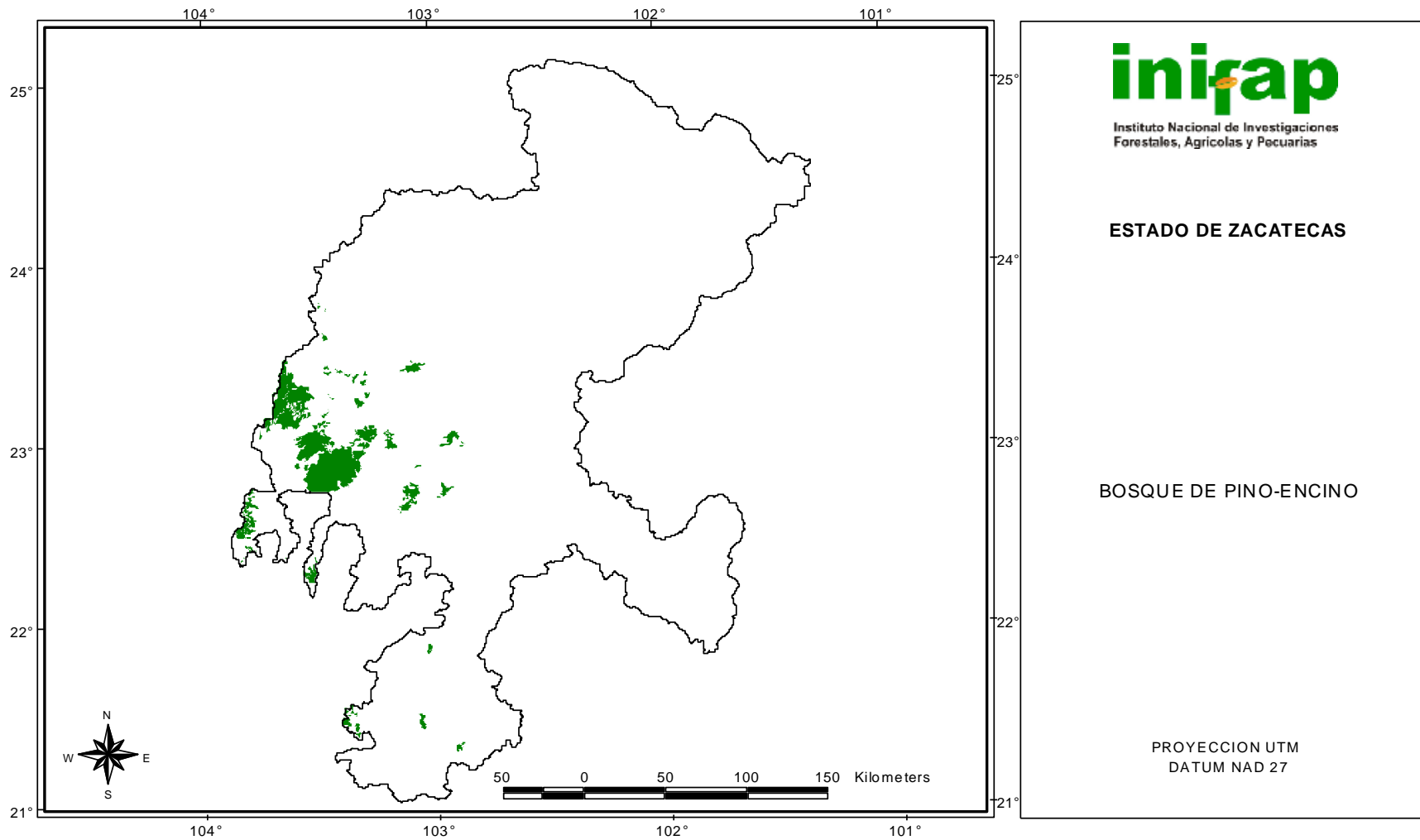


Figura 31. Distribución espacial del pino-encino en el estado de Zacatecas.

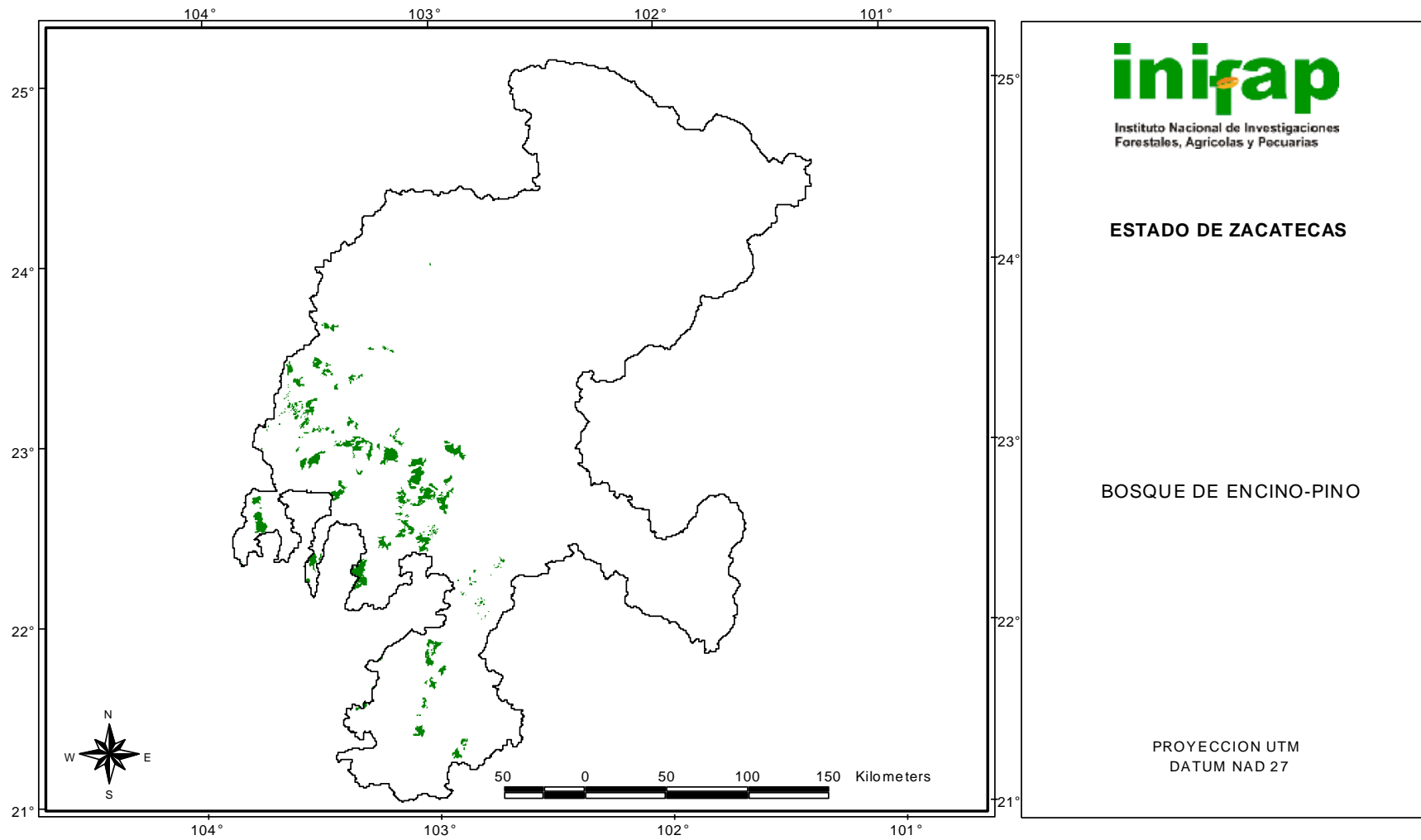


Figura 32. Distribución espacial del encino-pino en el estado de Zacatecas.

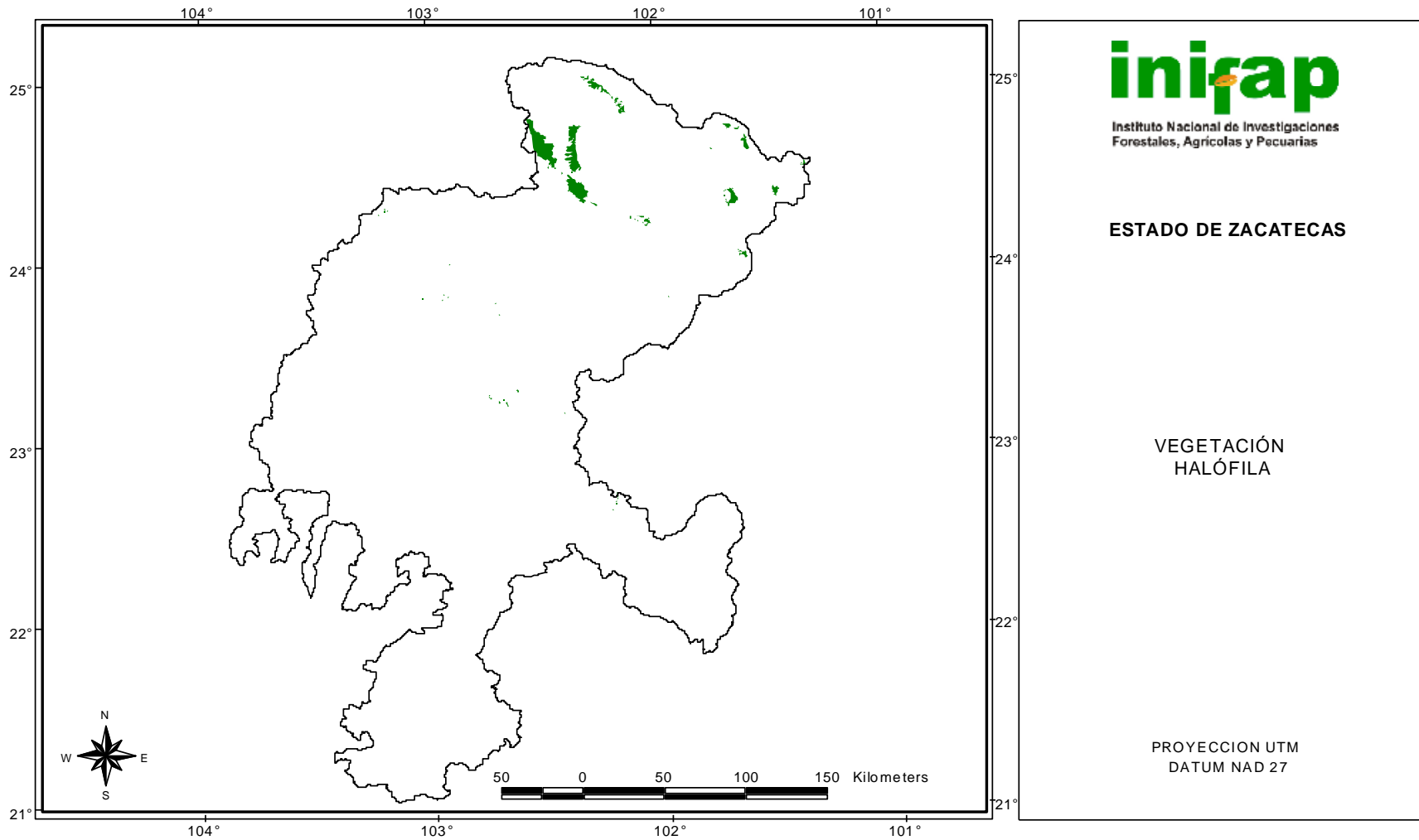


Figura 33. Distribución espacial de la vegetación halófila en el estado de Zacatecas.

4.3.3. Fragilidad natural

Para integrar el impacto de los cambios que están ocurriendo en los recursos naturales y el riesgo de degradación que enfrentan, se integró el mapa de fragilidad, el cual muestra el estado que guarda la vegetación nativa, derivado de la asociación resistencia-resiliencia. La fragilidad, de manera general, se considera como *la capacidad intrínseca de la unidad territorial a enfrentar agentes de cambio, basada en la fortaleza propia de los componentes y en la capacidad y velocidad de regeneración del medio* (SEMARNAP, 2000). En las figuras 34 a 53 se presenta la fragilidad de las comunidades vegetales del estado de Zacatecas:

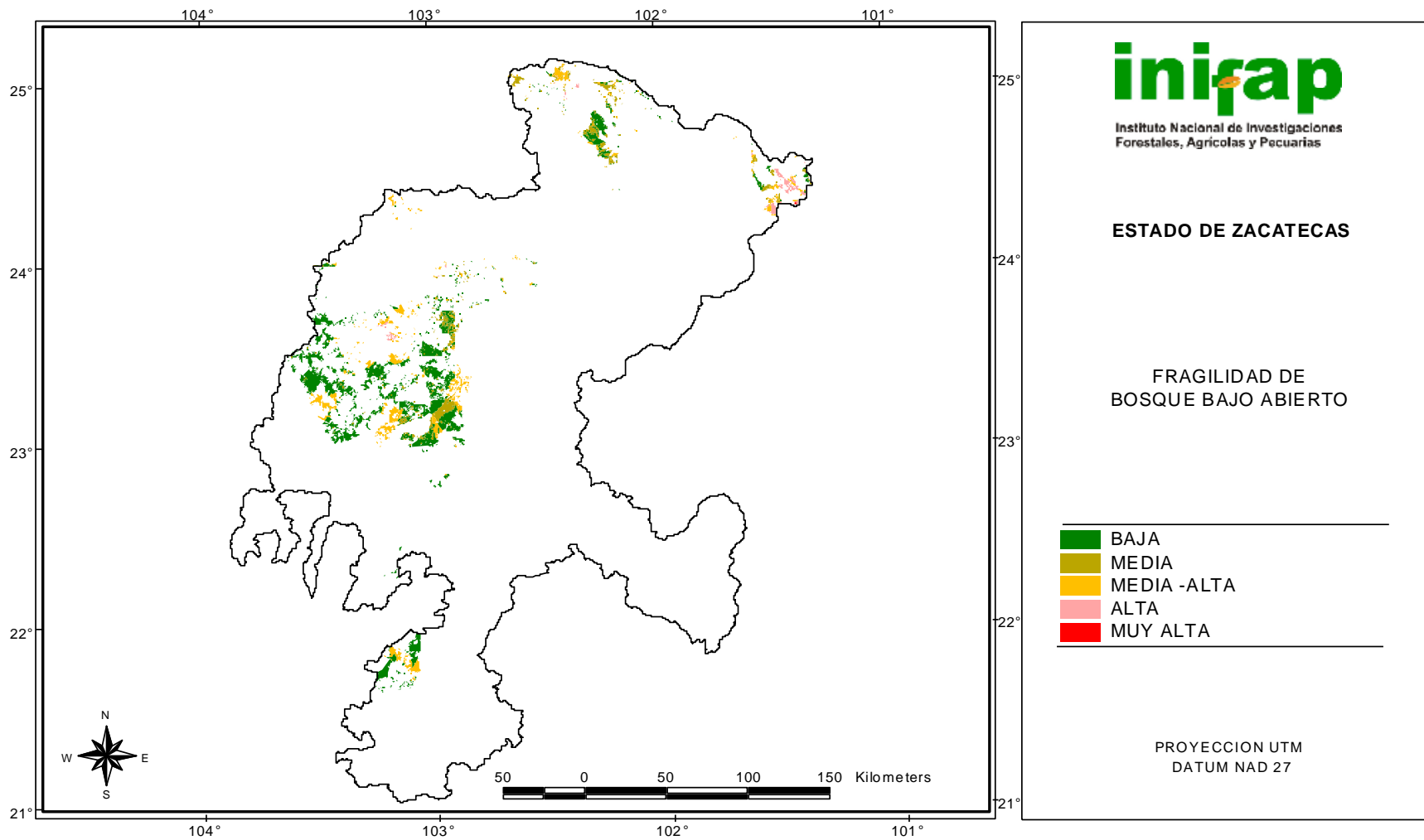


Figura 34. Fragilidad del bosque bajo abierto.

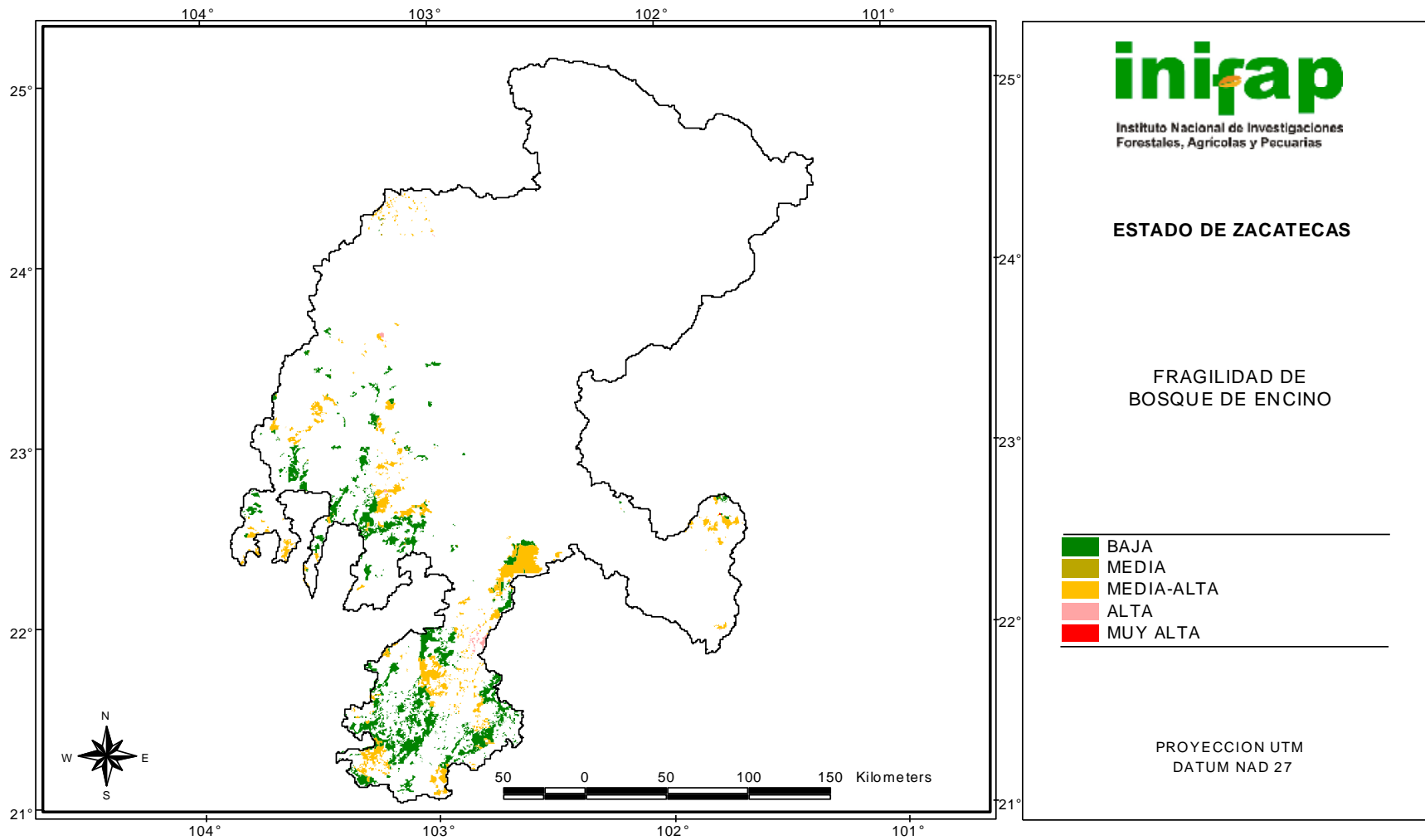


Figura 35. Fragilidad del bosque de encino.

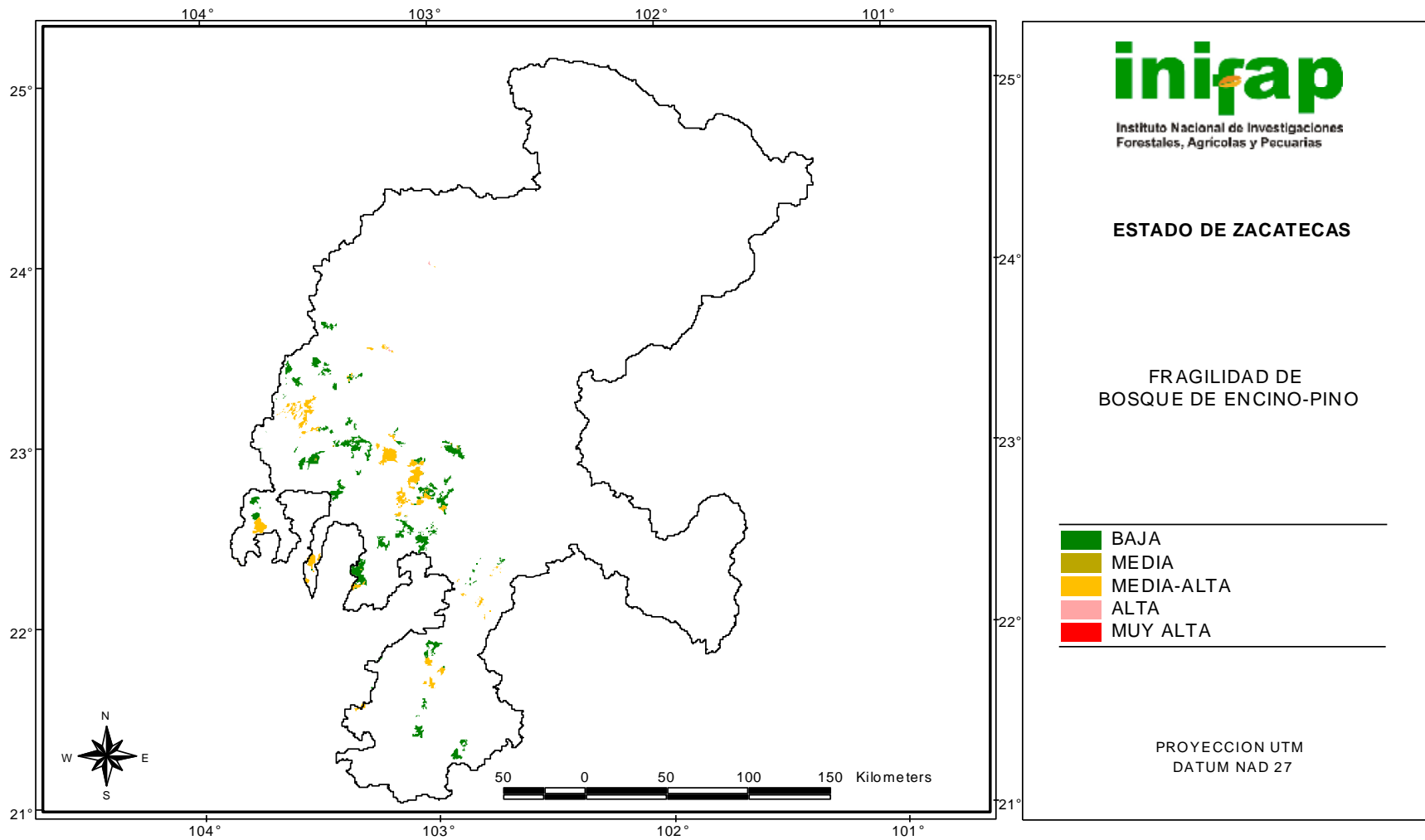


Figura 36. Fragilidad del bosque de encino-pino.

