

Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el ejido Pánuco, Zacatecas

Identification of areas for reconversion from agricultural to rangeland use and soil conservation in the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico

Francisco Echavarría Cháirez^a, Guillermo Medina García^a, Ramón Gutiérrez Luna^a, Alfonso Serna Pérez^a

RESUMEN

El presente estudio integra diferentes estudios realizados a lo largo de ocho años en el ejido Pánuco, Zacatecas, los cuales permitieron generar una propuesta de reconversión de áreas agrícolas hacia agostadero. También se identificaron los sitios de mayor susceptibilidad para la erosión en el agostadero, y se consideraron los aspectos de suelo, vegetación e hidrología. Los indicadores de suelo fueron: clases de suelo, topografía, nivel de erosión, contenido de materia orgánica y el porcentaje de suelo con partículas de diámetro mayor a 2 mm. En cuanto a vegetación, se consideró la cobertura basal y producción de materia seca del estrato herbáceo. El aspecto hidrológico incluye la medición y predicción de erosión hídrica. Se realizó un análisis geoestadístico y sobreposición de imágenes con el uso de sistemas de información geográfica. La superficie susceptible de ser reconvertida dentro del área agrícola es de 753 ha, para la cual se sugieren asociaciones de cultivos de alta cobertura y prácticas mecánicas de conservación de suelo y agua. La superficie de agostadero que requiere mayor atención debido a su propensión a la erosión es de 208 ha. Para la condición de este ejido, el suelo desnudo produjo la mayor erosión, seguido por los tratamientos de revegetación, y el de menor impacto erosivo fue la vegetación nativa cuando fue excluida al pastoreo. Para el agostadero se propone el descanso rotativo anual en un sistema de apacentamiento rotacional de cuatro potreros, como una opción tecnológica que permitirá una recuperación gradual en la condición ecológica del mismo.

PALABRAS CLAVE: Reconversión, Geoestadística, Sistemas de información geográfica, Erosión hídrica, USLE.

ABSTRACT

Several studies done on the Pánuco ejido, Zacatecas, Mexico, over the last eight years are summarized to propose areas for reconversion from agricultural to rangeland use. The most erosion prone rangeland soils are identified. Soils, vegetation and hydrology data are included in the analysis. Soils indicators are: soils classification, topography, water erosion level, organic matter content and percent of particles larger than 2 mm diameter. Vegetation indicators are: base cover and dry matter yield of herbaceous stratum. Hydrology indicators are: water erosion measurements and predictions. Using a geographical information system, geostatistical analysis and image superimposition are done. The area to reconvert was estimated at 753 ha. Plants providing high cover and aiding soil and water conservation management practices are suggested. A total of 208 ha of rangeland surface are erosion prone and require greater maintenance. On the Pánuco ejido overall, bare soil has the highest erosion levels, followed by areas with revegetation treatments, and the lowest erosion level is in native vegetation in a grazing exclusion area. Annual rotational grazing using four pastures is suggested as a strategy for gradual recovery of this ecosystem.

KEY WORDS: Reconversion, Geostatistics, Geographical information systems, Water erosion, USLE.

Recibido el 24 de abril de 2003 y aceptado para su publicación el 9 de junio de 2003.

^a Campo Experimental Calera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) CIR-Norte Centro. AP # 18. Km. 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo. 98500. Calera V.R., Zacatecas, México. fechava@inifapzac.sagarpa.gob.mx. Correspondencia al primer autor.

INTRODUCCIÓN

El término reconversión es usado para referirse a la acción de cambiar la actividad productiva de áreas de baja aptitud productiva hacia una actividad de menor nivel extractivo⁽¹⁾, como en el caso de cambiar de la actividad agrícola hacia la pecuaria. Los estudios agrológicos o de uso potencial empezaron a usarse en México a partir del año de 1968. CETENAL^(2,3) desarrolló un sistema de clasificación de la capacidad agrológica, que permitió clasificar los suelos de acuerdo con su capacidad productiva. Sin embargo, en muchos casos los criterios de uso potencial no fueron considerados por los productores, y se abrieron al cultivo suelos de baja aptitud productiva, los cuales no alcanzarían el nivel mínimo necesario para considerarse aptos para el uso agrícola.