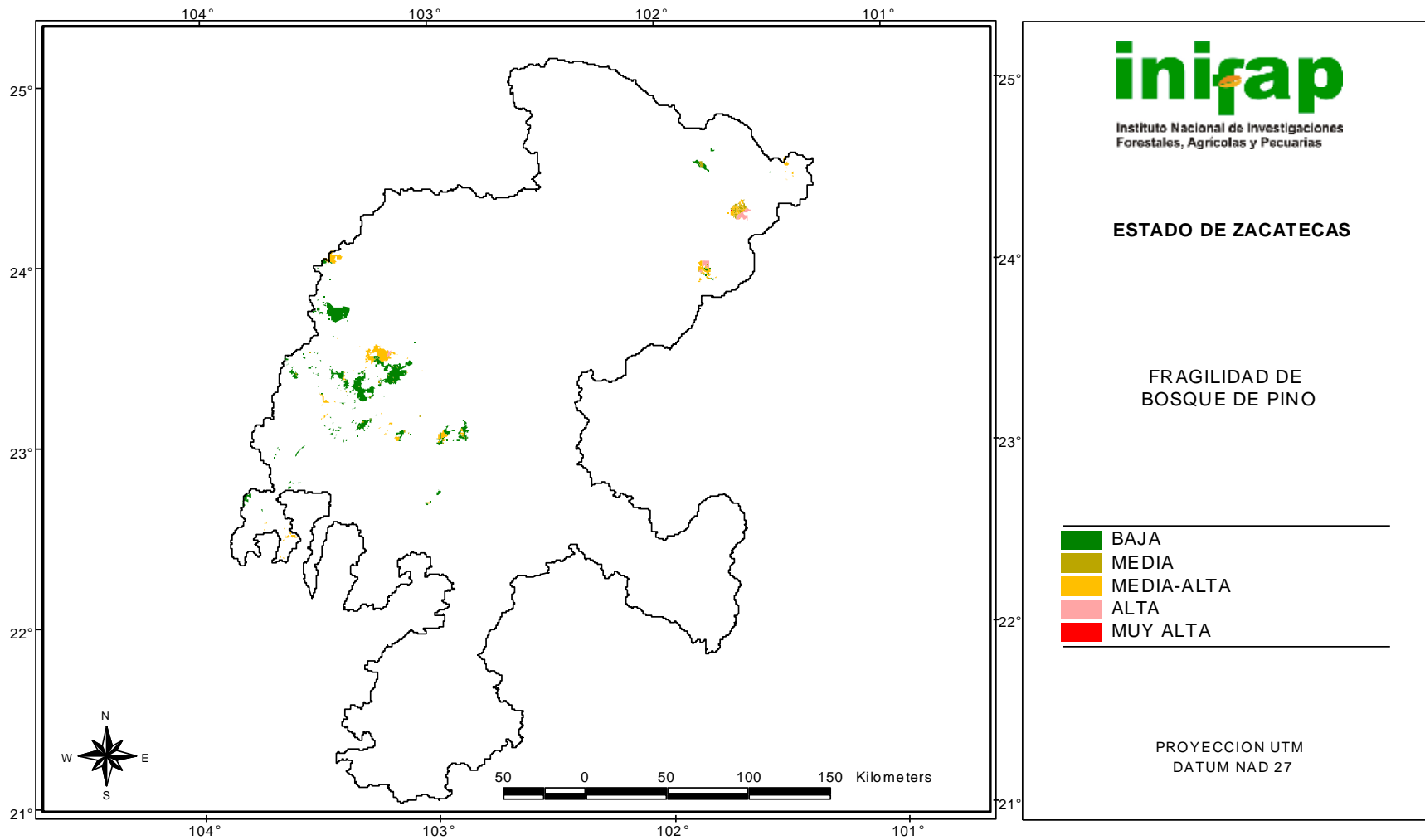


Figura 37. Fragilidad del bosque de pino.

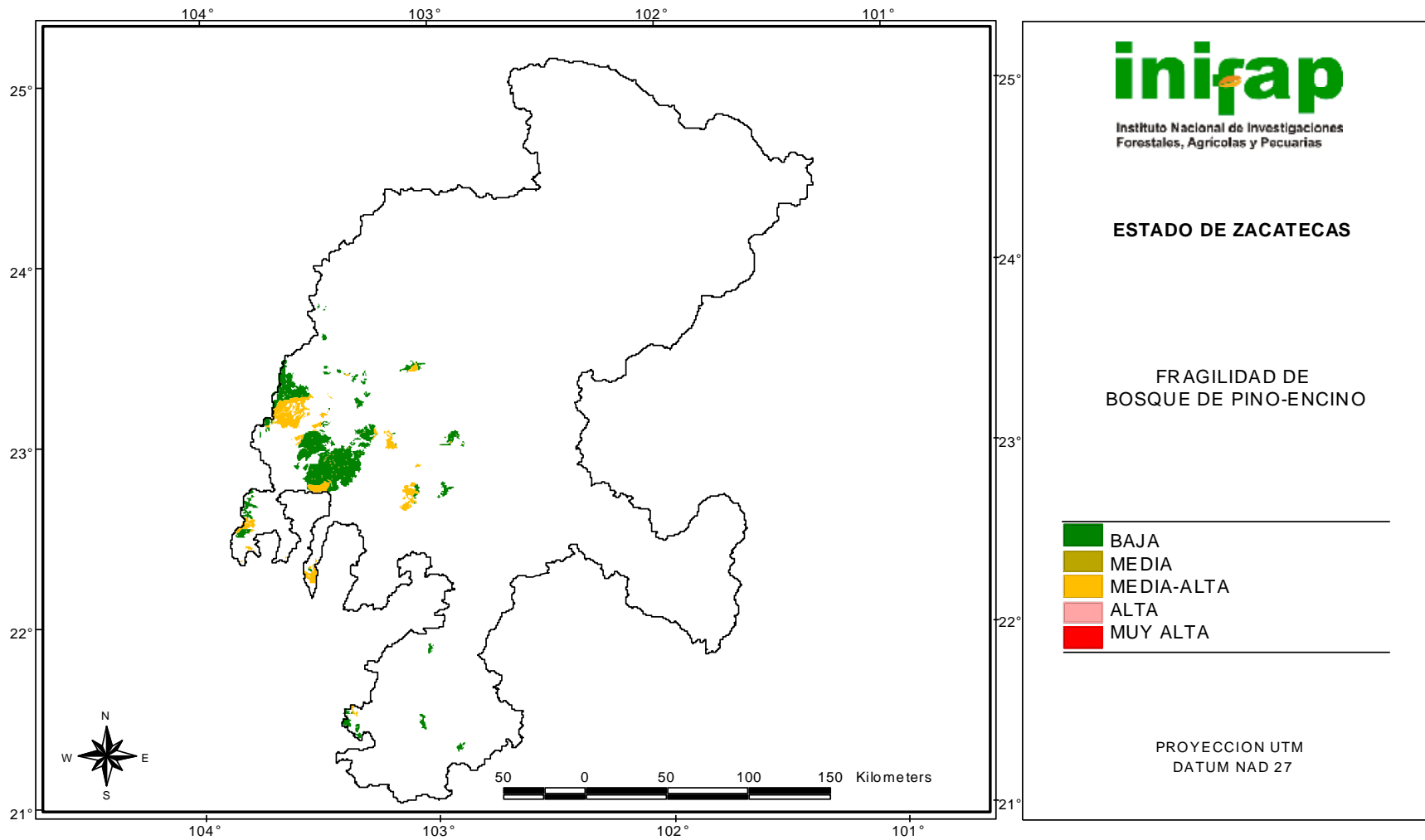


Figura 38. Fragilidad del bosque de pino-encino.

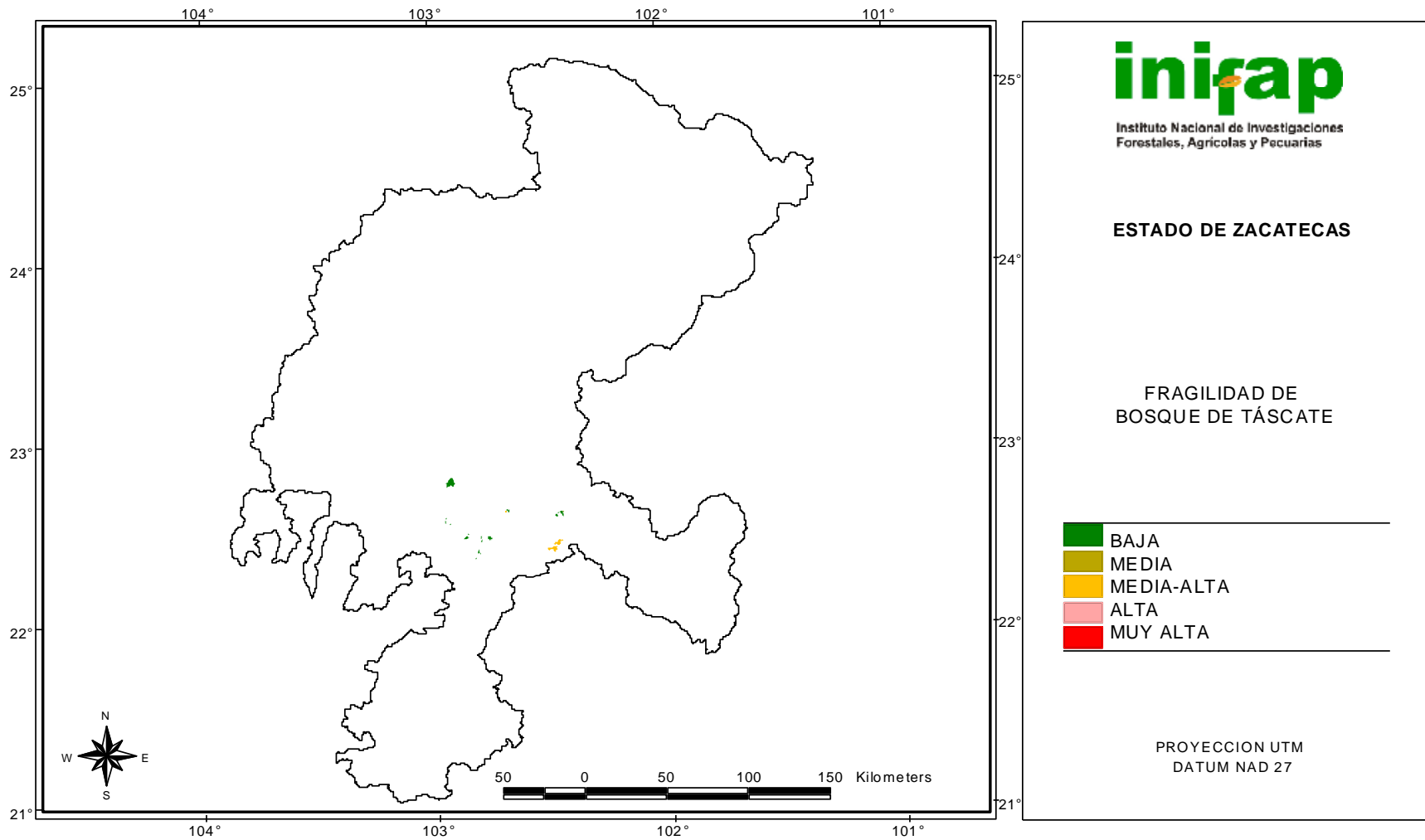


Figura 39. Fragilidad del bosque de táscate.

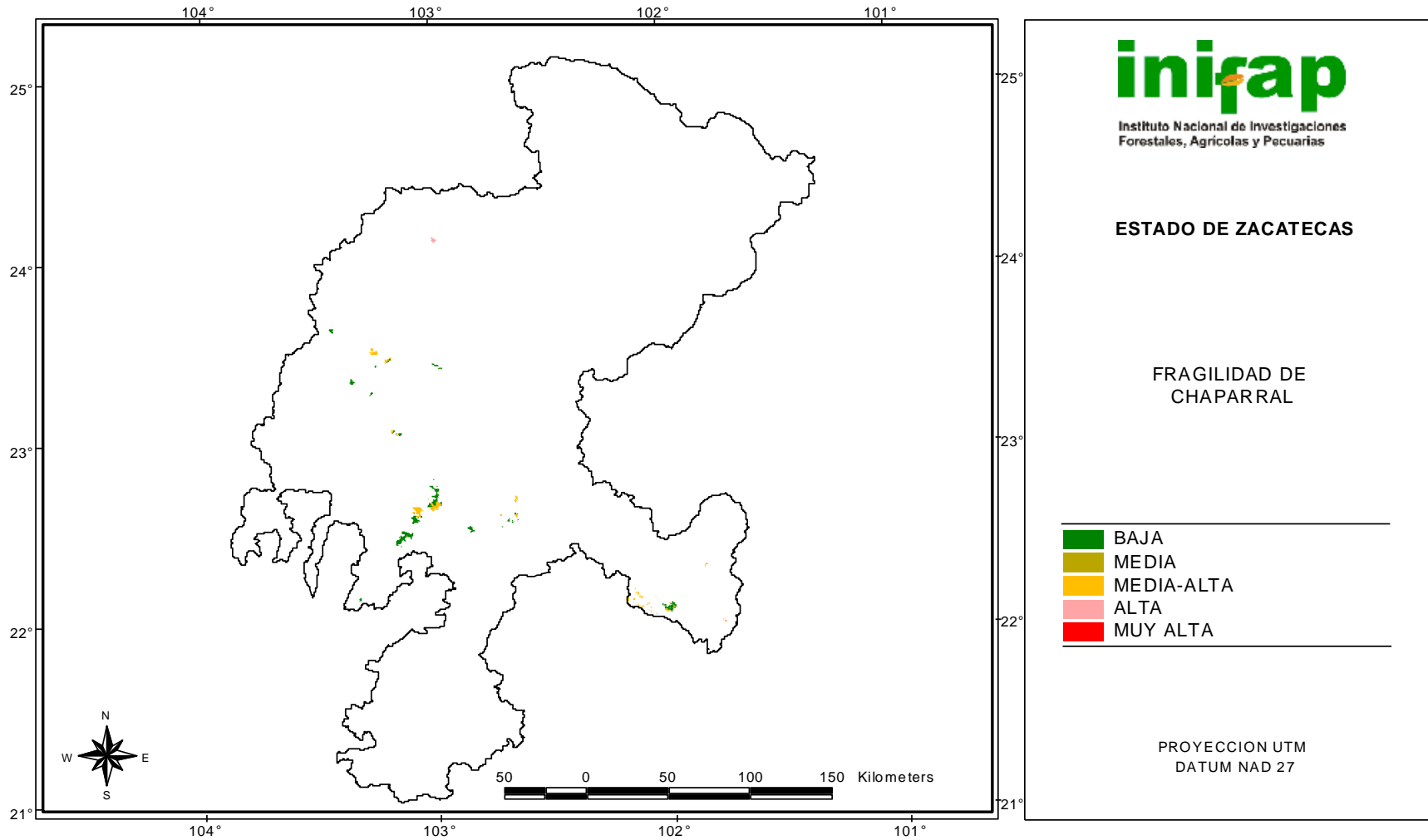


Figura 40. Fragilidad del chaparral.

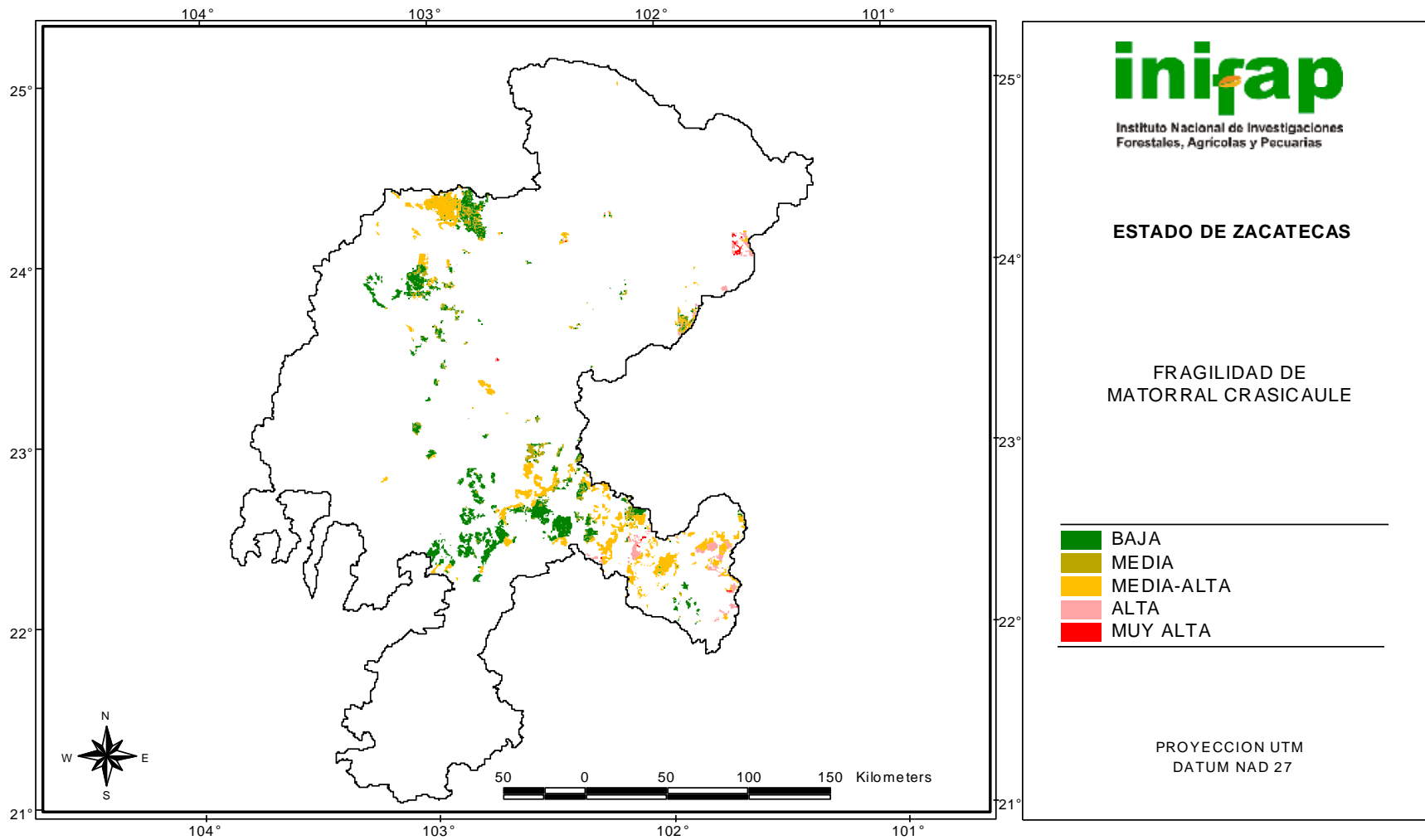


Figura 41. Fragilidad del matorral crasicaule.

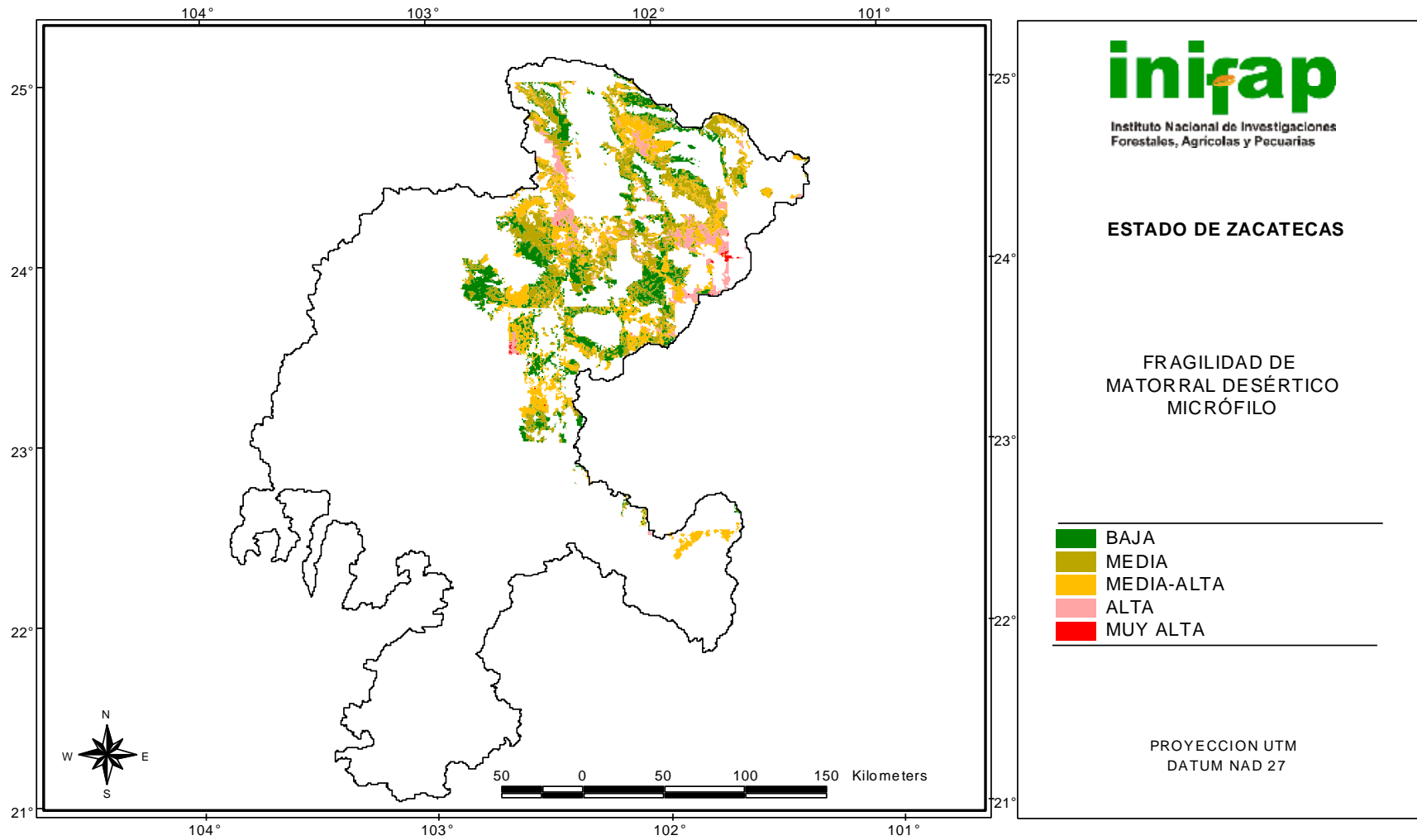


Figura 42. Fragilidad del matorral desértico micrófilo.

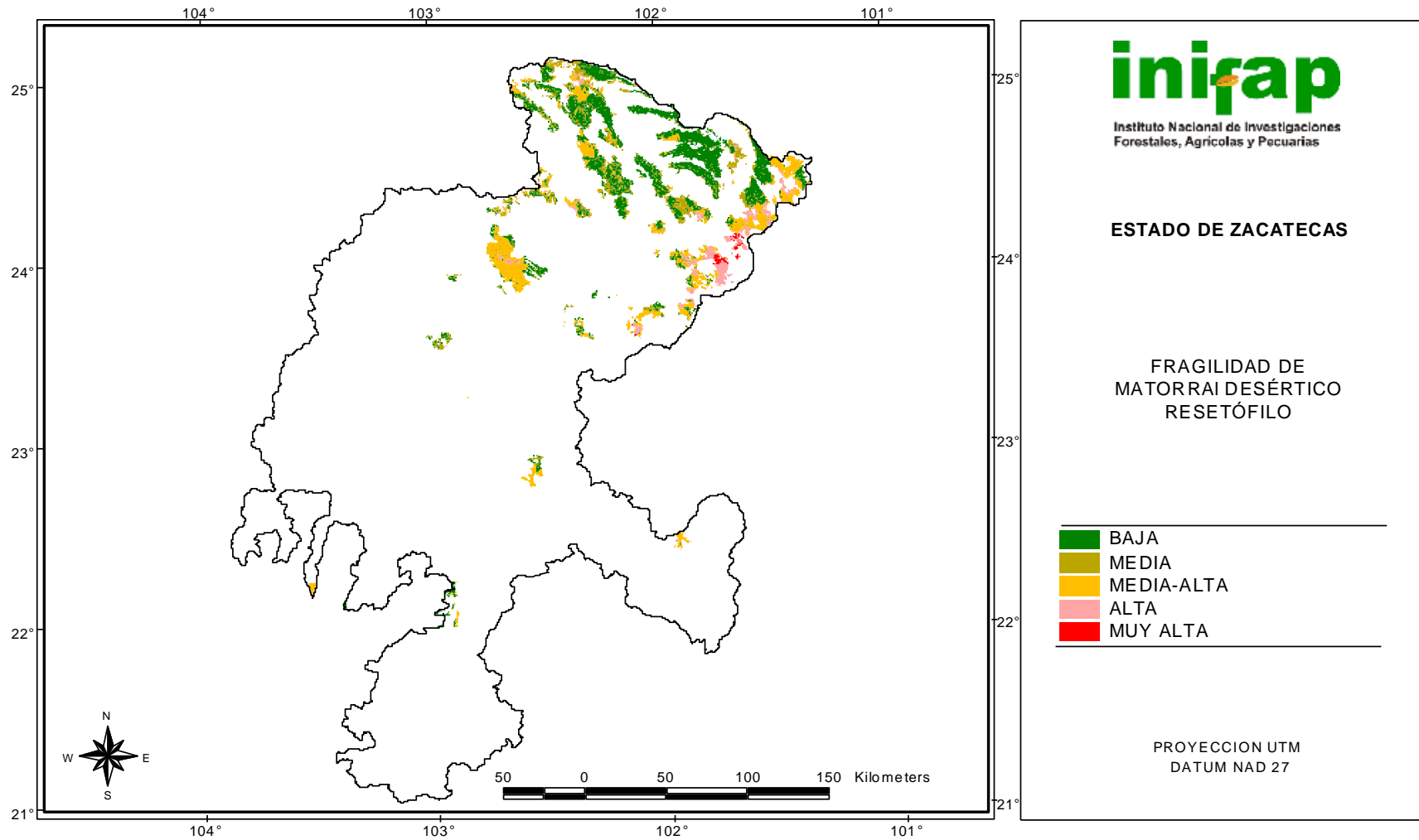


Figura 43. Fragilidad del matorral desértico rosetófilo.