Para rescatar aquellas áreas que erróneamente se abrieron al cultivo, se requiere la identificación de las mismas con procedimientos sencillos, que permitan actualizar la información disponible y separar las áreas de menor aptitud. Debido a ello, se ha optado por el uso de indicadores de fácil identificación y muestreo, que presenten características como correlación espacial, y permitan la interpolación y el mapeo^(4,5).

Utilizando como base los Sistemas de información geográfica (SIG), se han desarrollado diferentes trabajos de investigación y de aplicación en muy diversas áreas, como es la determinación del potencial productivo de especies vegetales en México, con el que se determinó el potencial de especies de uso agrícola, pecuario y forestal y en condiciones de riego o de temporal⁽⁶⁾.

Los SIG's se han usado como una herramienta para desarrollar nuevos mapas, a través de la sobreposición de mapas ya existentes, que generalmente son la representación geográfica de una variable⁽⁷⁾. A través de este proceso es posible obtener un mapa que represente geográficamente, por ejemplo, un sistema de clasificación de productividad del suelo, definiendo previamente los rangos de las variables que dan origen a los diferentes niveles de la clasificación. Además de generar mapas a partir de información de campo,

INTRODUCTION

The term "reconversion" is used to refer to changing the productive activity in areas with low productive suitability towards an activity of a lower extractive level⁽¹⁾, for instance from agriculture to livestock. Agrology, the study of the productive potential of soils, came into use in Mexico beginning in 1968. CETENAL^(2,3) developed a classification system for agrolological capacity that allowed classification of soils according to their productive capacity. In many cases, however, producers did not consider the criteria for potential use and began cultivating soils with low productive suitability, which did not meet the minimum requirements for agricultural use.

To rescue erroneously cultivated areas, they need to be identified using simple procedures that update current information and separate less suitable areas. For this reason, easily identified and sampled indicators are used that have spatial correlation and allow interpolation and mapping^(4,5).

Different studies have been done using geographical information systems (GIS) in diverse areas, including determination of vegetable species productive potential in Mexico. Vegetable species potential has been determined for agricultural, livestock and forestry use under irrigated or seasonal conditions⁽⁶⁾.

GIS's have been used to create new maps by superimposing existing maps that are generally the geographic representation of one variable⁽⁷⁾. This procedure can be used to geographically represent, for example, a soil productivity classification system by previously defining the variable ranges for the classification levels. These systems can also be used to generate maps from field data and from mathematical models such as the "universal soil loss equation" (USLE)⁽⁸⁾.

Strategic planning efforts should always include previous studies of the area in question. This study is an attempt to use available information for planning ends, particularly information that can be used with spatial analysis tools. These tools provide the necessary precision in studies of large areas

y de modelos matemáticos como la “ecuación universal de pérdida del suelo” (USLE, por sus siglas en inglés)⁽⁸⁾.

Las labores de planeación estratégica deberán contar siempre con estudios previos en el área. Este estudio es un intento por utilizar información disponible, la cual tiene la característica de que permite su manejo con herramientas de análisis espacial. Estas herramientas dan a los estudios de grandes superficies, la precisión necesaria para dirigir las acciones a los sitios en que realmente se necesita la intervención tecnológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ejido Pánuco tiene una superficie de 4,914 ha, de las cuales 2,470 son usadas como agostadero comunal y 2,444, son usadas con fines agrícolas. Se ubica entre los 102° 27' y 102° 33' Oeste y 22° 55' y 22° 51' Norte; su delimitación se realizó por medio de un recorrido por el perímetro, y la ubicación de las coordenadas geográficas de los vértices. La precipitación media anual es de 400 mm y la temperatura media anual de 15 °C⁽⁹⁾.

La fisiografía varía desde escarpada (2,400 msnm) al sur del ejido, hasta ondulada y plana (2,125 msnm) al noreste. De acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO modificada por CETENAL⁽¹⁰⁾, el suelo predominante es el litosol eútrico, que se encuentra distribuido en 91.5 % del área de agostadero y 36 % del área agrícola. El xerosol lúvico es el segundo en importancia y se distribuye en el 54 % del área agrícola y el 8.5 % del área de agostadero. Un tercer tipo de suelo es el castañozem lúvico que se distribuye sólo en 4.4 % al noreste de la área agrícola.