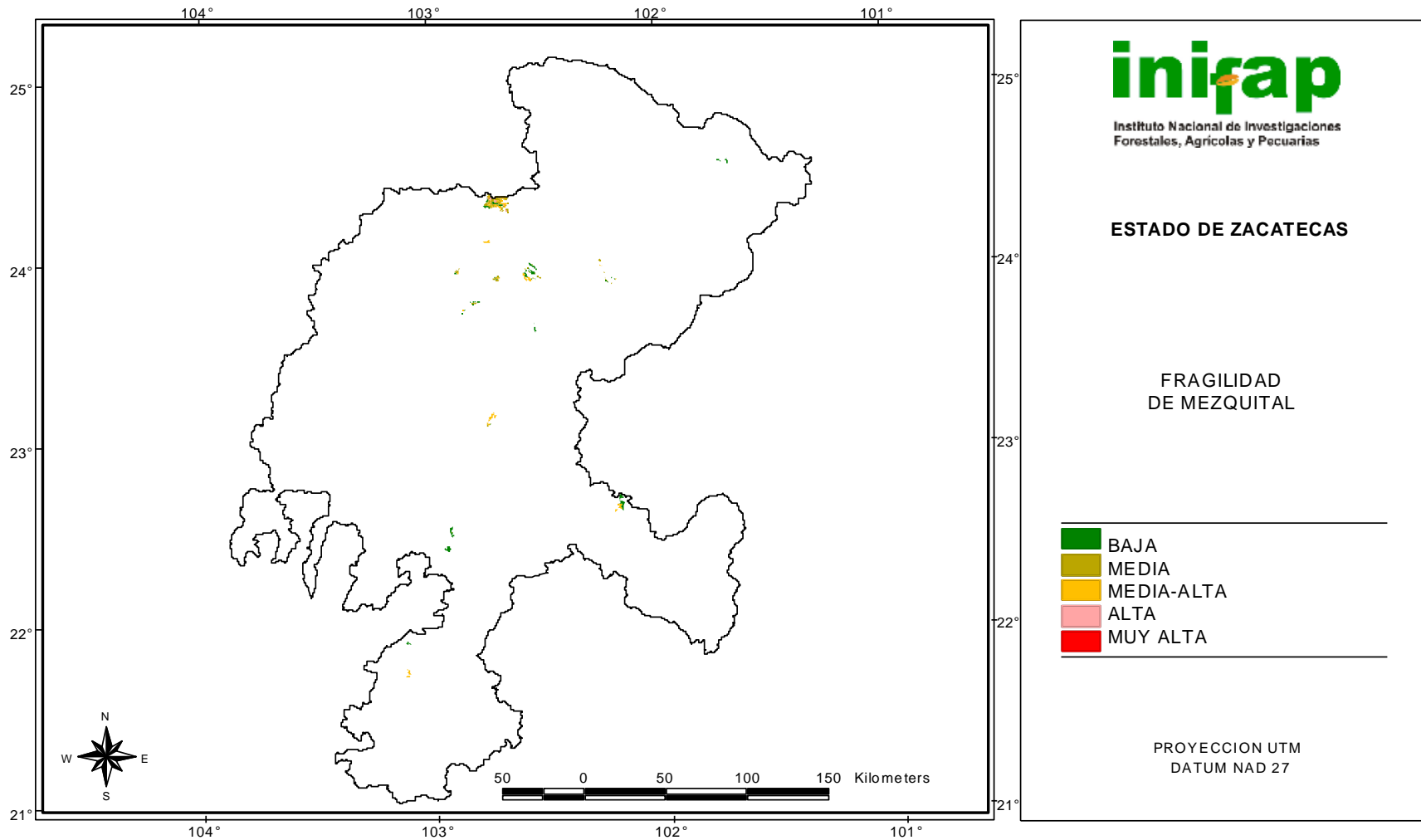


Figura 44. Fragilidad del mezquital.

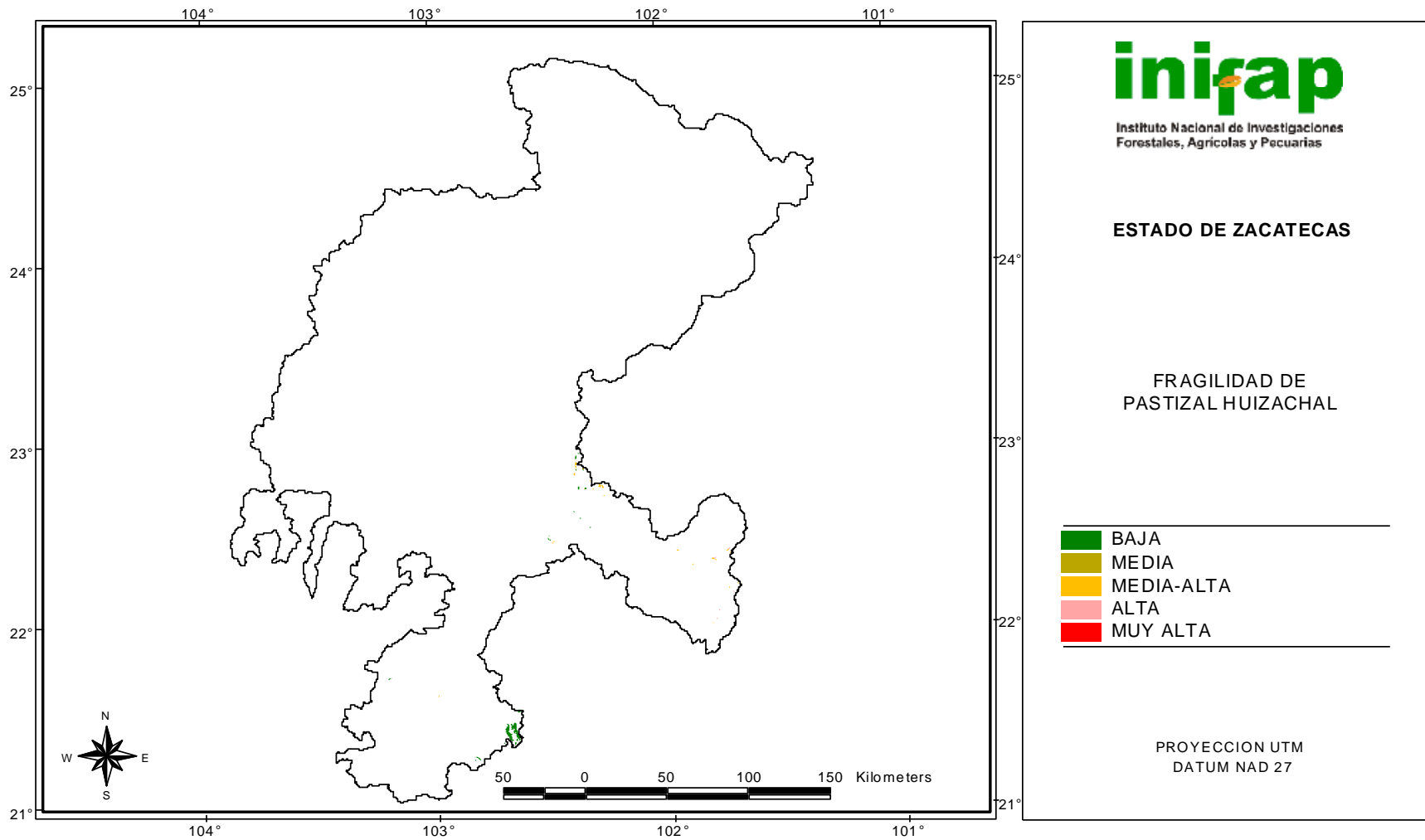


Figura 45. Fragilidad del pastizal – huizachal.

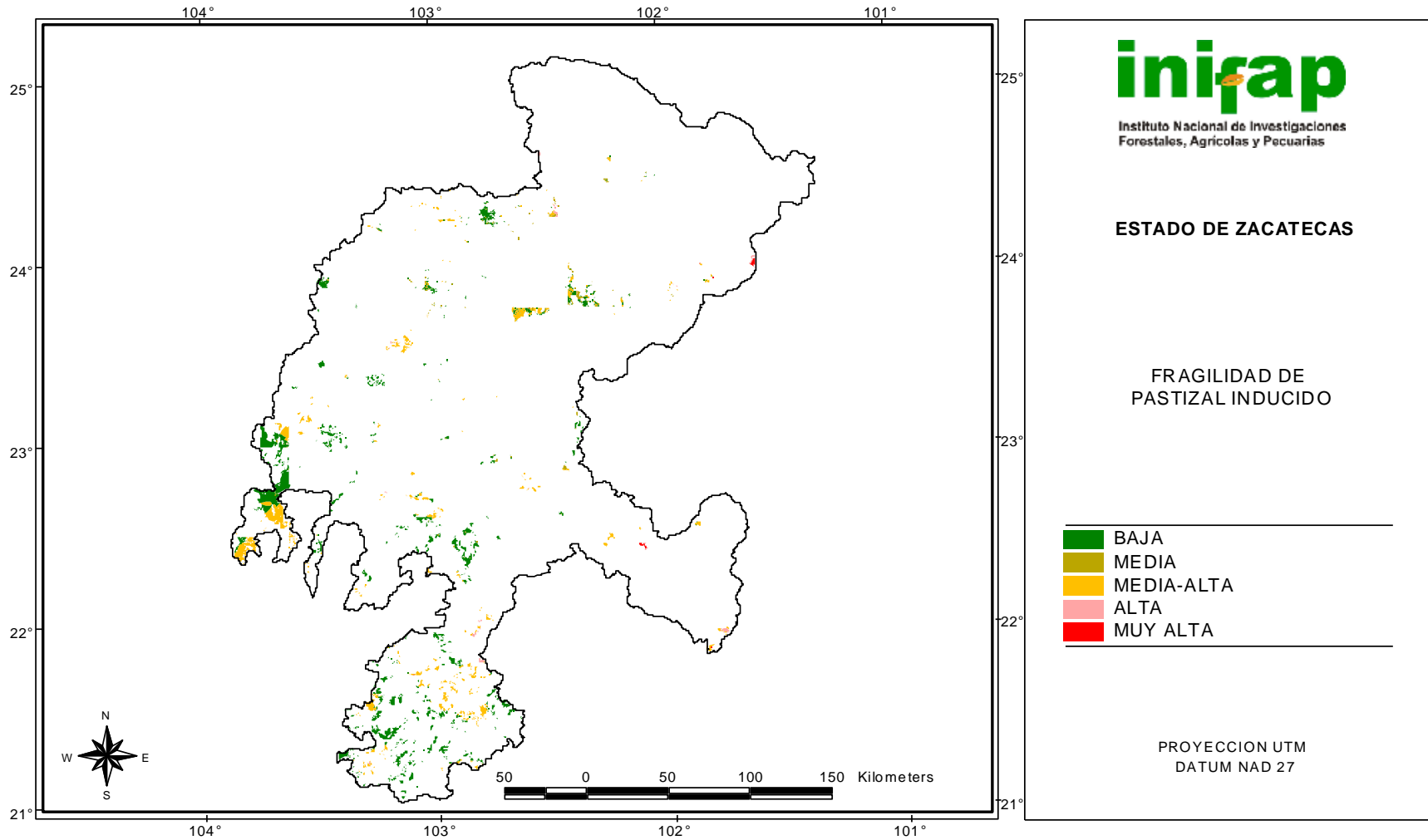


Figura 46. Fragilidad del pastizal inducido.

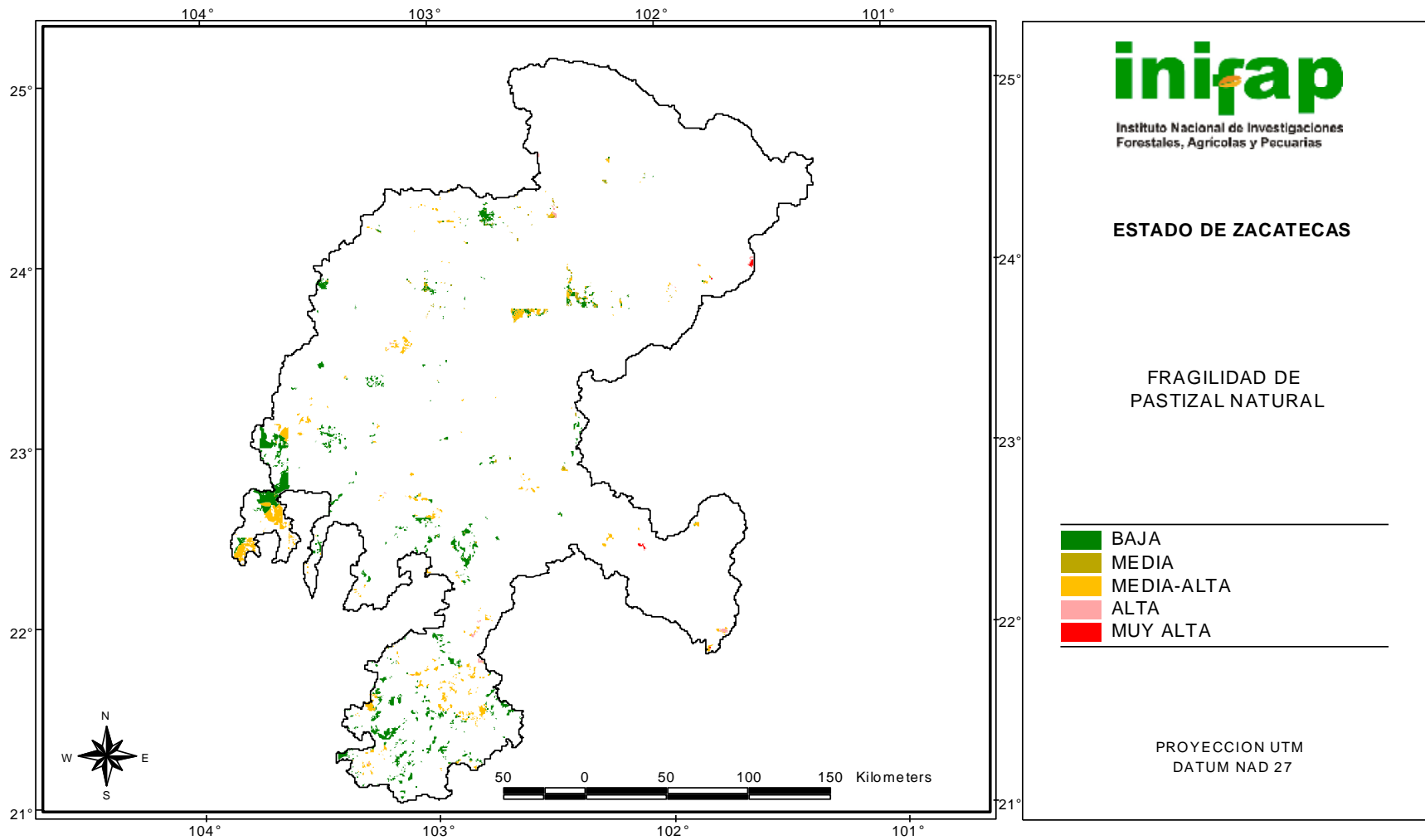


Figura 47. Fragilidad del pastizal natural.

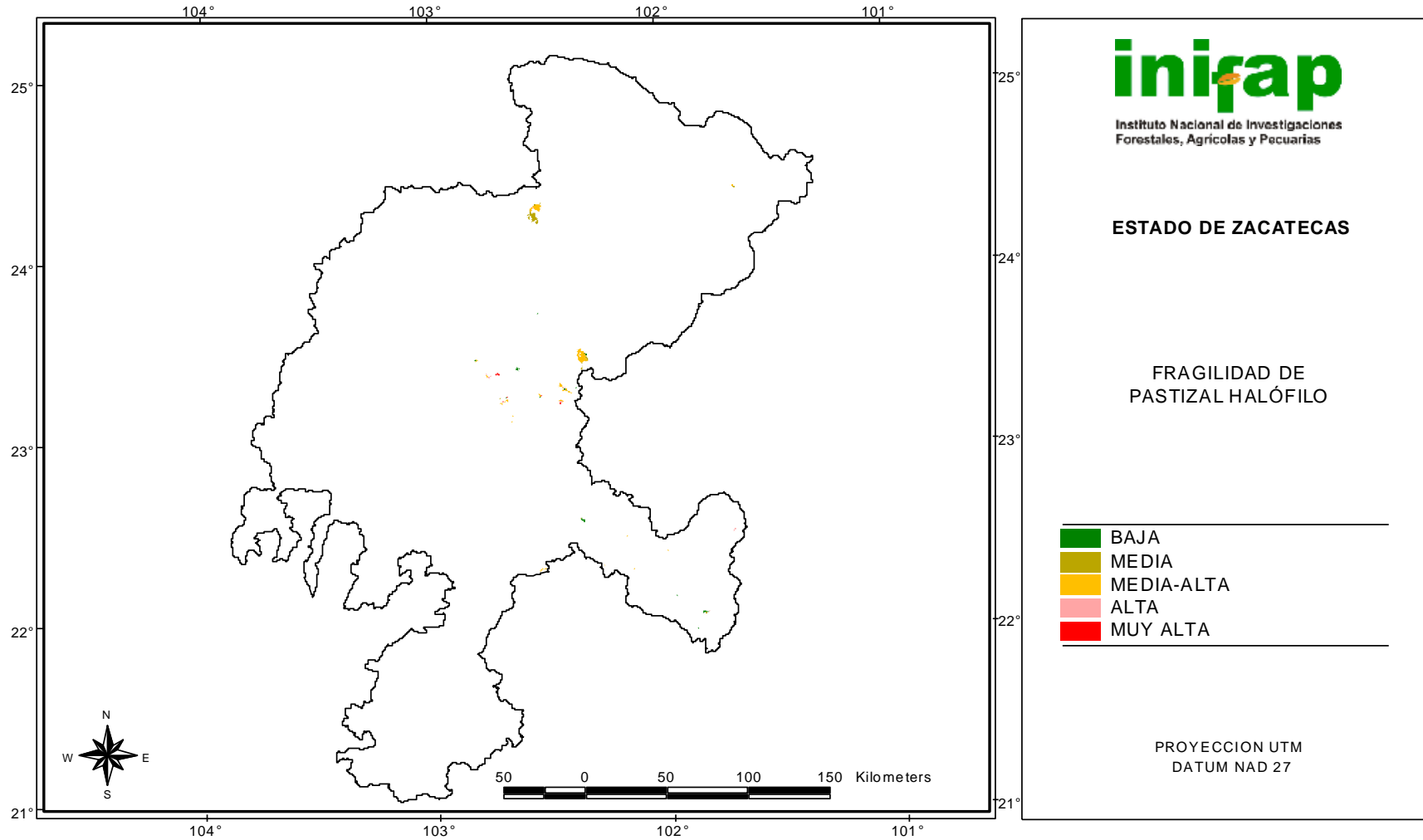


Figura 48. Fragilidad del pastizal halófilo.

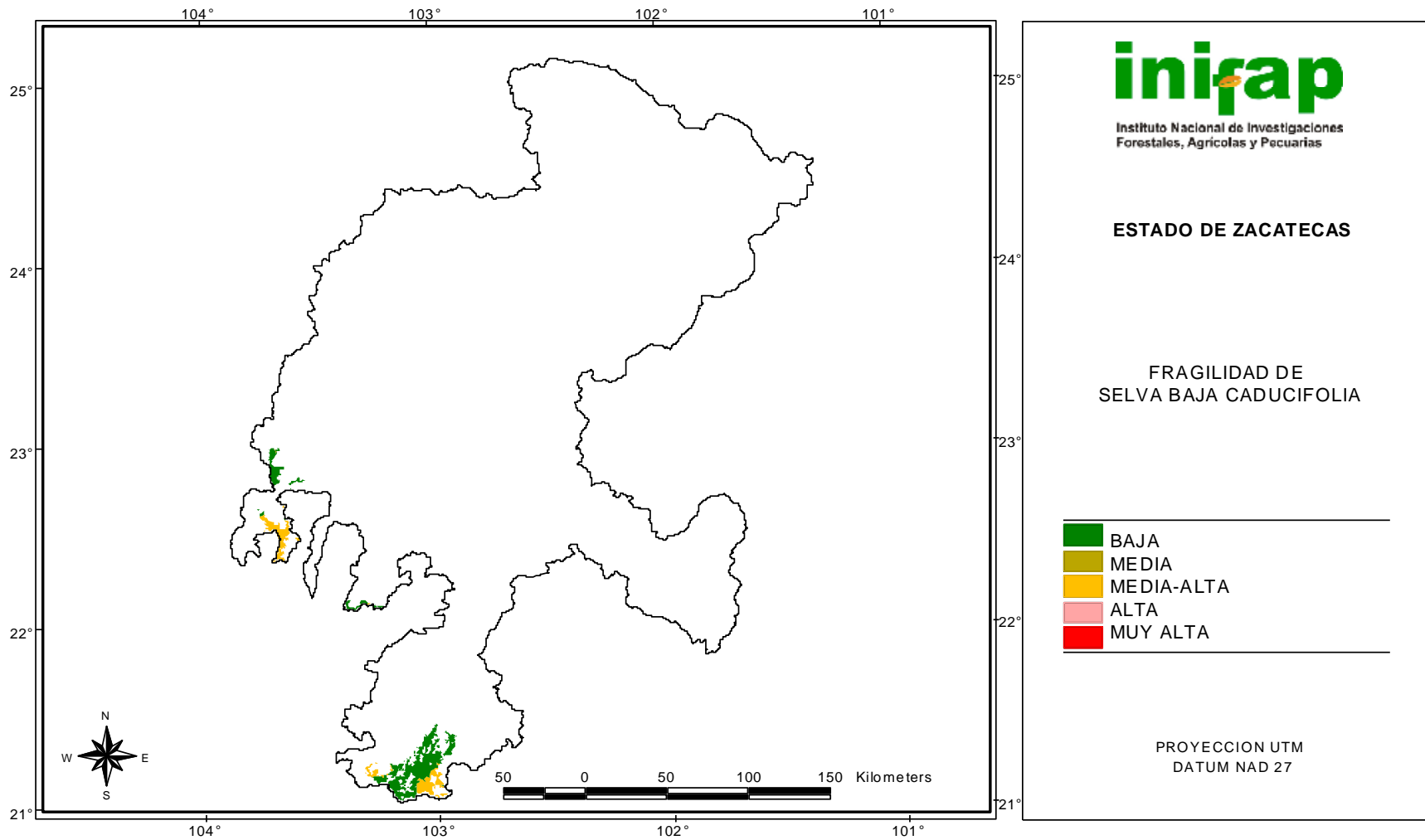


Figura 49. Fragilidad de la selva baja caducifolia.

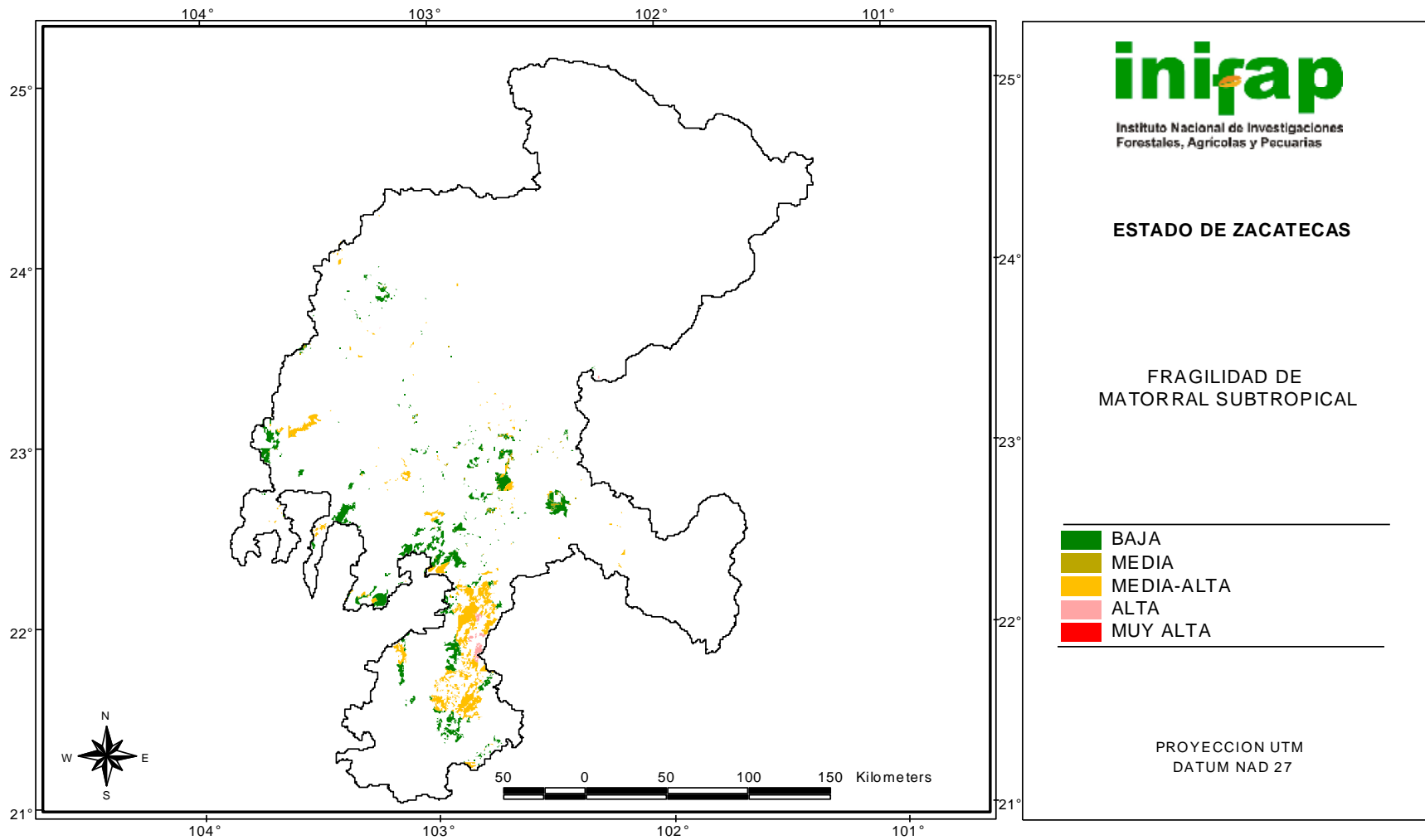


Figura 50. Fragilidad del matorral subtropical.