De acuerdo a COTECOCA⁽¹¹⁾ el tipo de vegetación es matorral mediano espinoso, donde la vegetación predominante es “pastizal nativo-matorral espinoso-nopalera”, con predominio en algunas áreas por pastizal y nopalera, representada principalmente por diversas variedades de nopal silvestre (*Opuntia Leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia Rastrera* Weber, *Opuntia hyptiacantha* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick, y *Opuntia*

that allows actions to be directed at sites that actually require technological intervention.

MATERIALS AND METHODS

The Pánuco ejido (102° 27' and 102° 33' West; 22° 55' and 22° 51' North) in the State of Zacatecas, Mexico, has a 4,914 ha area of which 2,470 are used as communal rangeland and 2,444 are under agricultural use. For the present study its limits were determined during a survey of the perimeter and location of the vertices' geographical coordinates. The region receives 400 mm mean annual precipitation and mean annual temperature is 15 °C⁽⁹⁾.

The physiography within the ejido varies from steep slopes (2,400 masl) in the southern area to rolling planes (2,125 masl) in its northwest. According to the FAO/UNESCO classification, as modified by CETENAL⁽¹⁰⁾, the predominant soil is eutric litosol, which covers 91.5 % of the rangeland and 36 % of the agricultural area. Luvic xerosol is the second most common, covering 54 % of the agricultural area and 8.5 % of the rangeland. A third soil type, luvic castañozem, covers only 4.4 %, in the northeast agricultural area.

According to the COTECOCA⁽¹¹⁾ classification system, the vegetation on the ejido is medium thorny bush with the predominant vegetation being “native grasses-thorny bush-cactus”. Grassland predominates in some areas and cactus in others. The former contains mostly gramineas (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et al., *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida* spp, *Lycurus phleoides* HBK), while the latter is represented by a large number of wild cactus pear (*Opuntia Leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia Rastrera* Weber, *Opuntia hyptiacantha* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick and *Opuntia pachona* Griffiths). The thorny bush vegetation is composed of bushes and some annual plants (*Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd) M.C. Johnston, *Mimosa biuncifera* Benth and *Dalea bicolor*)⁽¹²⁾.

A total of thirty soil samples were collected in the agricultural area, distributed as a function of the

pachona Griffiths). En el pastizal predominan las gramíneas (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida* spp, *Lycurus phleoides* HBK). El matorral espinoso está compuesto por algunas arbustivas y plantas anuales (*Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd) M.C. Johnston, *Mimosa biuncifera* Benth y *Dalea bicolor*)⁽¹²⁾.

En la área agrícola se colectaron 30 muestras de suelo distribuidas en función de características contrastantes de clase de suelo y topografía. Los sitios de muestreo fueron georeferenciados. Se determinó el porcentaje de materia orgánica (MO) en base a peso, y una muestra adicional de suelo fue tamizada (4.76, 2.38, 2.0, 1.41, 0.84, 0.59, 0.25, 0.044 mm) para evaluar el porcentaje del suelo (en base a peso) con partículas de diámetro menores a 2 mm, que es el diámetro máximo para que una partícula pueda ser considerada suelo, de acuerdo con los principales sistemas de clasificación⁽¹³⁾.

En el agostadero se consideraron indicadores de planta (rendimiento de materia seca y cobertura basal) e indicadores de tipo hidrológico (erosión hídrica). Desde el año 1998 se realizaron mediciones periódicas del contenido de materia seca del estrato herbáceo, dentro y fuera del área excluida en diez transectos de medición, con puntos de medición separados a 50 m. Para colectar la muestra se usó un cuadrante 0.5 x 0.5 m y se colectó sólo el material herbáceo. Cada muestra fue georeferenciada. Asimismo, dos veces al año se realizaron mediciones de la cobertura basal usando un marco de puntos de 20 agujas^(14,15). Las variables de cobertura fueron la cobertura basal del estrato herbáceo, mantillo orgánico, suelo desnudo, grava y roca; se consideró como mantillo orgánico el material vegetal muerto que ya no forma parte del pasto o de la planta anual.

Para estimar los niveles de erosión hídrica en la superficie de agostadero se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)⁽⁸⁾, la cual considera los siguientes factores:

$$E = RKLSCP \dots\dots\dots (1)$$

contrasting soil classes and topography. All sample sites were georeferenced. Organic matter (OM) percentage was determined based on weight. An additional soil sample was screened (4.76, 2.38, 2.0, 1.41, 0.84, 0.59, 0.25, 0.044 mm) to evaluate soil percentage (based on weight), using particles of less than 2 mm diameter, which is the maximum size for a particle to be defined as soil according to the principal classification systems⁽¹³⁾.

Both plant indicators (dry material cover and base cover) and hydrological indicators (water erosion) were considered in the rangeland. Beginning in 1998, periodic measurements have been made of the dry matter content of the herbaceous stratum inside and outside the grazing exclusion area. Sampling was done along ten transects with a sample taken every 50 m. Samples were collected by using a 0.5 x 0.5 m quadrant and only collecting herbaceous material. Each sample was georeferenced. In addition, base coverage was measured twice a year using a 20-needle point frame^(14,15). Coverage variables included base cover of the herbaceous stratum, organic humus, bare soil, gravel and rock. Organic humus was defined as dead vegetable material that no longer forms part of the grass or annual plant.

The universal soil loss equation (USLE) was used to estimate water erosion of the rangeland surface. The equation includes the factors:

$$E = RKLSCP \dots\dots\dots (1)$$

Where *E* is erosion (t/ha/yr), *R* is the rain erosive factor (MJ-mm/ha-h), *K* is the soil erodability factor (t-ha-h/MJ-mm-ha), *L* is slope length (adimensional), *S* is the slope grade factor (adimensional), *C* is the vegetation factor (adimensional), and *P* is the practical mechanics of erosion control factor (adimensional).

Water erosion of the soil has been measured from 1994 to 2003 in runoff plots installed in the 53 ha grazing exclusion area located in the northwest portion of the ejido. Three native vegetation conditions (dense cactus cover; medium and low cover rangeland) and three induced vegetation conditions (bush association; cacti; and mechanical

En donde E es la erosión (t/ha/año), R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ-mm/ha-h), K es el factor de erodabilidad del suelo (t-ha-h/MJ-mm-ha), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor de grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de la vegetación (adimensional) y P es el factor de práctica mecánica de control de la erosión (adimensional).

La erosión hídrica del suelo se ha medido desde 1994 hasta 2003, en parcelas de escorrentía localizadas en una área de 53 ha excluida al pastoreo, y ubicada al noroeste del ejido; se ha registrado en tres condiciones de vegetación nativa (cobertura densa de nopal; agostadero de cobertura media y baja) y en tres condiciones de vegetación inducida, que consideran la asociación de arbustos, nopales y prácticas mecánicas de retención de suelo y agua (bordos a nivel y cepas)⁽¹⁶⁾. De esta evaluación experimental se generaron valores para el parámetro de vegetación (C), los cuales pueden ser usados para representar un comportamiento ideal de la vegetación en todo el ejido. Sin embargo, para los demás parámetros de la ecuación, no es posible utilizar los valores medidos, aún cuando estos provienen de mediciones realizadas dentro de los terrenos del ejido, debido a que son valores puntuales, que representan la condición del sitio de medición, y no incluyen la variación espacial existente. Los valores faltantes de los parámetros de la USLE se estimaron utilizando la metodología de Figueroa⁽¹⁷⁾. Para la estimación del factor R se usó el mapa de isoerosividad, que divide al país en catorce regiones, de las cuales, el ejido Pánuco se ubica en la región 4 y cuya ecuación es la siguiente:

$$Y = 2.8959X + 0.002983X^2 \dots\dots (2)$$

En donde Y es el factor R en términos de MJ mm/ha-hr y X es la lluvia anual en mm.

Para la estimación de los valores del parámetro K , se utilizó una tabla de valores de erosionabilidad⁽¹⁷⁾. El factor K está en función de la textura y clase de suelo. Estos valores fueron asignados a las clases de suelo y texturas dentro de los terrenos ejidales, las cuales fueron digitalizadas para facilitar su manejo dentro de los SIG, por medio del programa

retention of soil and water, such as leveled borders and stumps) have been recorded⁽¹⁶⁾. This experimental evaluation provided values for the vegetation parameter (C) which could be used to represent an ideal vegetation scenario for the entire ejido. However, measured values could not be used for the other equation variables, even when these came from measurements taken within the ejido, because they are point values representing only measurement site condition and do not include existing spatial variation. The missing USLE parameter values were estimated using the methodology of Figueroa⁽¹⁷⁾. An isoerosivity map was used to estimate the R factor (this map is divided into 14 regions of which the Pánuco ejido is in region 4), with the following equation:

$$Y = 2.8959X + 0.002983X^2 \dots\dots (2)$$

Where Y is the R factor in terms of MJ mm/ha-hr and X is annual rainfall in mm.