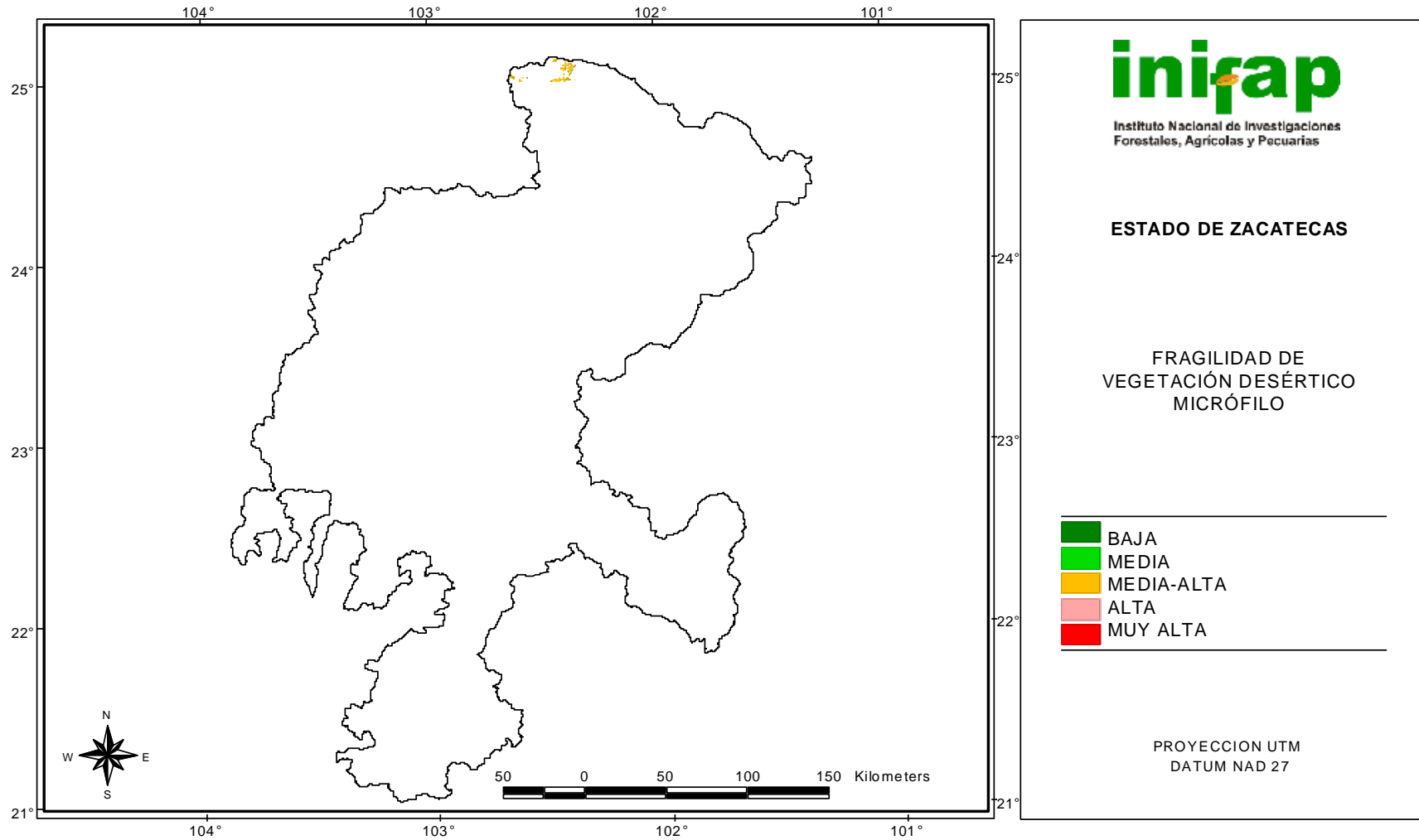


Figura 51. Fragilidad de la vegetación desértico micrófilo.

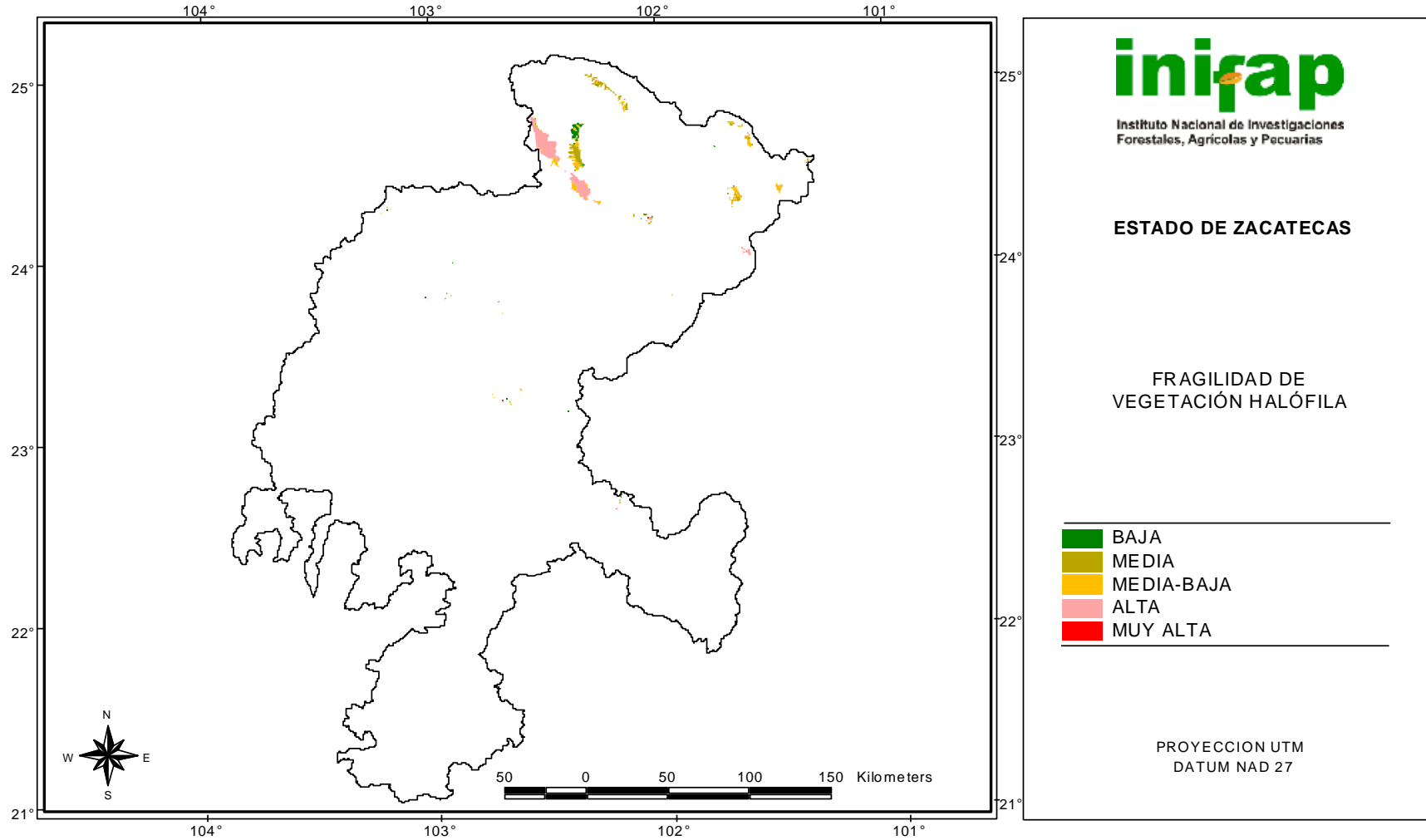


Figura 52. Fragilidad de vegetación halófila.

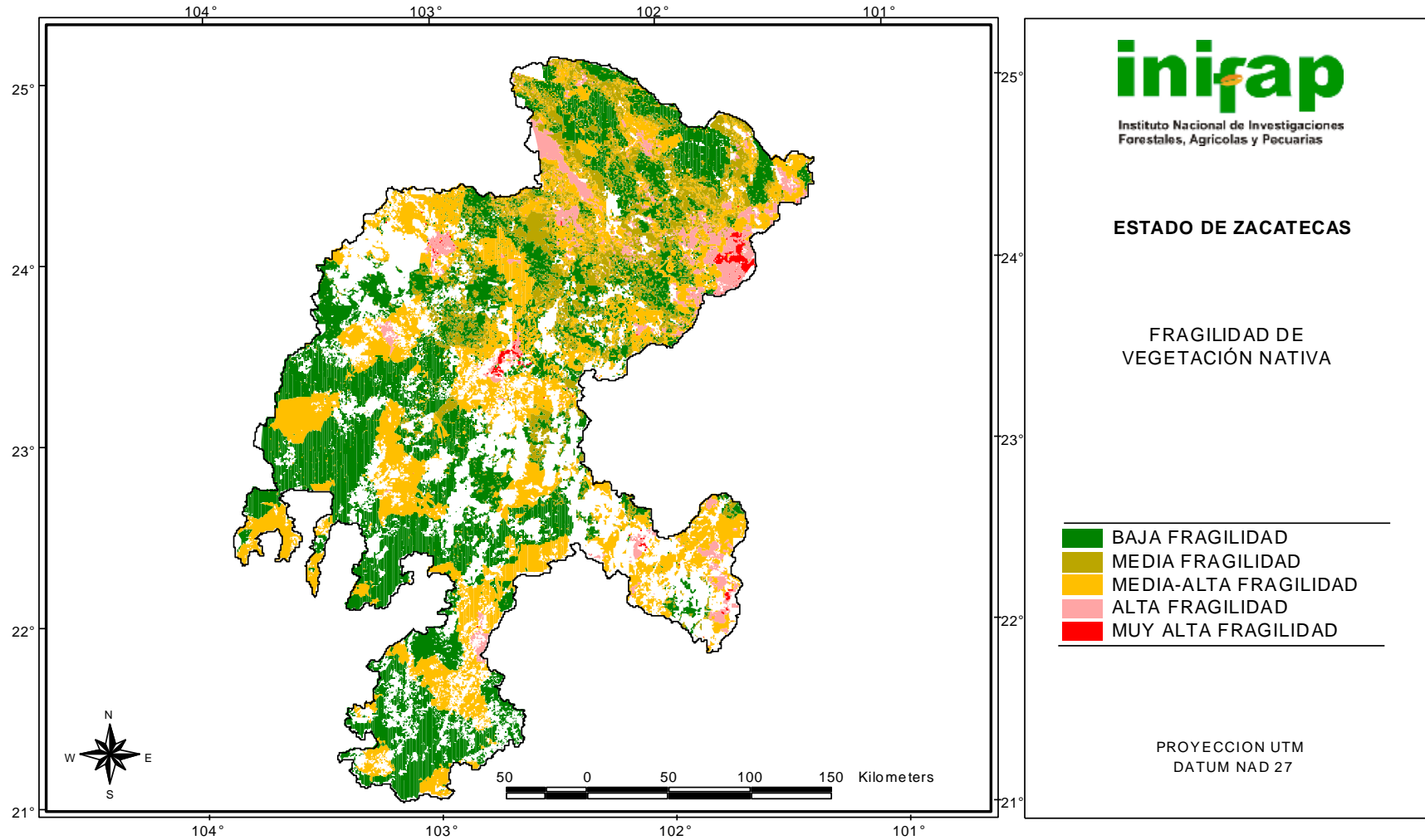


Figura 53. Fragilidad de vegetación nativa.

La fragilidad expresada por los diferentes tipos de vegetación nativa en el Estado, sin incluir las áreas dedicadas a la agricultura por considerarse que se encuentran perturbadas, indica que la mayor se encuentra en los matorrales secos y pastizales, los cuales están asociados con baja precipitación y recursos naturales limitados; muchas de estas comunidades, son particularmente vulnerables al cambio y a las perturbaciones. En el pasado éstos ecosistemas han sido los más afectados por las fuerzas acumulativas de la transformación global –deforestación, sobrepastoreo, desertificación– y es muy posible que sean las regiones más vulnerables en el futuro (Ezcurra, 2002).

Bosque

Las Figuras 34 a la 39 presentan al estado de fragilidad del bosque del estado de Zacatecas; en todos los casos se aprecia que va de baja a media alta, salvo en el norte del Estado donde la fragilidad del bosque de pino es alta por encontrarse en una región de baja precipitación. Su identificación y localización puede contribuir a desarrollar una mayor atención con la realización de prácticas que permitan su sostenibilidad.

Matorral

Las Figuras 40 a la 44 muestran el estado de fragilidad de los matorrales del estado de Zacatecas. Los matorrales desértico crasicaule (Figura 41), micrófilo (Figura 42) y rosetófilo (Figura 43) presentan fragilidades desde baja hasta muy alta. La clase muy alta se localizó en la región del extremo este del municipio de Mazapil y coincide en las tres clases de matorral identificadas en el Estado. Esa área es la que presenta las condiciones de mayor fragilidad. La clase alta se distribuye en la zona norte del Estado para el matorral micrófilo y en el sureste, en el municipio de Pinos, para el matorral crasicaule. Las razones de fragilidad se asocian principalmente a la falta de humedad en el suelo. En lo referente al Mezquital (Figura 44)

Pastizal

Las Figuras 45 a 48 hacen referencia al estado de fragilidad del pastizal en Zacatecas. Las clases de fragilidad más comunes van de la baja a la media alta; las de fragilidad media-alta se distribuyen en todo el Estado, y está asociada con sobrepastoreo y baja precipitación.

Selva

La Figura 49 y 50 muestra el estado de fragilidad en que se encuentra la selva baja caducifolia y el matorral subtropical; en ambos casos sobresalen las categorías de media-alta y están ubicadas en el extremo sur y suroeste del Estado, tanto en la región de los cañones y en el sur del municipio de Valparaíso. La otra categoría presente es la de baja fragilidad, la cual se ubica alrededor de las áreas de fragilidad media.

Fragilidad Natural

El mapa final de fragilidad natural (Figura 53) es el producto de la integración de los mapas temáticos de las comunidades vegetales más importantes en el estado de Zacatecas y producto final del diagnóstico para la vegetación nativa. Los estados de fragilidad mediana y alta son los que requieren algún tipo de intervención tecnológica; la propuesta incluye diversos niveles de intervención tecnológica, los cuales se presentan en el capítulo siguiente.

5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y ORDENAMIENTO ECÓLOGICO

5.1. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS NATURALES

Para determinar la disponibilidad de recursos como agua y suelo en las áreas agrícolas y pecuarias, se combinaron los siguientes productos: un mapa de degradación de suelo, donde se consideraron las clases de baja y media degradación como disponibles (Figura 5), un mapa de los acuíferos sobreexplotados, clasificando la disponibilidad de el agua subterránea de acuerdo con niveles de abatimiento de los estudios piezometricos (Figura 16) y un mapa de aguas superficiales (escurrimiento), donde se agruparon las de bajo y alto escurrimiento (Figura 11). La combinación de los temas mencionados, llevó a un mapa de disponibilidad de recursos para realizar labores agrícolas y pecuarias (Figuras 54 y 55).

5.1.1. Disponibilidad de recursos naturales en áreas de uso agrícola

Suelo disponible

La característica más sobresaliente en la Figura 54 es la disponibilidad de suelo de mediana degradación y sin riesgo de erosión severa, el cual representa 623, 926 ha; se localiza en el noreste del Estado, en los municipios de Sombrerete, Miguel Auza y Río grande; en el centro sur en los Municipios de Jerez y Villanueva; en el centro norte, en el municipio de Villa de Cos y en el este, en los Municipios de Villa Hidalgo y Pinos. Esta área de suelo disponible circunda a la parte central del Estado, donde se localiza el área de mayor explotación acuífera del Estado; esto produce una banda de explotación de agricultura de temporal, donde el recurso principal con que se cuenta es el suelo. Las acciones de intervención tecnológica para la sostenibilidad del recurso, deberán ir dirigidas hacia la recuperación y mantenimiento de

la fertilidad del suelo, la protección contra la erosión hídrica y eólica y labranza de conservación. La reconversión hacia cultivos de menor impacto degradante se presenta adelante.

Disponibilidad de agua de Escurrimiento y subterránea de bajo abatimiento

El agua de escurrimiento esta presente en 191,622 ha; puede ser utilizado para reducir el riesgo de erosión o para captación de agua, considerando que esta área no dispone del recurso suelo, porque se encuentra en una condición de degradación; por lo tanto ésta área pudiera enfocarse a la captación del recurso agua y su derivación hacia sitios de cultivo con mejor condición de suelo y a sitios de recarga del acuífero. Esta condición esta presente en los municipios de Fresnillo, Jerez, Genaro Codina, Cuauhtémoc, Pánfilo Natera, Villa García y Loreto (Figura 54). La otra característica es la disponibilidad de agua subterránea de bajo abatimiento (23,509 ha), pero no se debiera aprovechar el recurso hidráulico, a pesar de ubicarse en un área de menor abatimiento dado que no existe un recurso suelo favorable.

Disponibilidad de agua de escurrimiento y subterránea de medio abatimiento

La condición de disponibilidad de agua subterránea de abatimiento medio, sin que exista la disponibilidad de suelo, es una condición que debe ser considerada en el momento de decidir utilizar un recurso disponible, el cual es un recurso de alto costo económico y ecológico, como lo es el agua bombeada del subsuelo. En estos sitios deben ser consideradas opciones de uso pecuario. Esta categoría abarca 9,102 ha, localizadas en los municipios de Fresnillo, Villa de cos, Panuco y Guadalupe (Figura 54).

Disponibilidad de suelo y abatimiento bajo y medio de acuíferos

Esta condición de disponibilidad de suelo es el área donde debiera encontrarse la mayoría de los pozos que extraen agua del subsuelo, ya que cuentan con la ventaja de un menor abatimiento. Cultivos agrícolas fuera de esta área (157,923 ha) pueden tener baja rentabilidad y corren mayor riesgo de estar ubicados en áreas de suelos degradados. La

mayor superficie de bajo abatimiento se localiza en los municipios de Fresnillo, Enrique Estrada, Ojocaliente y al sur de Calera y de Guadalupe. El abatimiento medio se aprecia en los municipios de Villa de Cos, Fresnillo, Calera (norte) y Pánfilo Natera (Figura 54).

Disponibilidad de suelo y de agua de escurrimiento

Esta condición es exclusiva para uso agrícola de temporal, porque tiene la ventaja de poder aprovechar el agua de los escurrimientos. Ocupa 191,915 ha y se localiza alrededor de las áreas de mayor explotación de agua del subsuelo del Estado, principalmente en zonas de los municipios de Juan Aldama, Miguel Auza, Nieves, Río grande, Sombrerete, Saín Alto, Fresnillo, Valparaíso, Jerez, Villanueva, Momax, Joaquín Amaro, Atolinga, Santa María de la Paz, Teul de Gonzáles Ortega, Nochiztlan, Jalpa, Huanusco, Tabasco y Pinos (Figura 54).

Disponibilidad de suelo y de agua de escurrimiento y subterránea de bajo y medio abatimiento

Esta combinación tiene las ventajas de contar con suelo sin altos niveles de degradación, niveles moderados de abatimiento del acuífero y la posibilidad de aprovechar escurrimientos superficiales, mediante bordos y también cosecha de agua. Ocupa 42,101 ha y se localiza en el municipio de Fresnillo (centro), Genaro Codina (norte), Luis Moya, Ojocaliente y Guadalupe (norte). En cuanto al abatimiento medio, este se presenta en los municipios de Villa de Cos, Fresnillo (noroeste), Panuco y Guadalupe (noroeste) (Figura 54).

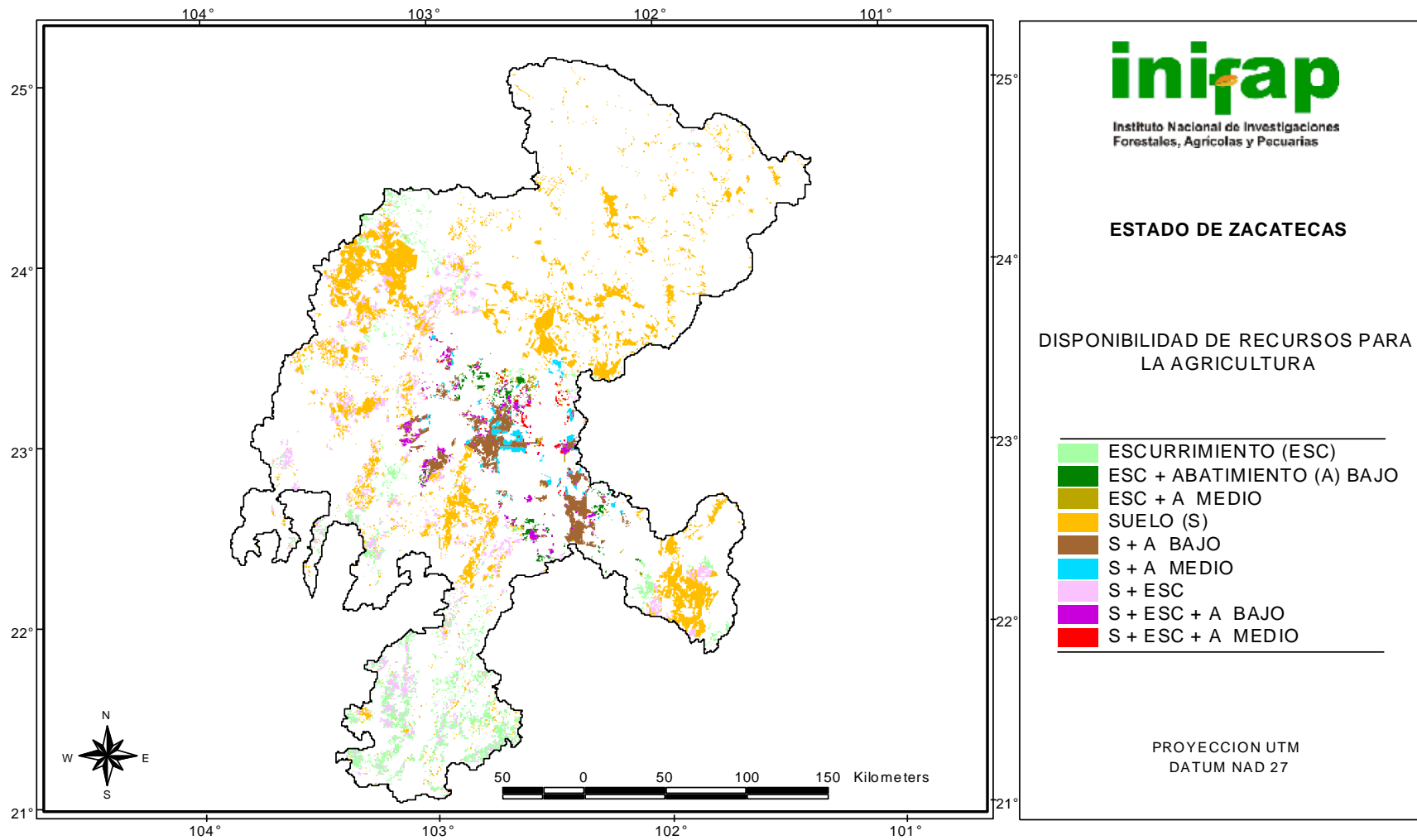


Figura 54. Mapa de disponibilidad de recursos naturales en áreas agrícolas.