The K parameter variables estimation was done using a table of erosionability values⁽¹⁷⁾. The K factor is a function of soil texture and class. These values were assigned to soil classes and textures within the ejido and then digitalized to facilitate use in the GIS, using the IDRISI computer software program⁽¹⁸⁾. The LS parameter was estimated by assigning values to combinations of slope and slope length. This was done using an altitude map (digital elevation model) and developing successive maps for each possible combination. These combinations produce images with independent variables and these can be accumulated into a single image.

Finally, the GIS was used to integrate the images and values according to equation 1. The previous procedure was used to estimate potential water erosion, water erosion for different native and induced vegetation conditions and water erosion under rangeland and grazing exclusion conditions. Images used in all cases were 3.24 ha/pixel resolution.

Spatial information analysis of the agricultural area was mainly based on geostatistics. Semivariograms⁽¹⁹⁾ were built using the OM and granulometry data and the GS+ computer software

IDRISI⁽¹⁸⁾. En cuanto a la estimación del parámetro LS, se asignaron valores a combinaciones de pendientes y la longitud de la misma. Para esto se utilizó un mapa de altitudes (modelo de elevaciones digitales), y se desarrollaron mapas sucesivos de cada combinación posible; y dado que las combinaciones producen imágenes con valores independientes, estos pudieron sumarse en una sola imagen.

Finalmente por medio de SIG se integraron las imágenes y valores de acuerdo con la ecuación 1. Con el procedimiento anterior se estimó la erosión hídrica potencial, la erosión hídrica para diferentes condiciones de vegetación nativa e inducida, y la erosión hídrica para condiciones de pastoreo y exclusión. En todos los casos, las imágenes se trabajaron con una resolución de 3.24 ha por píxel.

En el caso de la área agrícola, el análisis de la información espacial se basó principalmente en el uso de geoestadística. Con los datos de MO y granulometría se construyeron semivariogramas⁽¹⁹⁾, utilizando para ello el programa GS+⁽²⁰⁾ tanto para verificar la correlación espacial de cada indicador, así como para interpolar los resultados por medio de Kriging⁽¹⁹⁾. Una vez que los mapas por indicador fueron generados, los valores presentes en él, fueron agrupados en rangos. En el caso del contenido de MO se generaron cuatro rangos de porcentaje: de 1 a 1.5, 1.5 a 2, 2 a 2.5 y mayor a 2.5 %. En el caso de los valores de granulometría, se consideraron cuatro rangos que fueron porcentajes de partículas mayores a 2 mm de diámetro (35 a 40, 40 a 45, 45 a 50, y 50 a 55 %), considerando que una vez rebasado el 35 % de presencia de grava y obstáculos de mayor tamaño, los suelos ya no son aptos para practicar la agricultura⁽²¹⁾. Por medio del programa IDRISI, los dos mapas fueron sobrepuestos, y de allí se obtuvieron siete combinaciones que integran ambos mapas, los cuales describen la interacción de dos características del suelo. De las combinaciones obtenidas, se separaron aquellas áreas que presentaron los valores más bajos de materia orgánica, y los valores más altos de contenido de partículas mayores a 2 mm. Las clases de valores extremos se sobrepusieron a un mapa de suelos del ejido, del cual se separaron los suelos de la clase litosol, la cual es considerada apta sólo

programa⁽²⁰⁾ to both verify the spatial correlation of each indicator and interpolate the results via Kriging⁽¹⁹⁾. Once the indicator maps were generated their values were grouped into ranges. Four percentage ranges were generated for OM content: 1 to 1.5; 1.5 to 2; 2 to 2.5; and > 2.5 %. Four ranges were also generated for the granulometry values indicating the percentage of particles > 2 mm diameter: 35 to 40; 40 to 45; 45 to 50; and 50 to 55 %. The 35 %⁽²¹⁾ low value was used because above this soil percentage the percentage of gravel and larger obstacles makes soils unsuitable for agriculture.

These two maps were then superimposed using the IDRISI program. From this, seven combinations were obtained integrating both maps, which describe the interaction of the two soil characteristics. These values separated those areas with the lowest OM values and highest values of particles > 2 mm. The extreme value classes were then superimposed on a soils map of the ejido. The litosol soil class was separated from this as it is considered suitable only for grazing and a second criterion was that the litosol soil be within the agricultural area. This resulted in definition of those areas with low suitability for agriculture that are appropriate for reconversion.