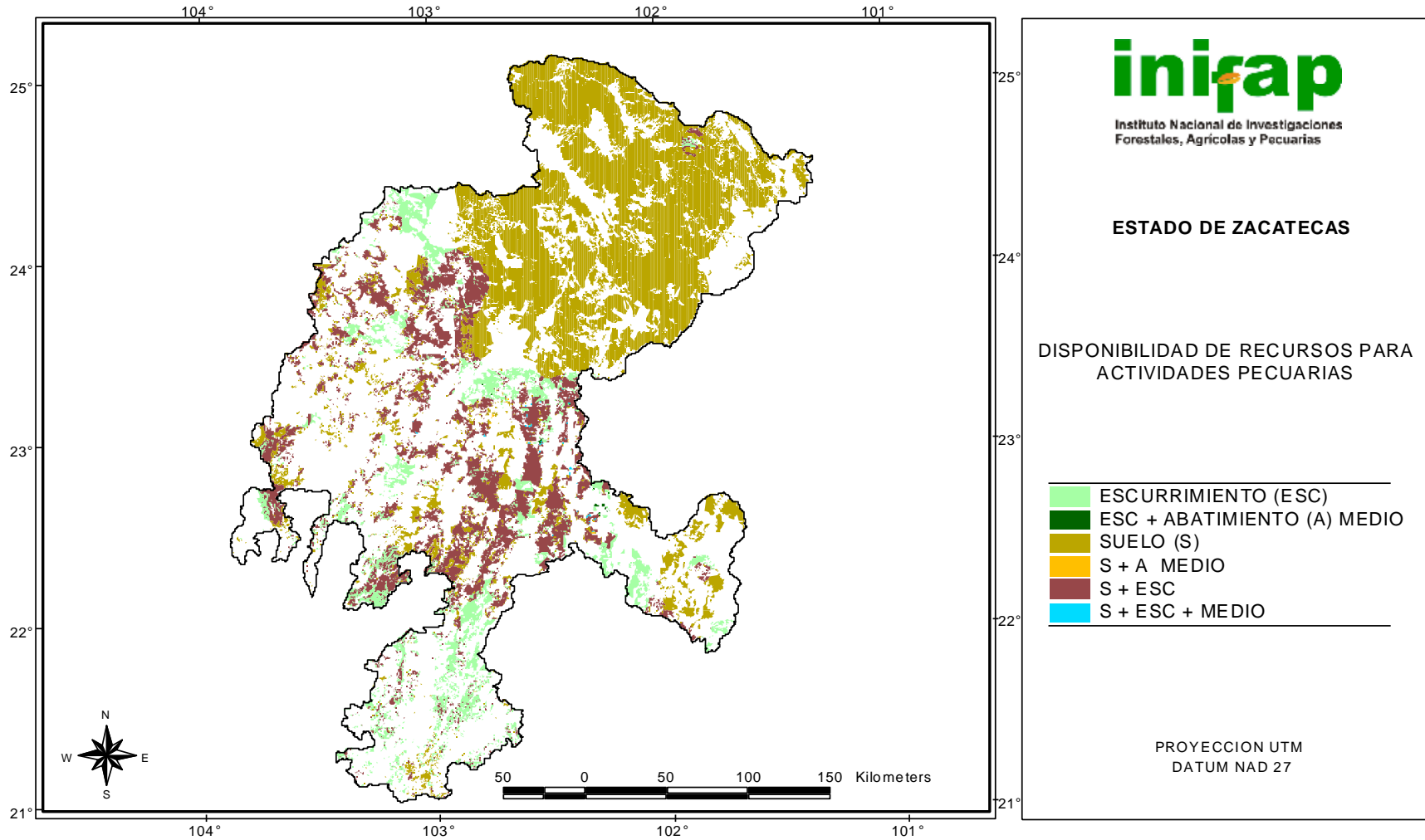


Figura 55. Mapa de disponibilidad de recursos naturales en áreas de agostadero.

5.1.2. Disponibilidad de recursos naturales en áreas de uso pecuario

Suelo disponible

La condición de menor deterioro del suelo es la más abundante en las áreas de uso pecuario, y representa una superficie de 2'078,950 ha. De acuerdo con la Figura 55, esta condición se localiza principalmente al norte del Estado, en casi la totalidad de los municipios de Mazapil, Melchor Ocampo, Concepción del Oro, El Salvador, Villa de Cos (sin la porción SE), Nieves (sin la porción W), Villa Gonzáles Ortega, Villa Hidalgo y la colindancia entre Río Grande y Cañitas; también existe en porciones de los municipios de Pinos, Guadalupe (Centro), la colindancia entre Morelos y Zacatecas, Villanueva, Tepetongo, Jerez, Susticacán, Monte Escobedo, Valparaíso, Jiménez del Teul Chalchihuites y Saín Alto.

De los seis tipos de degradación reconocidos por la FAO (FAO, 1980), tres son los que más afectan el territorio Zacatecano y son: la erosión hídrica y eólica; la degradación biológica y la degradación física; esta última provocada por el sobrepastoreo; estudios realizados en áreas de agostadero Zacatecano indican que hay efectos sobre la disminución de la porosidad del suelo, incremento de la compactación y de la densidad aparente (Echavarría *et al.*, 2007); por lo tanto, la intervención tecnológica para la sostenibilidad del recurso sin incrementar la degradación deberá enfocarse a la protección de la cobertura vegetal por la vía del control de la carga y el establecimiento de adecuados sistemas de pastoreo. Otras intervenciones tecnológicas deben ir dirigidas a la protección contra la erosión hídrica, que es la que más afecta las áreas de pastoreo; estas dependen de condiciones como topografía y niveles de degradación. También deberán considerarse el uso de obras hidráulicas de protección como las presas filtrantes y gaviones; su ubicación puede ser determinada con ayuda de mapas de riesgo de erosión potencial como el de la Figura 7 (Echavarría *et al.*, 2004). Otros tipos de intervención dirigidos a la recuperación de la cubierta vegetativa y reconversión, es decir, sitios agrícolas de baja aptitud que pudieran reconvertirse a tierras de pastoreo, se presentan en capítulos adelante.

Disponibilidad de agua de escurrimiento superficial

Esta condición se refiere la disponibilidad de condiciones topográficas que favorecen el escurrimiento como único atributo disponible. La superficie asociada a esta condición es de 446,988 ha y comprende los municipios de Miguel Auza, Juan Aldama, Nieves, la porción este del municipio de Fresnillo, el sur de Villa de Cos, Valparaíso (extremos sureste y suroeste), sur de Monte Escobedo, Tabasco, Huanusco, Jalpa, Apozol, Juchipila, Apulco y Teul de González Ortega (Figura 55). Esta condición de disponibilidad hace referencia a que existen sitios en el Estado dedicados a la explotación pecuaria, cuya aptitud no es la mejor para la explotación que se hace; esta pudiera usarse con fines de colecta y almacenamiento del recurso agua que puede usarse para proporcionarla a especies animales, así como para reducir el riesgo de erosión hídrica y la degradación del mismo, al reducir el escurrimiento superficial. Además, estas áreas pueden utilizarse como sitios de recarga de acuíferos, donde hay sitios de recarga (Figura 12).

Disponibilidad de suelo y de agua de escurrimiento superficial

Esta condición es más favorable que la anterior, ya que convergen dos atributos disponibles, el suelo y el escurrimiento. En este caso, la intervención tecnológica es dirigida a prácticas mecánicas de captación de humedad y de reducción del riesgo de erosión hídrica. La superficie en esta condición es de 785,862 ha, y se ubican en la parte central del Estado y una porción del sur.

Disponibilidad de suelo y de agua subterránea con abatimiento medio

En una pequeña porción del Estado (1964 ha) se presenta la coincidencia de disponibilidad de suelo sobre un acuífero con abatimiento medio. Se localiza en pequeñas porciones de los municipios de Noria de Ángeles, Ojocaliente y Fresnillo (Figura 55). Sin embargo, dado que a pesar de ser sitios considerados como de baja degradación del suelo, la posibilidad de cambio de uso del suelo no es viable, dadas sus características limitativas propias de suelos pecuarios y por

consiguiente la explotación del recurso hídrico no es una opción rentable, ya no existe la posibilidad de hacer uso agronómico del mismo. Sin embargo, la posibilidad de pozos de gasto pequeño, propulsados por viento y con fines de cubrir las necesidades de agua de especies animales, es una opción de intervención tecnológica.

Disponibilidad de agua de escurrimiento y subterránea con abatimiento medio

Al igual que la anterior, esta coincidencia de disponibilidad hace referencia a la posibilidad de captar escurrimientos que pueden ser utilizados en la recarga del acuífero. La superficie asociada a esta característica es de 2,085 ha y se localiza en pequeñas porciones de los municipios de Panuco, Villa de Cos y Pánfilo Natera (Figura 55).

Disponibilidad de suelo, agua de escurrimiento y abatimiento medio

Esta combinación de atributos disponibles ocupa una superficie de 3,970 ha ubicados en los municipios de Ojocaliente, parte norte de Guadalupe, Panuco, al sureste de Villa de Cos, Fresnillo y Enrique Estrada.

5.2. DETERIORO DE LOS RECURSOS NATURALES

Para determinar el deterioro de los recursos como agua y suelo en las áreas agrícolas y pecuarias, se combinaron los mismos productos con los que se construyó el mapa de disponibilidad de recursos, pero al mezclarse, se utilizaron las clases no incluidas en el mapa de disponibilidad; un mapa de degradación de suelo, donde se considero únicamente la clase de alta degradación como deteriorada (Figura 5), un mapa de aguas subterráneas, en el cual se consideraron los acuíferos sobreexplotados, considerando únicamente la clase de alto abatimiento (Figura 16) y un mapa de aguas superficiales, donde se incluyó la clase de alto escurrimiento (Figura 11); la combinación de ellos, llevó a un mapa de deterioro de recursos que impiden realizar labores agrícolas y pecuarias (Figuras 56 y 57).

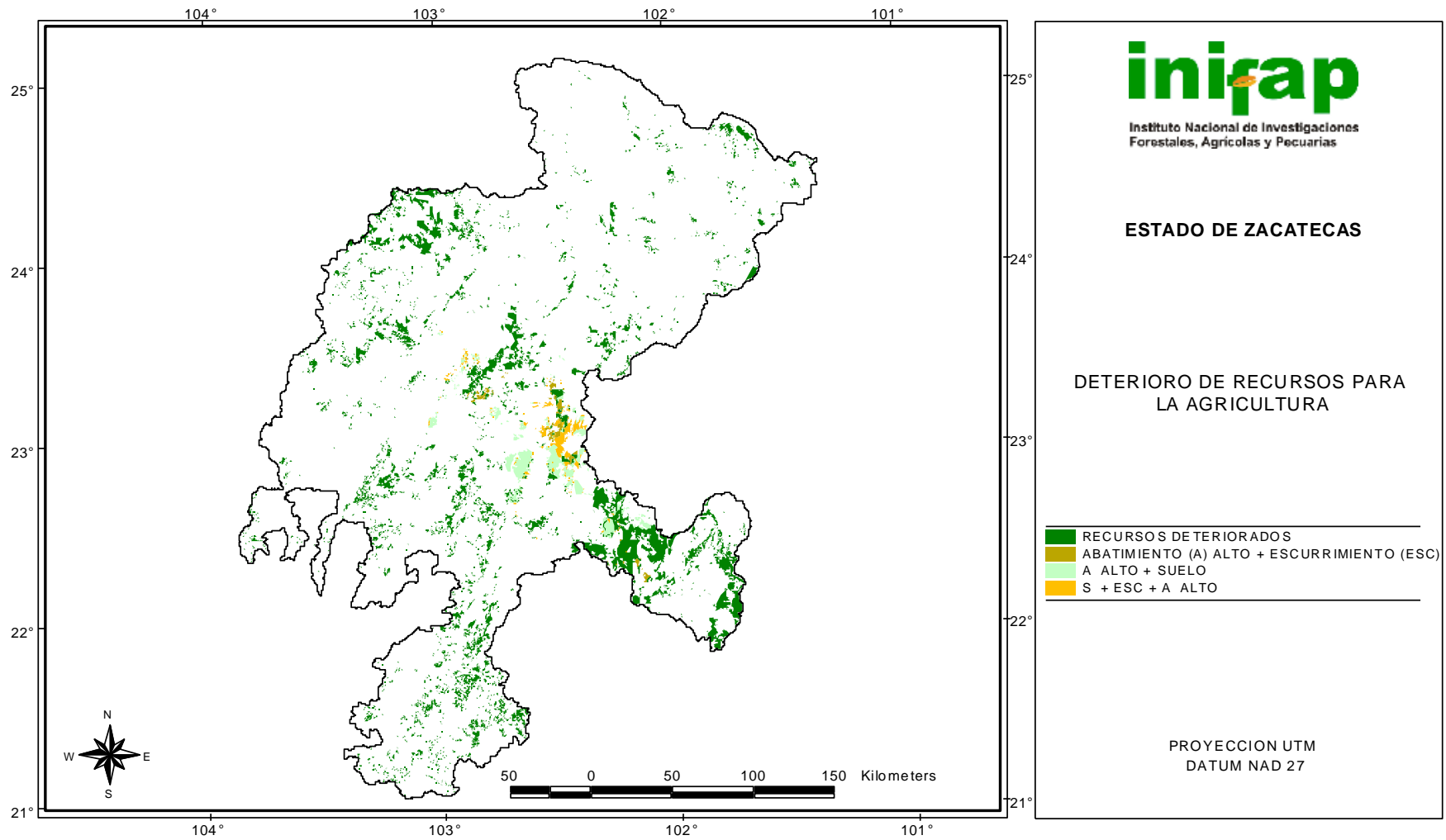


Figura 56. Mapa de deterioro de recursos naturales de las áreas agrícolas.

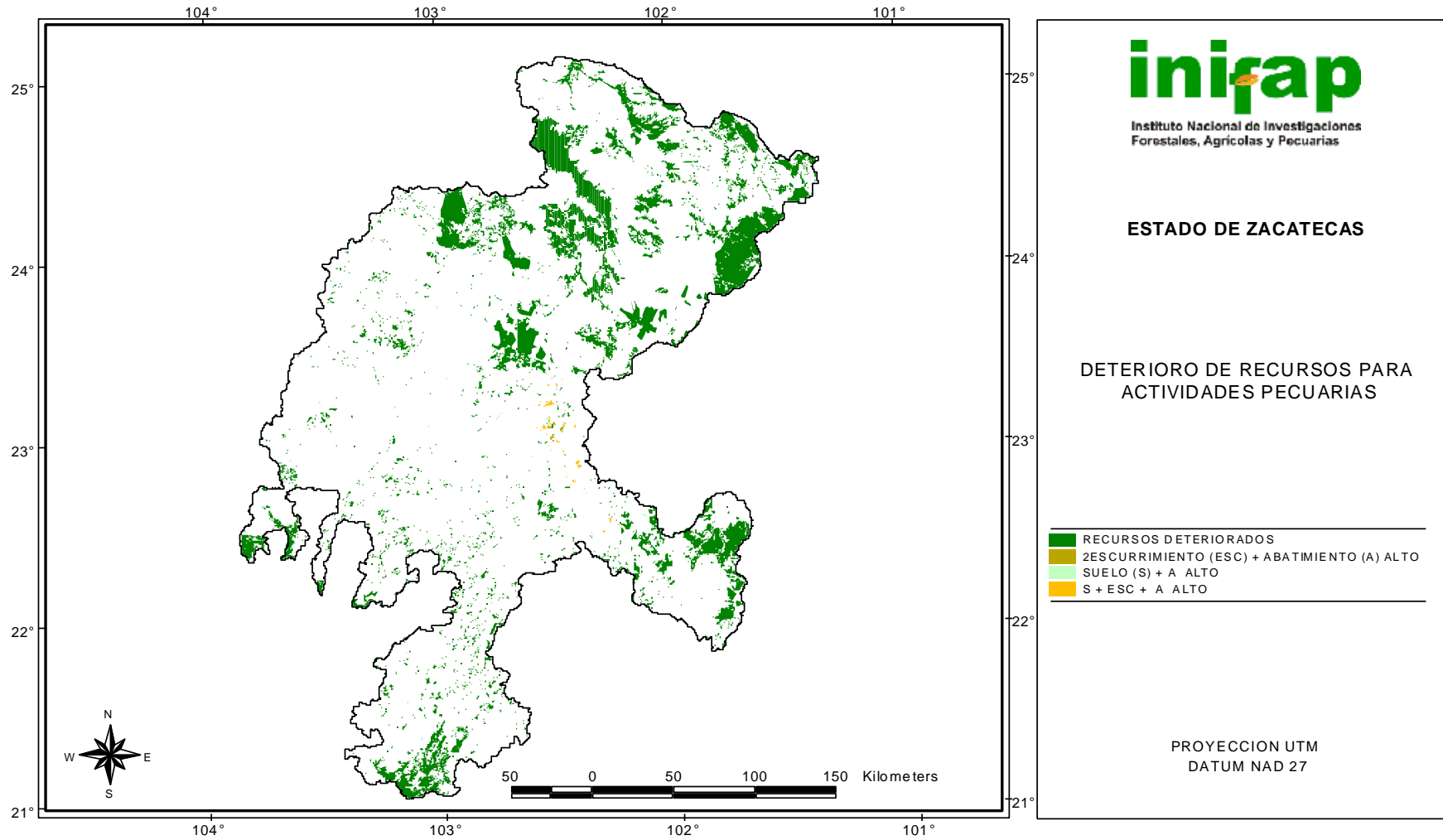


Figura 57. Mapa de deterioro de recursos naturales de las áreas de agostadero.

5.2.1. Deterioro de los recursos naturales en áreas agrícolas

Recursos deteriorados

La Figura 56 presenta las áreas de uso agrícola que se encuentra en condiciones de alto deterioro. La superficie abierta al cultivo y que presenta algún nivel de deterioro es de 553,411 ha. Las áreas deterioradas corresponden principalmente a las dedicadas a la agricultura de temporal, se localizan en todos los municipios del Estado; se asocian con efectos graduales de erosión hídrica que han disminuido su capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, disminución de la fertilidad y en el contenido de materia orgánica. Como se ha mencionado, es la erosión hídrica y eólica y la degradación biológica son las que más afectan la capacidad productiva del recurso suelo.

La intervención tecnológica para la recuperación y mejoramiento de la capacidad productiva esta enfocada a prácticas mecánicas que permitan la captación y mantenimiento de la humedad, como la incorporación de residuos de cosecha y el cambio de patrón de cultivos hacia aquellos que mejoran la protección del suelo. Las opciones de reconversión de cultivos se mencionan en el capítulo siguiente.

Áreas agrícolas de riego con abatimiento alto del acuífero con escurrimiento

Las áreas agrícolas de riego que presentan abatimiento alto del acuífero pudieran dejar de ser rentables y la reconversión productiva es una opción que deberá ser considerada. Las opciones para la reconversión dependerán de las características que presente cada área. Este grupo solo dispone de escurrimiento como una opción que pudiera ser utilizada. La superficie bajo esta condición es de 18,355 ha, y se ubica en los municipios de Villa de Cos (sur), Panuco (norte), Guadalupe (norte), Fresnillo (centro), Loreto, Noria de Ángeles y Pánfilo Natera.

Áreas agrícolas de riego con abatimiento alto del acuífero con suelo no deteriorado

Se trata de una combinación de un aspecto de deterioro, como lo es el alto abatimiento de los pozos profundos, con la disponibilidad de suelo no deteriorado. La reconversión puede ser una opción, aunque se cuenta con suelo no deteriorado, pero se ampliarán las opciones tecnológicas a emplear. La superficie es de 72, 985 ha, y se ubican principalmente en los municipios de Calera, Morelos, Panuco, Veta grande, Zacatecas, Guadalupe, Trancoso, Ojocaliente, Pánfilo Natera, Fresnillo, Villa de Cos y Villa Gonzáles Ortega.

Áreas agrícolas de riego con abatimiento alto del acuífero con escurrimiento y suelo no deteriorado

La combinación de estas características se ubica principalmente en los municipios de Villa de Cos (sur), Panuco, Morelos, Veta grande, Guadalupe y Trancoso, las que representan 28,820 ha.

5.2.2. Deterioro de los recursos naturales en áreas de uso pecuario

Recursos deteriorados

En la Figura 57 se presentan las áreas de uso pecuario que se encuentran en condiciones de alto deterioro; la superficie en esta condición es de 994,357 ha. El deterioro se refiere a disminución de la capacidad productiva por efecto de erosión hídrica, consecuencia del sobrepastoreo. La intervención tecnológica debe enfocarse al establecimiento de sistemas adecuados de pastoreo y control de la carga animal, así como el establecimiento de obras hidráulicas y revegetación, lo cual se mencionará adelante.

Áreas de uso pecuario con abatimiento alto, escurrimiento y suelo disponible

Las áreas de uso pecuario ubicadas en zonas de riego con un abatimiento alto del manto freático, no presentan ninguna ventaja para la productividad pecuaria dada la profundidad de los niveles piezométricos. Tampoco tiene ventajas la combinación de suelo disponible y escurrimiento dentro de la zona de alto abatimiento de riego, la que ocupa 8507 ha.

5.3. FRAGILIDAD NATURAL DE LOS RECURSOS NATURALES

Las Figuras 34 a la 39 representan el estado actual de las comunidades vegetales de la formación boscosa del estado de Zacatecas, de la Figura 40 a la 44, presentan las comunidades de la formación matorral de la 45 a la 48 el estado de fragilidad de las comunidades vegetales de la formación pastizal de la 49 a la 50 el estado de las comunidades de selva y de la 51 a la 53 las comunidades vegetales ubicadas en la formación de otras coberturas. Aunque todas las comunidades incluidas en el estudio se consideraron con nulo o bajo nivel de disturbio, en realidad todas son afectadas por diversos factores de disturbio que conducen al recurso a un estado de fragilidad, que es lo que se muestra en las Figuras. Para determinar la posible intervención tecnológica que pueda ayudar a reducir la fragilidad de las comunidades vegetales, se mencionan solo algunos factores físicos como la sequía y antrópicos, como son la tala inmoderada y la recolección de especies vegetales, los incendios y el pastoreo en las comunidades vegetales. Las especies animales de pastoreo mas abundantes son los bovinos (945,872), caprinos (586,963) y ovinos (396,242) (SAGARPA, 2007). Este último factor de disturbio el que más afecta en el Estado. Se han reportado capacidades de carga en 2007 con variaciones trimestrales desde 7.7 hasta 64.3 UA ha⁻¹ año⁻¹ en el trimestre de abril a junio (Gutiérrez *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c), el cual es el más afectado por la sequía, de 7.7 a 15.7 UA ha⁻¹ año⁻¹ en el trimestre de julio a septiembre, en el cual se presentan las lluvias y con ello la recuperación de la vegetación nativa y en el trimestre de octubre a diciembre la carga animal de 6.4 a 14.8 UA ha⁻¹ año⁻¹, siendo esta la etapa más productiva del año y la de mayor abundancia relativa de forraje en los agostaderos. La distribución espacial también es variable a lo largo del Estado; los valores más bajos de

materia seca corresponden a los municipios de Pánfilo Natera, Guadalupe, Sombrerete y Noria de Ángeles; los municipios de Nieves, Zacatecas y Fresnillo presentan los valores más altos a través del año. Dado que los valores de capacidad de carga varían durante el año y por regiones, un valor promedio de $12 \text{ ha UA}^{-1} \text{ año}^{-1}$ pudiera ser razonable para representar al Estado. El inventario animal de 2007 representa aproximadamente 1'044,192 UA, lo que para simplificar los cálculos pudiera reducirse a un millón de UA, lo que implica la necesidad de contar con 12 millones de ha (usando el promedio ya mencionado); si se considera que 5 millones de ha pudieran ser susceptibles de pastoreo en el Estado, se tiene una sobrecarga o sobrepastoreo de 140% , el cual explica la mayor parte del disturbio que produce los niveles de fragilidad observados en las Figuras de fragilidad ya mencionadas. Las actividades de intervención tecnológica se describen en el apartado siguiente; entre ellas se incluye la reconversión productiva.

5.4. RECONVERSIÓN PRODUCTIVA COMO ESTRATEGIA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO

En México, a principios de los años 70, diversas políticas gubernamentales estimularon el incremento de la producción agrícola por la vía del incremento de la superficie laborable. Como consecuencia, se abrieron al cultivo suelos de baja aptitud productiva, los cuales no alcanzaron el nivel mínimo de recursos necesarios para considerarse aptos para el uso agrícola (Echavarría *et al.*, 2009a).

En la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (2001), en el capítulo sobre reconversión productiva Artículo 53, la reconversión se interpreta como la incorporación de cambios tecnológicos y de procesos que contribuyan a la productividad y competitividad del sector agropecuario, a la seguridad y soberanía alimentarias y al óptimo uso de las tierras mediante apoyos e inversiones complementarias. Asimismo, en dicha ley, aunque no se menciona el término de reconversión, se hace referencia a conceptos como cambio del uso del suelo en terreno forestal, restauración forestal, terreno preferentemente forestal y conservación forestal. De lo anterior, se infiere que el objetivo de la reconversión

productiva es promover el establecimiento de las actividades de producción agropecuaria y forestal en áreas de buen potencial productivo y aptitud productiva, que sean competitivas y promuevan la sustentabilidad (Echavarría *et al.*, 2009a).

De acuerdo con las leyes vigentes que regulan el uso de los recursos naturales en nuestro país. Los términos identificados y que están relacionados con la reconversión son: cambios tecnológicos, conversión de cultivos, reconversión productiva y recuperación de zonas degradadas. En ellos se aprecia un gradiente de acciones tecnológicas que van desde la más elemental adopción de un componente tecnológico, hasta gradualmente, llegar al punto extremo que es la recuperación de áreas degradadas.

Con respecto a lo anterior, vale la pena revisar las definiciones de degradación y desertificación, ya que están asociadas. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo en su glosario (1997) define la degradación como: “el proceso a través del cual un compuesto es transformado en componentes más simples”. La desertificación fue definida en 1992 por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación como: “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas” (UNCED; 1992). Tomando en cuenta lo anterior, la reconversión es pues una opción que intenta reducir la degradación y por ende la desertificación de la tierra.

Para conciliar lo anterior en una sola definición de reconversión productiva, es necesario considerar criterios agronómicos, como por ejemplo, el cambio de las especies vegetales actuales por especies nativas o cultivos alternativos que sean más aptos para sobrevivir y producir en las áreas susceptibles de reconversión. En este caso, se espera que las alternativas propuestas produzcan un menor deterioro de los recursos naturales (pérdida de suelo, agua y nutrientes). En términos económicos, la actividad productiva por la que se realiza el cambio deberá generar una mayor rentabilidad que la actual, considerando que las mejoras se pueden presentar en el mediano o largo plazo (tres o más

años). Además, el sistema propuesto deberá ser regenerable a través de un manejo integral, sin aportaciones energéticas.

De esta manera, la reconversión productiva se podría definir como **“el cambio de la actividad o del sistema de producción buscando aprovechar la aptitud potencial del área o sitio con un uso óptimo del suelo y reduciendo la siniestralidad”**. En las áreas degradadas de Zacatecas, el tipo de actividades asociadas a este concepto podrían ser, por ejemplo: la sustitución de cultivos agrícolas de baja productividad por pastos o matorrales mejor adaptados a la región para producir carne de ovino y caprino, así como la plantación de nopaleras en áreas agrícolas con problemas de sequía recurrente.

La definición anterior hace referencia exclusivamente a los elementos del subsistema natural (suelo, agua, vegetación) y no incluye los subsistemas social y productivo. La toma de decisiones respecto a la reconversión de cultivos se reduce solo a aspectos de sustentabilidad ecológica, sin poder incluir la importancia socioeconómica y productiva que conlleva un proceso de reconversión.

Al restringir la propuesta al ámbito natural, sólo presenta una visión parcial de la solución, por lo que cualquier intención de realizar su implementación deberá estar asociada a los aspectos socioeconómico y productivo. En este caso, **las acciones de intervención tecnológica incluyen un componente tecnológico enfocado a la reducción de la degradación de los recursos naturales, en particular a reducir los tipos de degradación que más afectan al Estado (erosión hídrica, eólica, degradación biológica y degradación física) y estas se asocian con sitios claramente identificados y delimitados geográficamente.**

Esto último, es una condición ***para que las acciones de reconversión sean consideradas una estrategia guiada por estudios de diagnóstico que forman parte del ordenamiento ecológico; estas deberán, estar ligadas a un espacio determinado, es decir, son acciones específicas que conllevan la precisión de las coordenadas geográficas y por tanto dirigidas a sitios específicos.*** Las acciones de ordenamiento coinciden con las finalidades de la reconversión productiva, con la diferencia que se basaron en un diagnóstico y son específicas para un territorio determinado por coordenadas geográficas.

Cultivos de importancia productiva

La determinación de los cultivos de importancia productiva en el estado de Zacatecas y el nivel de sustentabilidad que se les puede atribuir, se obtuvo de un estudio realizado para el Estado de Zacatecas sobre cadenas agroalimentarias (Rincón *et al.*, 2004) en el cual se utilizaron los siguientes criterios:

1. Niveles de erosión hídrica producidos por los cultivos
2. Eficiencia en el uso del agua
3. Niveles de contaminación asociados al manejo del cultivo

Para valorar el primer criterio, se utilizó el modelo de predicción basado en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) (Wischmeier y Smith, 1978). El valor medio estimado por cultivo se utilizó como representativo para el cálculo. Para desestimular a cultivos que producen niveles de erosión altos, los valores estimados se dividieron respecto a un valor mínimo de erosión (50 kg/ha/año), con lo que se dio mayor peso a los cultivos que producen una menor erosión.

Para determinar el uso eficiente del agua, se utilizó información de valores de uso consuntivo estimados en investigaciones del INIFAP.

Para estimar los niveles de contaminación se usó el consumo de nitrógeno como indicador. Para ellos se utilizaron los valores recomendados como referencia del uso de fertilizante nitrogenado. Los valores reales utilizados y su ponderación se presentan en el Cuadro 12. La jerarquización se obtuvo mediante la combinación de los tres criterios generales usados. Los cultivos que producen mayor estabilidad en cuanto a menor erosión, menor consumo de agua y menor contaminación son el pino-encino, el nopal, el orégano, el pastizal y el agave. En sexto lugar aparecen dos cereales (avena-cebada), los cuales pueden ser mejor opción que el frijol que aparece en séptimo lugar, el cual muestra valores altos de erosión, pero consume menos agua y utiliza menos fertilizante que otros cultivos anuales. De aquí se desprende, que si se trata de elegir opciones para la reconversión, las especies del bosque y el matorral son las que menos afectan el ambiente. De acuerdo con el orden en que se presentaron los resultados del Cuadro 12, se hacen algunas proyecciones de la erosión que se pudiera presentar al hacer un cambio.

5.4.1. Áreas agrícolas

Temporal

De acuerdo con la definición que se presentó líneas arriba, en la reconversión productiva se deben considerar criterios agronómicos y económicos, como por ejemplo, el cambio de las especies vegetales actuales por especies nativas, inducidas y cultivos alternativos que sean más aptos para sobrevivir y producir en las áreas susceptibles de reconversión; las alternativas propuestas deben ayudar a reducir el deterioro de los recursos naturales. En términos económicos, la actividad productiva por la que se realiza el cambio deberá mejorar la rentabilidad actual, aunque las mejoras se pueden presentar en el mediano o largo plazo (tres años o mas), auto-regenerable y con ahorro energético.

En el Cuadro 12 se puede observar que el cultivo del frijol genera un valor medio de erosión del suelo de 14.7 ton/ha (Figura 58). Si se hiciera la sustitución por cereales sembrados al voleo, los valores disminuirían a 7.0 ton/ha (Figura 59); si el cambio se hiciera a la práctica mecánica de “pileteo”, la cual es un pequeño bordo transversal a los surcos que favorece el almacenamiento de agua, el promedio de erosión sería de 7.33 ton/ha (Figura 60).

Cuadro 12. Indicadores de sustentabilidad de los cultivos más importantes en el estado de Zacatecas.

	CRITERIOS PARA LA RECONVERSIÓN			JERARQUIZACIÓN
	EROSIÓN DE SUELO (ton/ha)	EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (mm)	USO DE FERTILIZANTES (Kg N)	
Ponderación	50%	40%	10%	
CULTIVOS				
Pino-Encino	0.64	500	0	1
Nopal	3.37	250	20	2
Orégano	5.49	200	0	3
Pastizal	2.95	350	0	4
Agave	7.96	300	20	5
Avena	7.07	570	120	6
Cebada	7.07	570	120	6
Frijol	14.72	490	60	7
Cebolla	5.31	800	200	8
Ajo	5.31	1000	230	9
Papa	6.83	735	200	10
Chile seco	7.43	730	200	11
Maíz	15.52	707	150	12
Durazno	12.46	1100	60	13
Manzana	13.11	1100	60	14
Vid	11.80	929	150	15
Guayaba	13.77	1150	60	16

 Fuente: Rincón *et al.*, 2004.

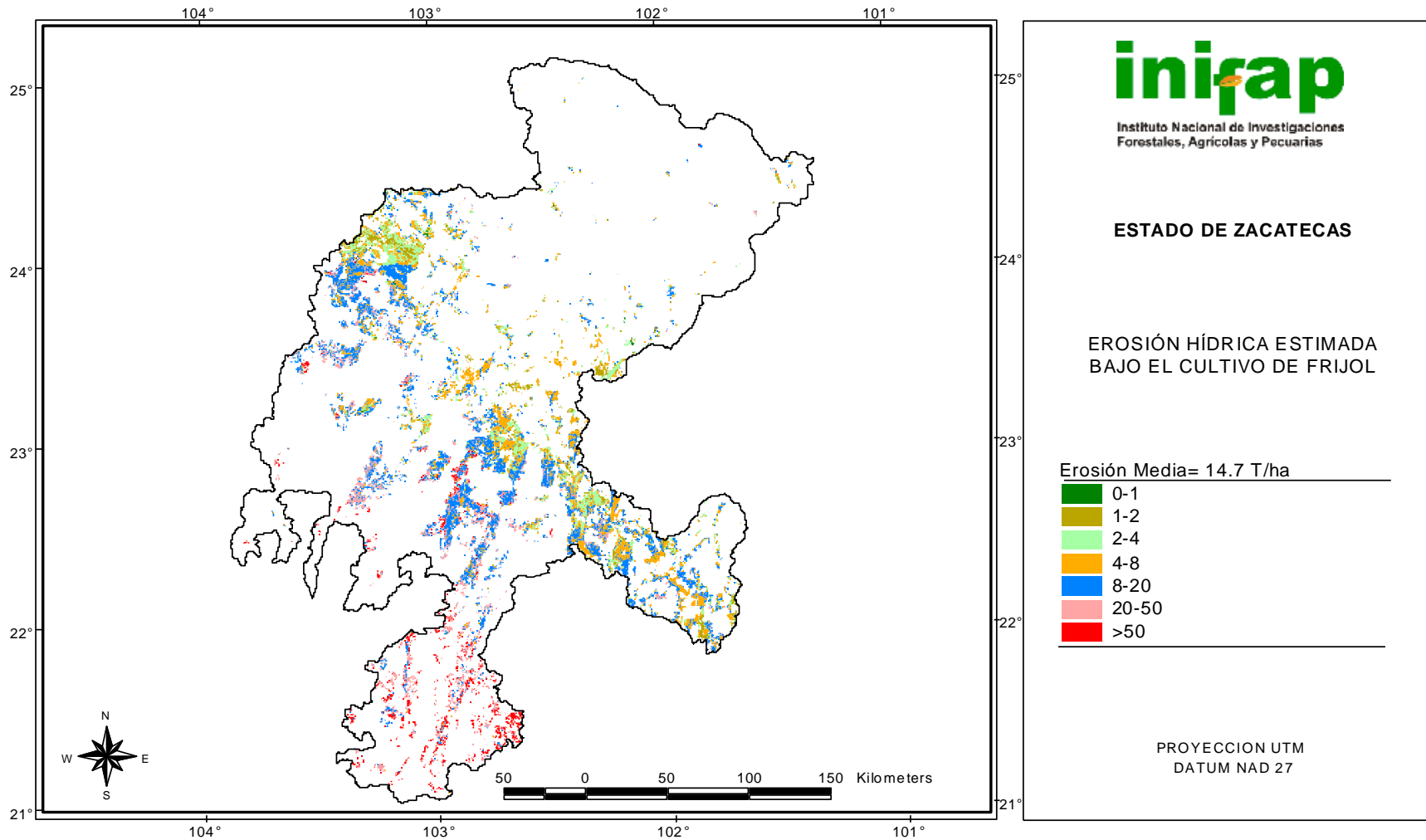


Figura 58. Erosión hídrica estimada producida por el cultivo del frijol.

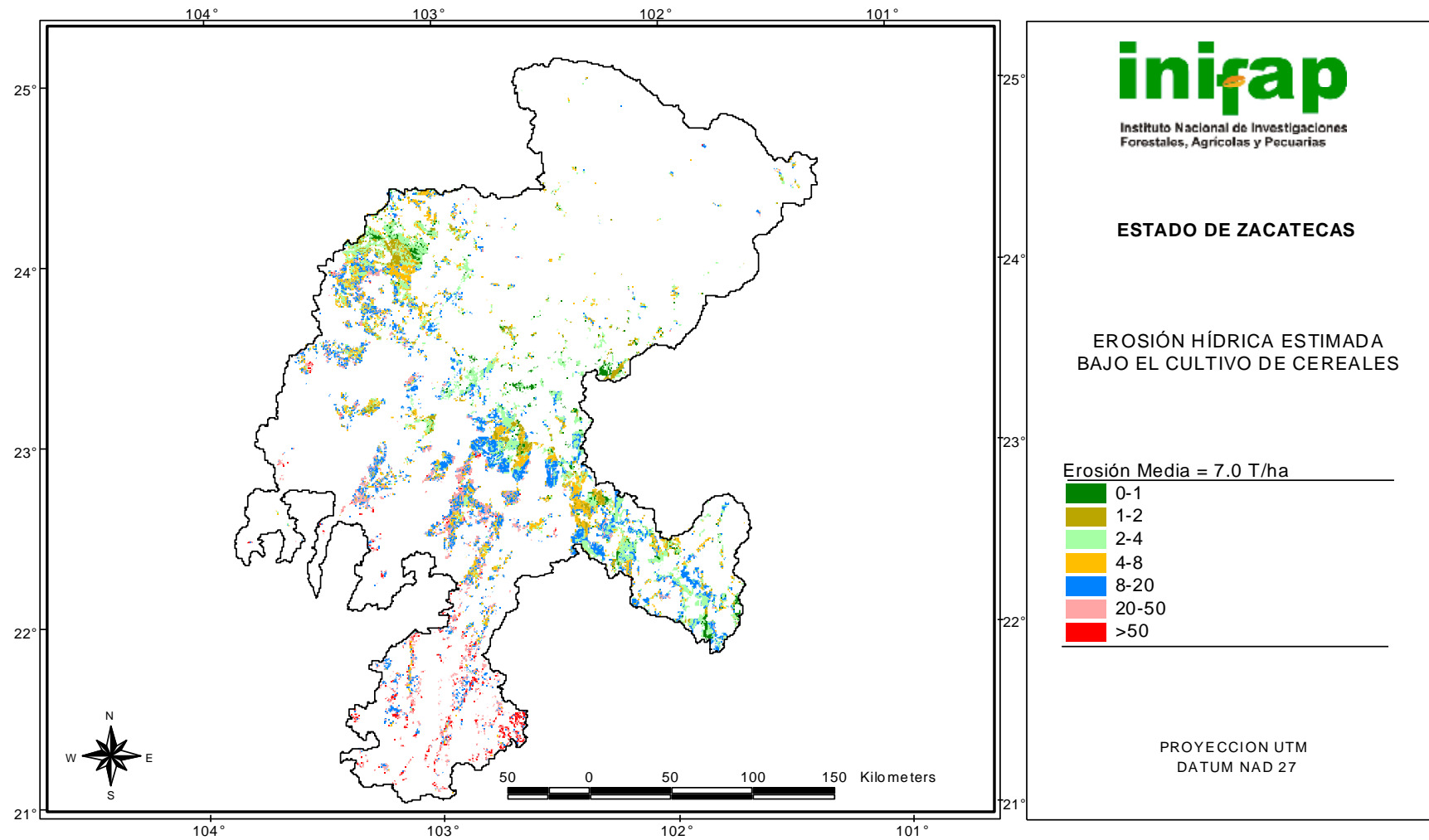


Figura 59. Erosión hídrica estimada producida por cereales.

Respecto a la pregunta sobre el lugar específico donde se debería realizar un cambio, uno de ellos pudiera ser la reconversión del cultivo de frijol al de avena, en aquellos sitios con la categoría de “suelo disponible”, la que representa 623, 926 ha. Sin embargo, la clase “suelo disponible con escurrimiento” es de 785,862 ha y es la más apropiada para la realización de prácticas mecánicas como el pileteo, con la que se conserva humedad y se reduce la erosión. Otras prácticas que pudieran implementarse son el uso de curvas a nivel (erosión promedio 8.8 ton/ha, Figura 60), franjas en contorno, etc. La reconversión productiva, como es el cambio del cultivo de frijol por cereales, pudiera realizarse tanto en áreas de “suelo disponible”, como en las de “suelo disponible con escurrimiento”.

Una opción adicional para la reconversión de áreas deterioradas es la producción de forrajes basada en la combinación de cultivos, el uso de franjas en contorno y “muros vivos”, en los que se incluyen especies anuales forrajeras (maíz, cereales, canola, etc), matorrales (*Atriplex canescens*, *Dalea bicolor*), nopal forrajero y pastos (*Bouteloua curtipendula*, *Bouteloua gracilis*). La intención sería incrementar la productividad forrajera y asociar el uso de forrajes a pequeños rumiantes que puedan aprovechar el forraje de los cultivos anuales (Echavarría *et al.*, 2009b).

Riego

En este aspecto es importante considerar el nivel de explotación en que se encuentran los acuíferos que sostienen las zonas de riego (Figura 16); en función de su disponibilidad y nivel de deterioro (Figuras 54 y 56). La reconversión deberá contribuir a incrementar la eficiencia en el uso del agua, lo cual se puede lograr con el cambio de cultivos hacia forrajes, establecimiento de sistemas de riego presurizados, riego suplementario complementado con lluvias y restricción del uso en los acuíferos sobreexplotados. También debiera promoverse la ubicación de sitios de recarga. En la Figura 54 se presentan áreas de bajo y medio abatimiento del acuífero, donde existen condiciones favorables para la explotación; es decir, donde coinciden el recurso suelo como disponible y niveles de abatimiento bajo y medio. Esta categoría, con una superficie de 157,923 ha, se localiza en los municipios de Fresnillo, Enrique Estrada y la porción sur de Calera,

Ojocaliente y porción sur de Guadalupe. El abatimiento medio se encuentra en los municipios de Villa de Cos, Fresnillo, Calera (norte) y Pánfilo Natera. Otra posibilidad es la combinación anterior con la característica de escurrimiento superficial, la cual es una ventaja que puede ayudar a reducir la extracciones del subsuelo.

Los cultivos de riego de ajo y cebolla son de menor consumo de agua y de baja erosión (Cuadro 12); sin embargo se cultivan en el ciclo de invierno. En verano, los mejores cultivos son la papa, el chile y el maíz aún sobre los cultivos perennes como vid, manzana y guayaba. Los cambios de cultivo en las áreas de riego apuntan hacia la producción forrajes, como una opción para aumentar la eficiencia en el uso del agua y reducir el deterioro de los agostaderos al reducir el sobrepastoreo.

5.4.2. Áreas pecuarias

Agostadero

En el Cuadro 12, se presenta el cultivo de pastizal y se hace referencia al agostadero bajo un sistema de pastoreo continuo, el cual produce valores de erosión media de 2.9 ton/ha (Figura 61); si este sistema se sustituyera por uno de pastoreo rotacional, los valores de erosión media disminuirían a solo 0.7 ton/ha (Figura 62). Como se mencionó en la sección de fragilidad natural, uno de los más importantes factores de disturbio de degradación de los agostaderos es el sobrepastoreo (Echavarría *et al.*,2007); la intervención tecnológica que se debiera realizar es el establecimiento de un adecuado sistema de pastoreo, como lo sugieren las diferencias de valores medios de erosión hídrica mostradas entre las Figuras 61 y 62. La ubicación específica para realizar dicha intervención tecnológica deberá ser dirigida hacia los sitios de cualquier categoría del mapa de disponibilidad pecuaria (Figura 55) y del de deterioro pecuario (Figura 57).

En lo que se refiere a la intervención tecnológica dirigida a la revegetación, algunos ejemplos se presentan en las Figuras 63 al 65. El nopal silvestre con una cubierta baja (10%), produce valores de erosión de 3.76 ton/ha (Figura 63), pero si se

aumenta la densidad de plantas para tener una cubierta de 30%, los valores de erosión disminuyen a 2.33 ton/ha (Figura 64). Una cubierta muy alta de nopalera nativa produce valores medios de solo 0.028 ton/ha (Figura 65). Estos ejemplos muestran el impacto de un proceso de reconversión en las áreas de agostadero. Sin embargo, las prácticas de revegetación deberán ser enfocadas hacia sitios de alta degradación y mayor fragilidad. El establecimiento de matorrales como la costilla de vaca (*Atriplex canescens*) en bordos al contorno, puede producir una erosión hídrica promedio de 4.6 ton/ha (Figura 66), la cual está por encima de la media con el pastoreo continuo. El mismo matorral (costilla de vaca), asociado a nopal rastrero usado como barrera viva para la colecta de humedad, puede reducir la erosión a un valor medio de 3.0 ton/ha (Figura 67), el cual es apenas semejante al que presenta la erosión promedio bajo pastoreo continuo.

5.4.3. Áreas forestales

Los menores valores de erosión, mayor eficiencia en el uso de agua y menor contaminación se presentan en los bosques. Las áreas de pino-encino generan una erosión media de solo 0.63 ton/ha (Figura 68), lo que los hace más estables. Sin embargo, la resistencia y resiliencia de estos ecosistemas puede ser impactada hasta generar sitios con una menor fragilidad. Las Figuras del 34 al 52, muestran los sitios de mayor fragilidad dentro de cada grupo homogéneo de vegetación reportada aquí. El manejo sustentable del mismo deberá ser diferente en función de la fragilidad mostrada.

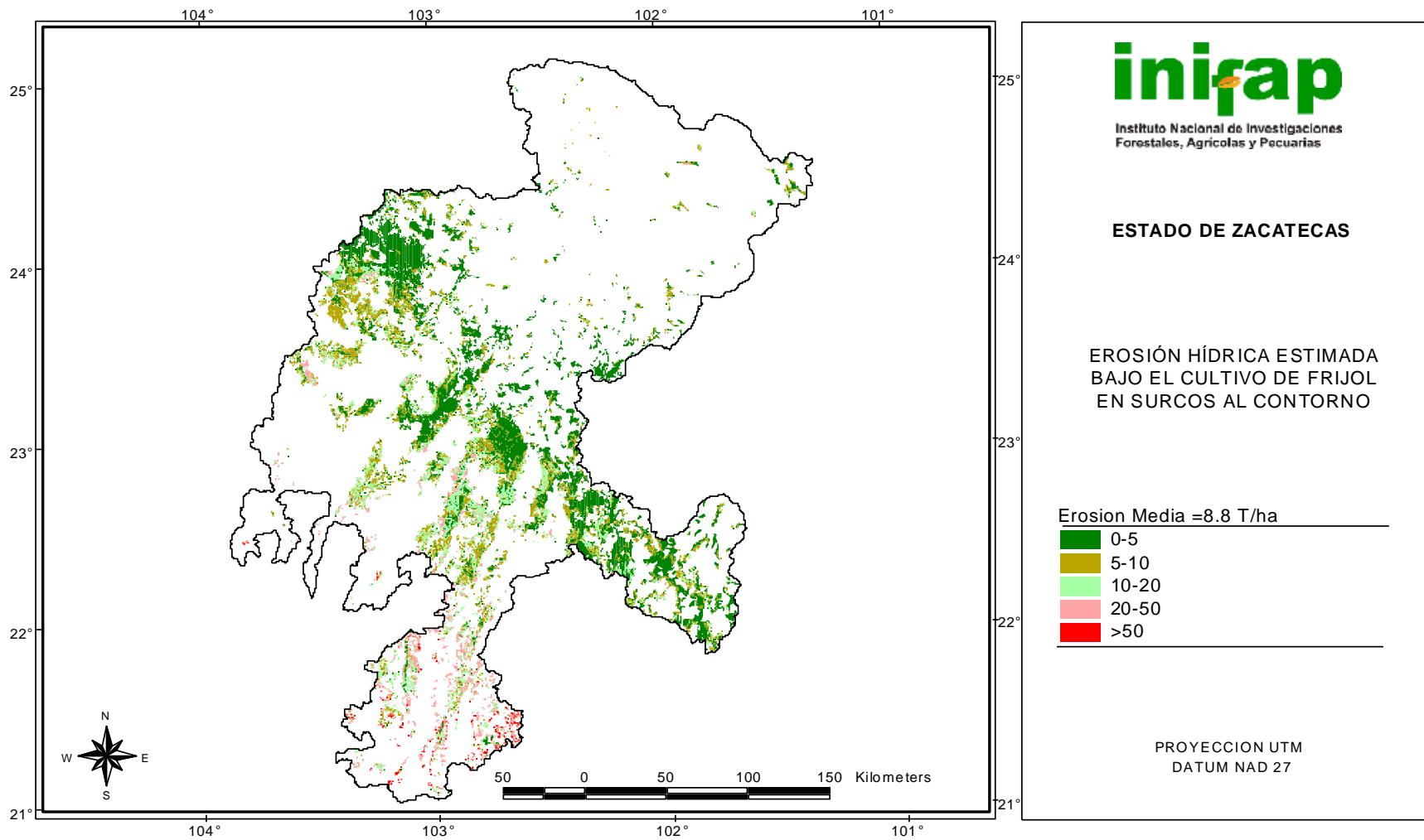


Figura 60. Erosión hídrica estimada producida por el cultivo del frijol en surcos al contorno.