Water erosion data for the rangeland was mapped using the IDRISI program. For each of the USLE (equation 1) factors a map was made representing the values as isolines over a determined area (i.e. Panuco ejido). The images corresponding to each factor in equation 1 were then multiplied, allowing the production of water erosion maps of the entire rangeland area with a homogenous ideal condition. Tables were then made to facilitate results discussion and the areas most prone to water erosion located.

RESULTS AND DISCUSSION

Soils within the agricultural area at Panuco ejido are mostly xerosol, castañozem and fluvisol classes. According to the FAO/UNESCO, as modified by CETENAL⁽¹⁰⁾, these soil classes are found in the arid and semiarid zones of northern Mexico and can be used for seasonal agriculture. There are

para labores pecuarias, pero además, como un segundo criterio, que el suelo litosol se ubicara dentro de la área agrícola. La sobreposición de los mapas mencionados dio como resultado una definición de áreas de reducida aptitud agrícola, las cuales son susceptibles de ser reconvertidas.

En el caso del agostadero, la información de erosión hídrica fue mapeada utilizando el programa IDRISI. De cada uno de los factores de la USLE (ecuación 1) se desarrolló un mapa que representa iso-líneas de valores sobre un espacio determinado (ejido Pánuco). Posteriormente, con el uso del programa IDRISI, se multiplicaron las imágenes correspondientes a cada factor de la ecuación 1. Esto permitió la elaboración de mapas de erosión hídrica, de todo el agostadero, con una condición homogénea ideal. Después se construyeron cuadros para facilitar la discusión de los resultados. Finalmente se ubicaron las áreas con mayor susceptibilidad a la erosión hídrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de la área agrícola sobresalen los suelos de la clase xerosol, castañozem y fluvisol, los cuales, de acuerdo con FAO/UNESCO modificado por CETENAL⁽¹⁰⁾, son suelos propios de zonas áridas y semiáridas del norte de México, y pueden ser usados para realizar agricultura de temporal. Sin embargo, existen 886 ha de suelos tipo litosol eutrico (Cuadro 1), cuya utilización agrícola está condicionada por la disponibilidad de humedad y por su reducida profundidad.

also, however, 886 ha of eutric litosol type soils (Table 1) which require humidity for agricultural use due to their shallowness.

The litosol and xerosol soil classes were the only ones present in the rangeland, the former being predominant. This paucity of soil classes is due to the rangeland being located in the high altitude portion of the ejido, on the hillsides. There are 208 ha of xerosol within the communal rangeland (Table 1) which are appropriate for agriculture and have greater litosol development. These soils generally have a deeper profile and clay accumulation or calcium carbonate precipitation horizons. When vegetation is removed from xerosols they are more prone to water and wind erosion than litosols meaning they are more exposed to deterioration.

Agricultural area

The geostatistical analysis results indicate that the variables organic material and soil particle size greater than 2 mm are spatially correlated. This was verified with the adjustment shown by the low R² values and sum of squares values for the calculated variograms. Spatial correlation is a necessary condition for an interpolation via Kriging⁽¹⁹⁾. A map was then generated for each indicator, and with these maps and the IDRISI GIS⁽¹⁸⁾ a third map was obtained that integrated both indicators and produced a new classification (Table 2). The new classes are combinations of both indicators and they separate the classes with

Cuadro 1. Clases de suelo en las áreas agrícola y pecuaria del ejido Pánuco, Zacatecas (ha)

Table 1. Soil class area in the agricultural and rangeland areas of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico (ha)

Soil classes	Agricultural		Rangeland		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%
Luvic castañozem	214	4.36	0	0	214	4.36
Calcareous fluvisol	22	0.45	0	0	22	0.45
Eutric litosol	886	18.03	2,262	46.02	3,148	64.05
Luvic xerosol	1322	26.90	208	4.24	1530	31.14
Total	2,444	49.74	2,470	50.26	4,914	100.0

En la área de agostadero, se detectaron sólo dos clases de suelos, litosol y xerosol, predominando el primero, debido a que el agostadero se ubica en la parte alta y laderas de los cerros. Hay 208 ha de suelo de la clase xerosol dentro del agostadero comunal (Cuadro 1), las cuales son apropiadas para actividades agrícolas, y presentan un mayor desarrollo que los litosoles. Generalmente presentan mayor profundidad del perfil y horizontes de acumulación de arcillas o precipitación de carbonato de calcio. Cuando los xerosoles están desprovistos de vegetación son más susceptibles a la erosión hídrica o eólica que los litosoles, por lo que pudieran estar más expuestos al deterioro.