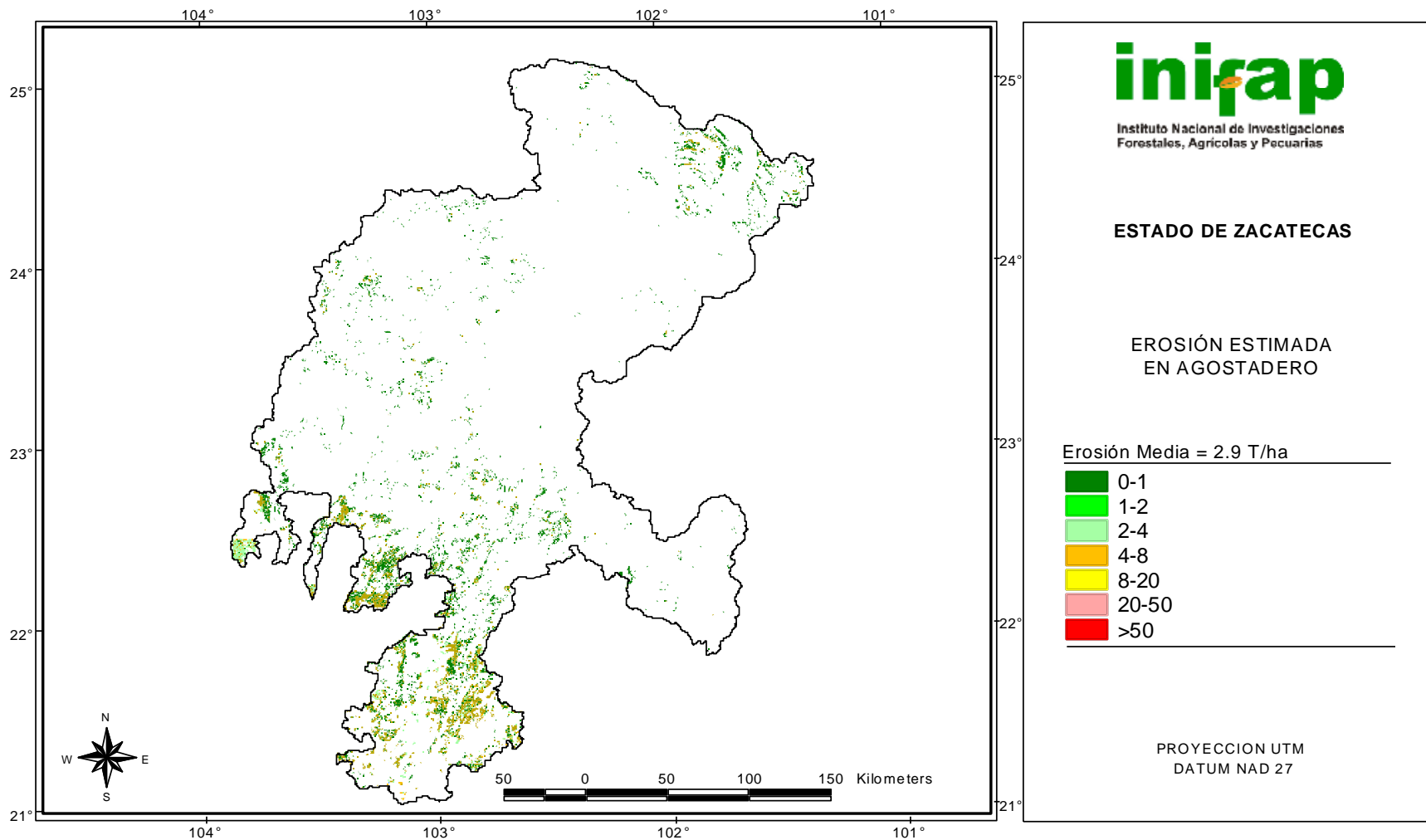


Figura 61. Erosión hídrica estimada producida en agostadero bajo pastoreo continuo.

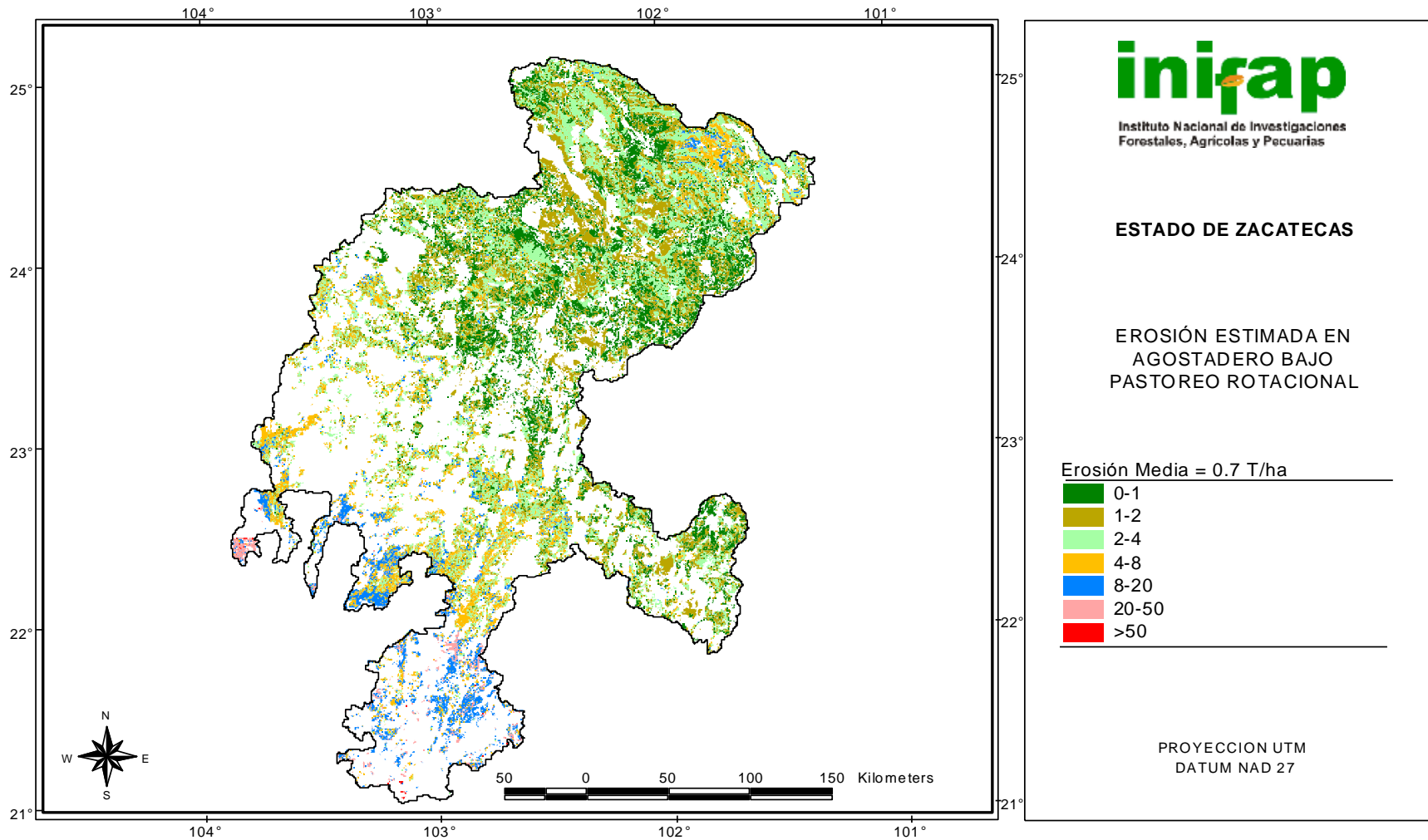


Figura 62. Erosión hídrica estimada producida en agostadero bajo pastoreo rotacional.

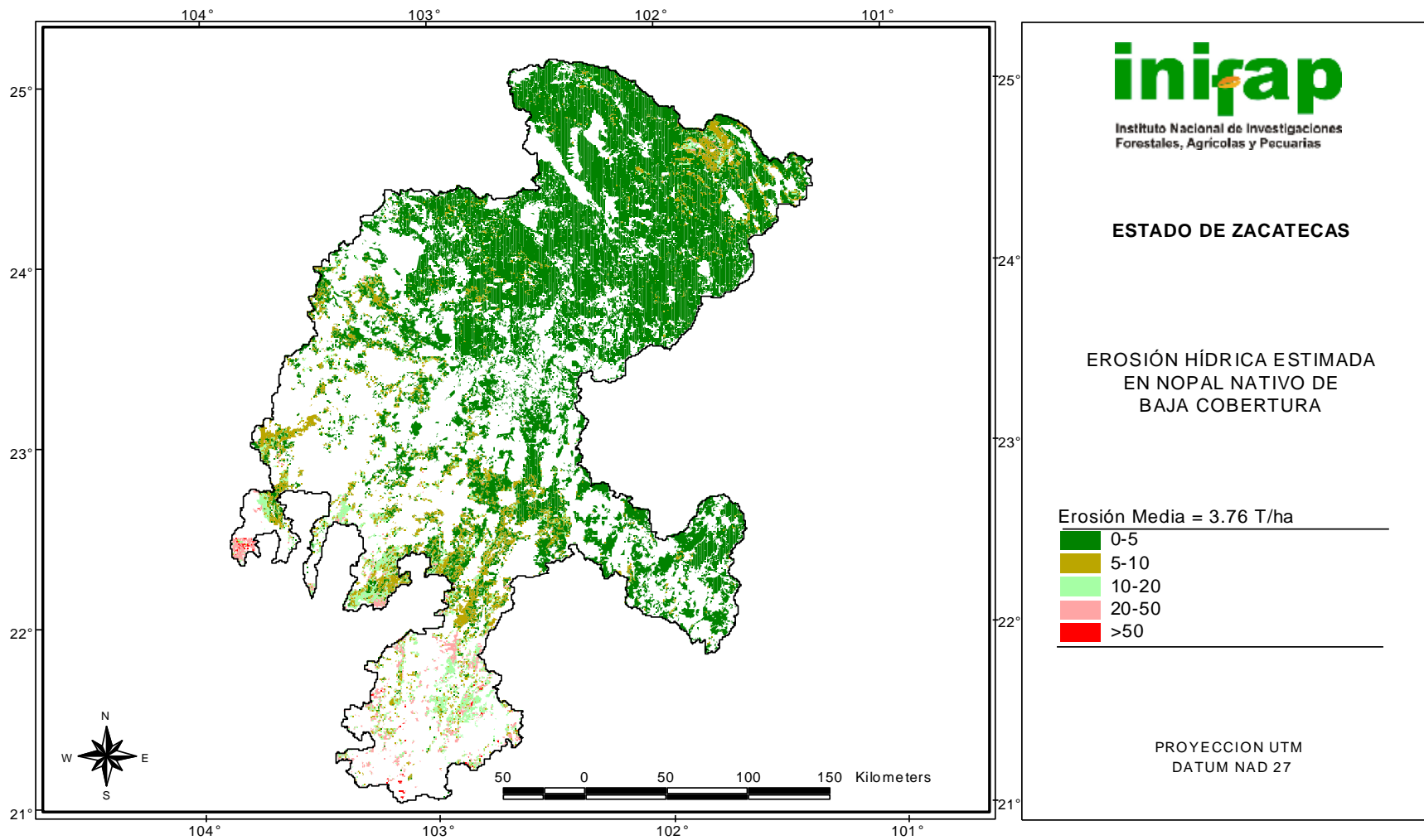


Figura 63. Erosión hídrica estimada producida por nopal nativo con baja cobertura.

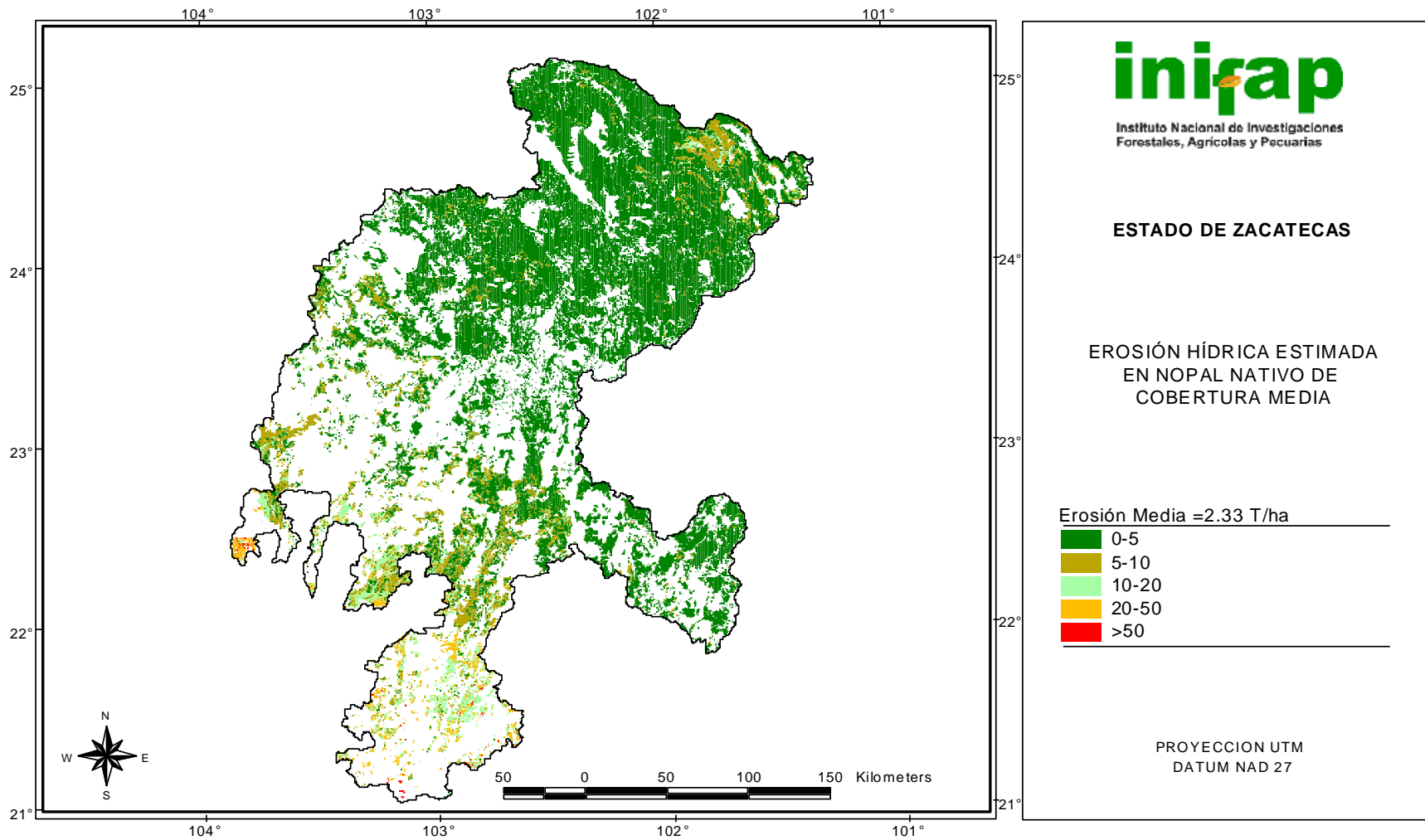


Figura 64. Erosión hídrica estimada producida por nopal nativo con media cobertura.

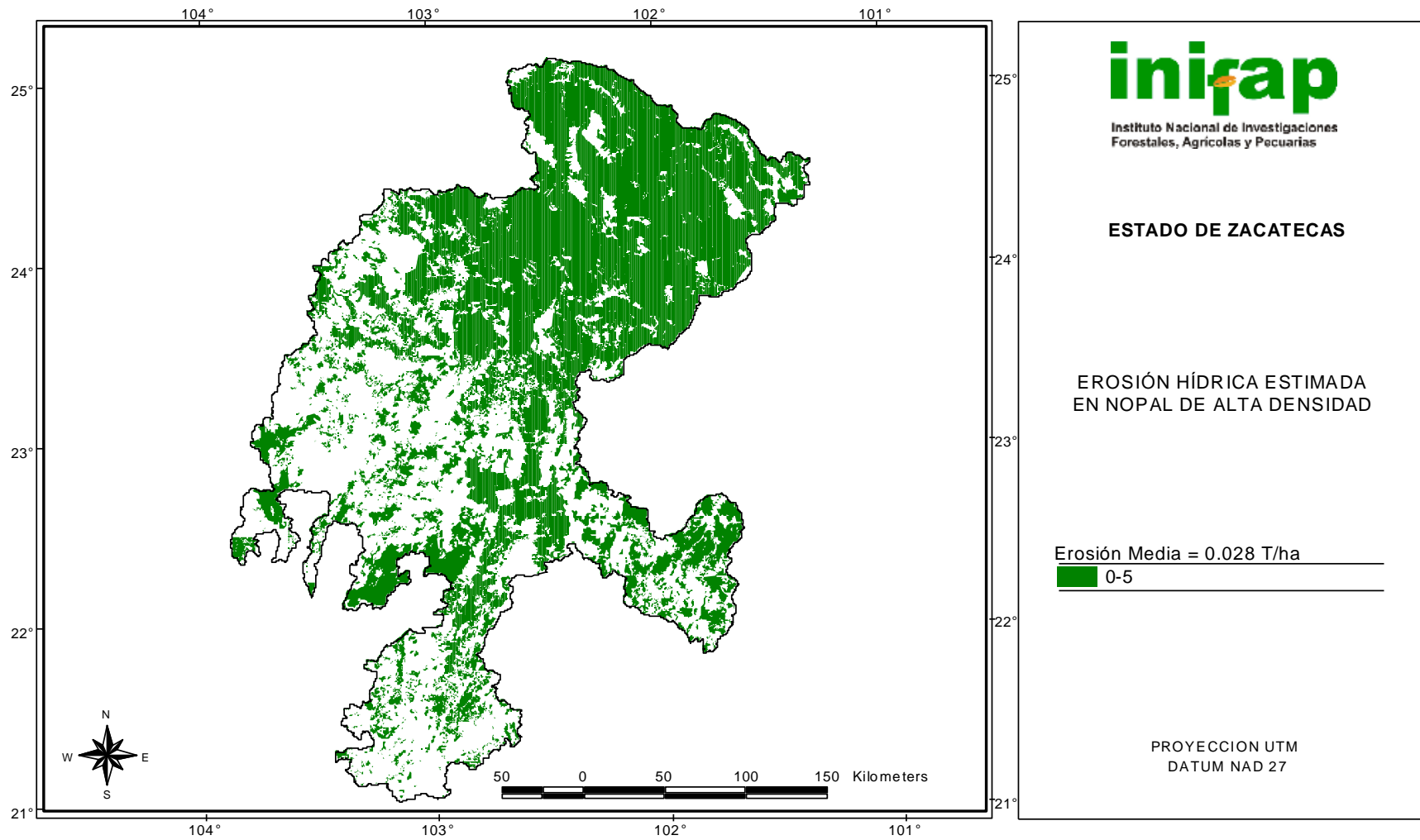


Figura 65. Erosión hídrica estimada para nopal nativo con alta cobertura.

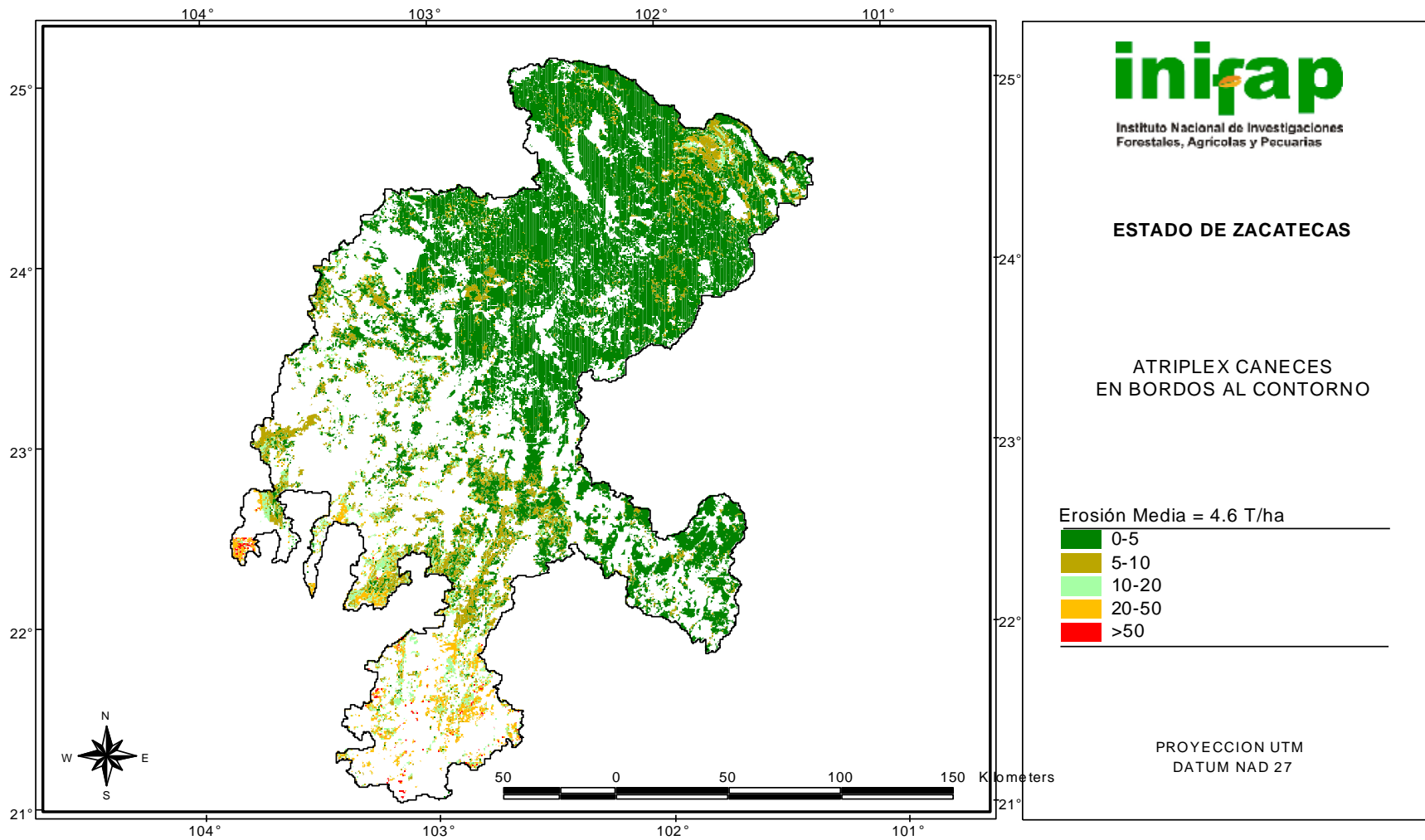


Figura 66. Erosión hídrica estimada con matorrales (*Atriplex canescens*) en bordos al contorno.

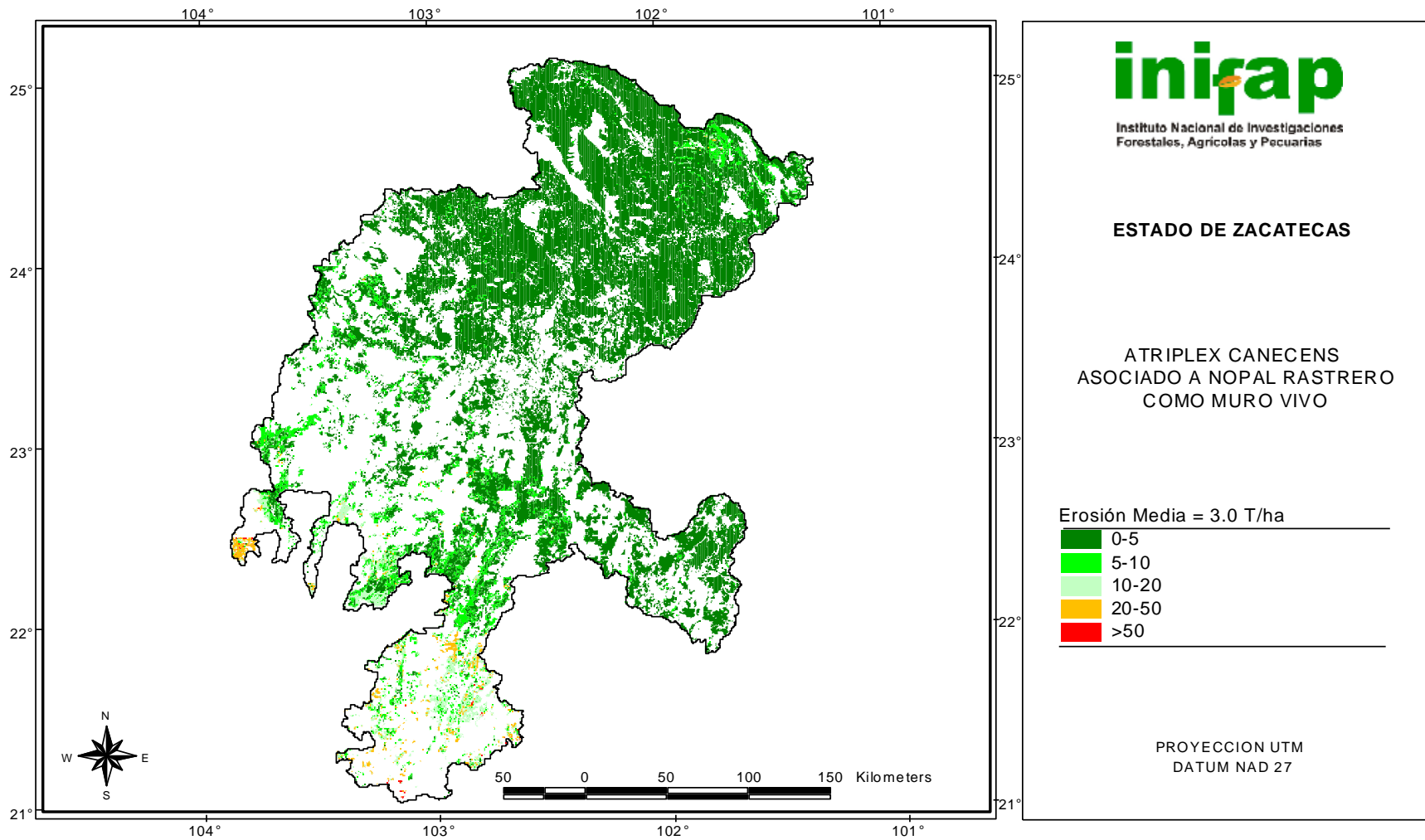


Figura 67. Erosión hídrica estimada con matorrales (*Atriplex canescens*) asociado con nopal rastrero.

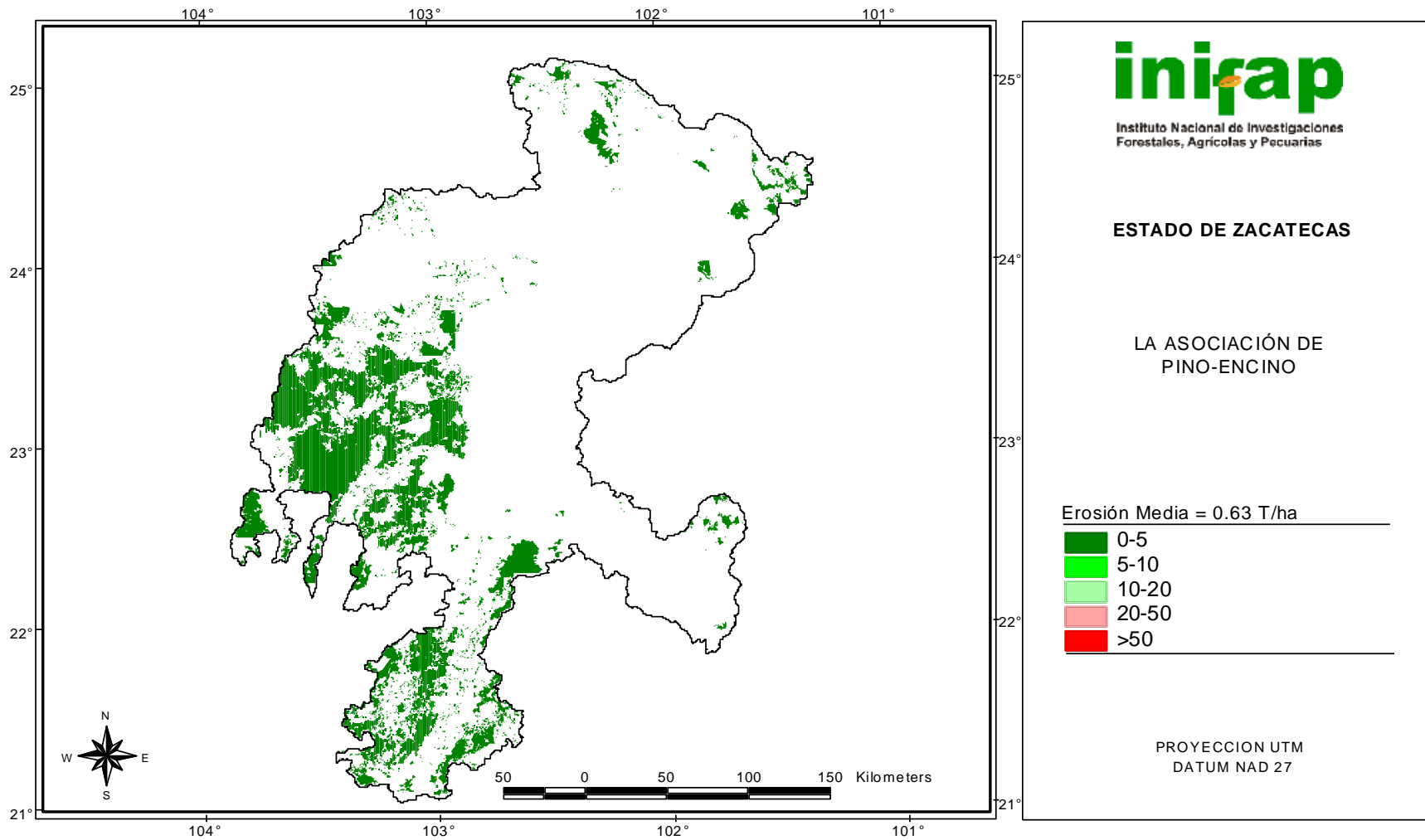


Figura 68. Erosión hídrica estimada producida por la asociación pino-encino.

6. CONCLUSIONES

- De los tres subsistemas que constituyen los estudios de ordenamiento, el subsistema natural abarca los recursos suelo, agua y vegetación, su inventario y diagnóstico pueden ser usados para la planeación de la intervención tecnológica por instituciones de desarrollo e investigación.
- Se caracterizaron los recursos del estado de Zacatecas considerando la continua degradación a que están sometidos.
- La aptitud de los suelos es modificada por la continua degradación que sufren, por lo que, para determinar su disponibilidad actual, se deberán considerar métodos basados en el monitoreo continuo.
- La categorización de los recursos naturales permite la asignación de recursos económicos y de la intervención tecnológica.
- Se detectó la degradación física, biológica y la erosión hídrica y eólica como las principales formas que se presentan en el Estado de Zacatecas; si esta persiste, el riesgo de desertificación aumenta.
- La fragilidad observada en la vegetación nativa está asociada a factores de disturbio naturales como la sequía y antrópicos como el sobrepastoreo, recolecta de plantas e incendios.
- Los principales acuíferos del Estado están sobreexplotados y se localizan alrededor de los municipios de Zacatecas, Calera y Fresnillo.
- La identificación de sitios de recarga y su posterior validación puede ayudar en la recuperación de los acuíferos.
- Un cambio en los patrones de cultivos hacia especies vegetales más eficientes en el uso de agua, así como el uso de prácticas mecánicas como el pileteo, curvas y franjas a nivel deben ser consideradas como criterio de reconversión.

- La reconversión y ordenamiento de las actividades que se deberá realizarse en el Estado, deberá considerar la producción de forrajes, como una de las más importantes opciones en la reconversión, debido a que puede ser recomendado como una opción segura, ya que su aprovechamiento se realiza antes de su madurez, lo que asegura su éxito bajo condiciones de temporal, así como:
 - La vocación ganadera del Estado y la posibilidad de dar valor agregado al forraje.
 - Uso eficiente del agua por especies de menor requerimiento.
 - Es posible conservarlo para épocas de sequía.
 - Se pueden utilizar en suelos degradados.
- La identificación y diagnóstico de las potencialidades y limitaciones de los recursos naturales, una vez validados, permitirían la correcta asignación de esfuerzos y recursos y el reordenamiento y reconversión de actividades agrícolas, pecuarias y forestales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Amante O., A. 1985. Evaluación de ecuaciones paramétricas para la predicción de la erosión eólica en el área de estudio del CREZAS-CP. Tesis Profesional. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. Mex. 145 p.
- Blackburn, W.H., Knight, R.W., Wood, M.K. 1984. Impact of grazing on watersheds: a state of knowledge. Texas Agr. Exp. Sta. MP 1496.
- Bustamante W., J.G. 2008. Balance de los recursos hídricos superficiales y subterráneos para determinar su ordenamiento productivo en el estado de Zacatecas. Tesis de doctorado. Doctorado en ciencias Pecuarias. UAMVZ. UAZ. El Cordovel, Enrique Estrada, Zacatecas, Mexico. 123pp.
- Chepil, W.S., F.H. Siddoway, D.V. Armbrust. 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. J.Soil and water conserv. 17:162-165.
- Clark, P.E., M.S. Seyfried, B. Harris. 2001. Intermountain plant community classification using Landsat TM and SPOT HRV data. J. Range Manage 54:152-160.
- Comisión de estudios para el territorio nacional (CETENAL). 1973. Carta edafológica. Escala 1:50 000. Secretaría de la Presidencia. Boletín especial. México, D.F.
- CNA. 1999. Resumen de condiciones geohidrológicas en los acuíferos del estado de Zacatecas ubicados dentro de la región hidrológica administrativa Cuencas Centrales del Norte. Gerencia Estatal de Zacatecas: Departamento de Aguas superficiales y subterráneas. Comisión Nacional del Agua. Zacatecas, Zac. 45p.
- Diario Oficial de la Federación. 2001. Ley de desarrollo rural sustentable. Presidencia de la República. 07 de Diciembre de 2001. México, D.F.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev.) FAO, Rome, Italy. p. 144
- Eastman RJ. 1995. IDRISI for windows: User's guide (Ver 1.0) Clark University.

- Echavarría C., F.G., G. Medina G., A.G. Bravo L. 2003. Interpolación de la velocidad del viento como componente en la predicción de erosión eólica. Memoria XII congreso Nacional de irrigación. Zacatecas, Zac., del 13 -15 de Agosto de 2003. pp 307-313.
- Echavarría C., F.G., G. Medina G., R. Gutiérrez L., A. Serna P. 2004. Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el Ejido Pánuco, Zacatecas. Tec. Pecu. Mex. 42(1): 39-53.
- Echavarría Ch., F.G., A. Serna, R. Bañuelos V. 2007. Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano: II Cambios en el suelo. Tec. Pecu. Mex. 45(2): 177-194.
- Echavarría Ch., A. Serna P., F. A. Rubio A., A. F. Rumayor R., H. Salinas G. 2009a. Productividad del chamizo *Atriplex canescens* con fines de reconversión: dos casos de estudio. Tec. Pecu. Mex. 47(1): 93-106.
- Echavarría Ch., F.G., A. Serna P. 2009b. Informe anual de actividades del año 2008. Proyecto: Sistema integral de manejo y comercialización de productos caprinos. FPZ/0125/2007. CEZAC-CIRNOC-INIFAP. Documento de circulación interna. Calera, Zacatecas. México.
- Ezcurra, E. 2002. La biodiversidad en América Latina a diez años de Río. *In*: Leff, E., E. Ezcurra, I. Pisanty, and P. Romero-Lankao (comps.) *La transición hacia el desarrollo sustentable: Perspectivas de América Latina y el Caribe*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma Metropolitana, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México, D.F. pp. 327–342.
- Everitt, J.H., D.E. Escobar, R. Villarreal, M.A. Alaniz, M.R. Davis. 1993. Canopy light reflectance and remote sensing of shin oak (*Quercus havardii*) and associated vegetation. *Weed Sci.* 41:290-297.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Via delle Terme di Caracalla, 00100. Roma Italia. pp 86.
- Fang, H. B., Wu, H. Liu, X. Huang. 1998. Using NOAA AVHRR and Landsat TM to estimate rice area year by year. *Int. J. Remote sens.* 19:521-525.

- Figúeroa S., B., A. Amante O., H.G.Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna C., J.M. Rodríguez O., F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH Colegio de postgraduados. México, D.F. 150 pp.
- Gavande, S.A. 1972. Física de suelos: Principios y aplicaciones. Ed. Limusa-Wiley. pp: 233-243.
- Gutiérrez L., R., G. Medina G., M.D. Amador R. 2007a. Carga animal del pastizal mediano abierto en Zacatecas (segundo trimestre del 2007). Folleto informativo N° 36. CIRNOC. CEZAC. INIFAP. Zacatecas, México. 36 pp.
- Gutiérrez L., R. . G. Medina G., M.D. Amador R. 2007b. Carga animal del pastizal mediano abierto en Zacatecas (tercer trimestre del 2007). Folleto informativo N° 41. CIRNOC. CEZAC. INIFAP. Zacatecas, México. 31 pp.
- Gutiérrez L., R. . G. Medina G., M.D. Amador R. 2007c. Carga animal del pastizal mediano abierto en Zacatecas (cuarto trimestre del 2007). Folleto informativo N° 46. CIRNOC. CEZAC. INIFAP. Zacatecas, México. 37 pp.
- Hill, M. J., P.J. Vickery, E.P. Furnival. G.E. Donald. 1999. Pasture land cover in eastern Australia from NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of central Australia. Int. J. Remote Sensing. 16:1289-1302.
- Hunt, E. R. Jr., J. H. Everitt; J. C. Ritchie, M. S. Moran, D. T. Booth, G. L. Anderson, P. E. Clark and M. S. Seyfried. 2003. Applications of research using remote sensing for rangeland management. Photogram metric Engineering and Remote Sensing. 69:675-693.
- Hunt, E.R., Jr, B.A. Miyake. 2006. Comparison of stocking rates from remote sensing and geospatial data. Rangeland Ecol. Manage. 59:11-18.
- Instituto Nacional de estadística, geografía e informática. 1981. Guías para la interpretación de cartografía. Edafología. INEGI. Aguascalientes, Ags. 48pp.
- Isaaks EH, Srivastava RM.1989. Applied geostatistics. Oxford University Press. New York. 561 pp
- Jiang, L., S.Islam. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. Geophys. Res. Lett. 26:2773-2776.
- Jiménez D., J. Lamo de E. 1998, *Agricultura Sostenible*, Mundi Prensa, Madrid. 616 pp.

- Medina G., G., J.A. Ruiz C. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (período 1961-2003). SAGARPA. INIFAP. CIRNOC. Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico N° 3. 240 pp.
- Mojarro, D.F. 2004. Optimización del uso del agua de riego para incrementar la productividad de chile seco en Zacatecas. Primera convención mundial de chile. pp. 203-210.
- Mondragón B., R. 2004. Desarrollo de la actividad hidrológica en el INEGI. Expo Agua, Guanajuato. Seminario Sistematización y automatización como herramienta para la gestión del agua. www.guanajuato.gob.mx/ceag/eventos/expoagua2004/pdfs/pdf%20sem20.pdf
- Ochi, S., S. Murai.1999. Analysis of relationship between NPP and population carrying capacity for major river basins in Asia. P. 258-262. *In* Proceedings of 9th SEIKEN forum "global environment Monitoring from Space".
- Palacio, J., G. Bocco, A. Velázquez y J. Mas. 2000. Inventario nacional forestal 2000-2001. Informe Instituto de Geografía de la UNAM- SEMARNAP.
- Palacio-Prieto, J.L., G. Bocco, A. Velazquez, J.Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna- González, G. Gómez-Rodríguez, J. López García, M. Palma-Muñoz, I Trejo-Vázquez, A. Peralta-Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo, F. González-Medrano, 2000,. *"La Condición Actual de los Recursos Forestales en México; Resultado del Inventario Forestal Nacional 2000"*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. 43:183-202.
- Peña, H.S. y D. Arcos H. 2004. Estimación de la recarga natural vertical para su introducción en modelos de simulación de flujo con la ayuda de sistemas de información geográfica. Expo Agua, Guanajuato. Seminario Sistematización y automatización como herramienta para la gestión del agua. www.guanajuato.gob.mx/ceag/eventos/expoagua2004/pdfs/pdf%20sem20.pdf
- SAS. 1992. SAS/STAT Users' Guide. (Release 6.08). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAP). 2000. Ordenamiento ecológico general del territorio. Memoria Técnica 1995-2000. Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental. Dirección de Ordenamiento General del Territorio. México, D.F. 540 p.

- Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP). 1981. Síntesis geográfica de Zacatecas. Anexo cartográfico. Carta topográfica. Secretaría de Programación y Presupuesto. Mexico. D.F.
- SENASICA-SAGARPA. 2004. Lineamientos para el reconocimiento de buenas prácticas en producción de engorda de ganado bovino en confinamiento. www.senasica.sagarpa.gob.mx/web/propuestas_web/221204/inocuidad_agroalimentaria/lineamientos_bovinos.doc
- Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance photosynthesis and transpiration. *Int J. Remote Sens.* 6:1335-1372.
- Serna P., A. y M.A. Velásquez V. 1988a. Balance hídrico en una pequeña cuenca experimental de uso pecuario. UACH. Memoria V semana de zonas áridas. Pp: 39-48.
- Serna P., A. y M.A. Velásquez V. 1988b. Relación precipitación-escurrimiento en una pequeña cuenca experimental de uso agrícola: Campo Experimental de Los Cañones, Juchipila, Zac. SARH-INIFAP. Reporte de resultados. Documento de circulación interna.
- Serna P., A. 1990. Relación precipitación-escurrimiento en una pequeña cuenca experimental de uso agrícola: Panuco, Zac. (1989 al 1990). SARH-INIFAP. Reporte de resultados. Documento de circulación interna.
- Serna P., A. y F.G. Echavarría Ch. 2002. Serna P., A. y F.G. Echavarría Ch. 2002. Caracterización hidrológica de un agostadero Comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I Pérdidas de suelo. *Tec. Pecu. Mex.* 40(1): 37-53.
- Seybold, C.A., Herrick, J. E., Brejda, J.J. 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci* 9;164(4):224-234.
- Soil Science Society of America. 1997. Glossary of soil terms. SSSA. Madison, WI. 53711. 140 pp.
- Stoms, D.M., M.J. Bueno, F.W. Davis, K.M Cassidy, K.L. Driese, J.S. Kagan. 1998. Map guided classification of regional land cover with multitemporal AVHRR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* 64(8) 831-838.
- Rincón V., F., F.G. Echavarría Ch., A.F. Rumayor R., J.Mena C., A.G. Bravo L., E.Acosta D., J.L. Gallo D., H. Salinas G. 2004. Cadenas de sistemas agroalimentarios de Chile seco, Durazno y Frijol en el estado de Zacatecas: Una

aplicación de la metodología ISNAR. Publicación especial N° 14. CIRNOC. CEZAC. INIFAP. Zacatecas. Mexico. 157pp.

Tan, C.H., S.F. Shih. 1997. Using NOAA satellite thermal infrared data of aerial biomass of fouring saltbush from shrubheight and volume. *J. Range Manage.* 51:323-325.

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review.* 38: 55-94.

Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127-150.

Tueller, P. T. 1989. Remote sensing technology for rangeland management. *J.Range Manage* 42:442-452.

Turc, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration, potentielle, formule climatique simplifice et mise a jour. *Ann. Agron.* 12:13-49

UNAM 1995. Carta de uso del suelo. Universidad Autónoma de México. México, D.F.

UNCED 1992. Earth summit agenda 21: Programme of action for sustainable development. New York. United Nations Department of Public Information.

Van Kraalingen, D.W.G. y W. Stol. 1997. Evapotranspiration modules for crop growth simulation: Implementation of the algorithms from Penman, Makkink and Priestley-Taylor. *Quantitative approaches in systems analysis.* 11: 1-29.

Velásquez V., M.A. y A. Serna P. 1988. Relación precipitación-escurrimiento en una pequeña cuenca experimental de uso forestal: Campo Experimental de Los Cañones, Juchipila, Zac. SARH-INIFAP. Reporte de resultados. Documento de circulación interna.

Villaman-Peña, R., L. Tijerina CH., A. Quevedo N. y G. Crespo P. 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Terra:* 19: 281-291.

WCED (World Comisión on Environment and Development). 1987. Our common future. Oxford: Oxford University Press. 400pp.

- Whisenant, S.G..1999 Repairing damaged wildlands: A process-orientated, landscape-scale approach. Cambridge, U.K: Cambridge University Press. 1999:312 p.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric., Handbook 537, Washington, DC. USA.
- Woodruff, N.P., F.H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. J. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29(5):602-608.
- Yin, Z., T.H.L. Williams.1997. Obtaining spatial and temporal vegetation data from landsat MSS and AVHRR/NOAA satellite images for a hydrologic model. Eng. Remote Sens. 63:69-77.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo mixto CONACYT – Gobierno del estado de Zacatecas por el apoyo financiero otorgado a través del proyecto ZAC-2002-C01-4440: “ORDENAMIENTO ECOLÓGICO PARA ORIENTAR LA RECONVERSIÓN PRODUCTIVA DEL ESTADO DE ZACATECAS” del cual se deriva la mayor parte de la información presentada en esta publicación.

A la Comisión Nacional del Agua (CNA) por la información proporcionada de la piezometría y las coordenadas de los acuíferos del estado de Zacatecas.

Al International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) por el apoyo otorgado con fondos concurrentes en la realización de este estudio.

Se agradece la participación del Dr. Francisco Mojarro Dávila, MC. Angel G. Bravo Lozano, Martha Cecilia Vázquez Solís y Leticia Alvarado Campos.

**DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS NATURALES
PARA LA PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO**

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS
Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo
Apartado postal No. 18
Calera de V.R., Zac., 98500

Tel: (478) 9-85-01-98 y 9-85-01-99
Fax: (478) 9-85-03-63

Correo electrónico: direccion.zac@inifap.gob.mx
direccion@zacatecas.inifap.gob.mx

Página WEB: <http://www.inifap.gob.mx>
<http://www.zacatecas.inifap.gob.mx>

**DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS NATURALES
PARA LA PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO**

Comité Editorial Campo Experimental Zacatecas

Revisión técnica

Dr. Mario D. Amador Ramírez
Dr. Maximino Luna Flores

Edición

Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez
Dr. Guillermo Medina García

Diseño de Portada

Lic. Diana Sánchez Montaña

**DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS NATURALES
PARA LA PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO**

Esta publicación se terminó de Imprimir el 30 Noviembre de 2009

Imprenta Mejía
Calle Luis Moya No. 622 Sur
Calera de V. R., Zac.

Tiraje: 500 ejemplares

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

MSc. Agustín F. Rumayor Rodríguez Director de Coordinación y Vinculación

PERSONAL INVESTIGADOR

Ing. Ma. Dolores Alvarado Nava Tecnología de alimentos
Dr. Mario Domingo Amador Ramírez Control de malezas
Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez Sistemas de producción
Ing. Juan José Figueroa González Post cosecha
Dr. Miguel Ángel Flores Ortiz Manejo de pastizales
Dr. Ramón Gutiérrez Luna Manejo de pastizales
M.C. Juan Carlos López García Caprinos - Ovinos
Dr. Guillermo Medina García Potencial productivo
M.C. Enrique Medina Martínez Producción de semillas
Dr. Jaime Mena Covarrubias Entomología
Ing. Nadiezhda Ramirez Cabral Modelaje
M.C. Luis Roberto Reveles Torres Recursos genéticos
Ing. Manuel Reveles Hernández Nopal y hortalizas
M.C. Francisco Rubio Aguirre Manejo de pastizales
M.C. Agustín Rumayor Rodríguez Frutales caducifolios
Ing. Ricardo Alonso Sánchez Gutiérrez Bio-combustibles
M.C. Blanca Isabel Sánchez Toledano Socioeconomía
Dr. Alfonso Serna Pérez Hidrología
Ing. Miguel Servín Palestina Manejo del agua
Dr. Rodolfo Velásquez Valle Fitopatología
M.C. Román Zandate Hernández Frijol
Dr. Jorge A. Zegbe Domínguez Fisiología vegetal

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



ZACATECAS
GOBIERNO DEL ESTADO
2 0 0 4 • 2 0 1 0