Área agrícola

Los resultados del análisis geoestadístico indican que las variables materia orgánica y tamaño de partícula de suelo mayor a 2 mm, se correlacionan espacialmente. Esto se verificó a través del ajuste que mostraron los valores de R^2 , y los valores de la suma de cuadrados de los residuales de los variogramas calculados, los cuales fueron bajos. La correlación espacial es una condición necesaria para realizar una interpolación por medio de Kriging⁽¹⁹⁾. Como siguiente paso se generó un mapa para cada indicador; con estos mapas y con ayuda del sistema de información geográfica IDRISI⁽¹⁸⁾, se obtuvo un tercer mapa, el cual integró ambos indicadores y produjo una nueva clasificación que se detalla en el Cuadro 2. Las nuevas clases son combinaciones de ambos indicadores, y separan

the lowest organic material values and highest values for percent of soil greater than 2 mm in diameter, which are classified as having the lowest productive capacity. It also generates the opposite classes, that is, those with the lowest percentage of soil with greater than 2 mm diameter and highest organic material values, which have the highest productive capacity.

A third step in separating the soils most suitable for reconversion was to superimpose the litosol soil class on the agricultural areas. This showed where the low productive capacity litosol class is and indicated the areas that should be reconverted to rangeland. The results indicate that there are three reconversion levels, which are classified as potential livestock activity areas (Figure 1). A total of 754 ha inside the agricultural area were classified as suitable for livestock activities. Of these, 41 ha are classified as suitable for light livestock activity, 161 ha for moderate livestock activity and 552 ha for heavy livestock activity. All these areas are within an extension of the ejido on its northern edge which was only recently opened to agriculture.

Of the 886 ha of litosol in the agricultural area, only 133 ha remained outside the classes obtained by superimposing indicators. This suggests that not all the litosol class soils should be reconverted, just those for which the level of deterioration and physical limitations surpass acceptable levels. Reconversion plans for these areas should include technological options that allow an increase in

Cuadro 2. Número de hectáreas y características de suelo de la clase litosol ubicadas en la área agrícola del ejido Pánuco, Zacatecas

Table 2. Litosol area and characteristics in the agricultural area of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico

Soil Characteristics		Area (ha)	Class Name
Soil > 2 mm	OM = 1.0 – 1.5	41	Low livestock
(50-55%)	OM = 1.5 – 2.0	161	Medium livestock
Soil > 2 mm	OM = 1.0 – 1.5	0	-----
(45-50%)	OM = 1.5 – 2.0	552	High livestock
Total		754	

OM = organic matter (%).

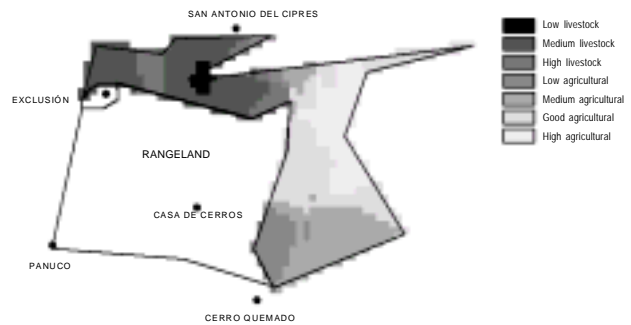
las clases de valores más bajos de materia orgánica, con los valores más altos de porcentaje de suelo con diámetro mayor a 2 mm, que se clasifican como de menor capacidad productiva. También, genera las clases opuestas, es decir, las de menor porcentaje de suelo con diámetro mayor a 2 mm, y valores altos de materia orgánica, las cuales son de mayor capacidad productiva.

Un tercer paso para separar los suelos de mayor susceptibilidad para ser reconvertidos, fue sobreponer los suelos de la clase litosol dentro del área agrícola; de esta manera, los suelos de menor capacidad productiva de la clase litosol deberán ser reconvertidos hacia la actividad pecuaria. Los resultados indican que hay tres niveles de reconversión, los cuales son clasificados como áreas de actividad pecuaria como aptitud potencial (Figura 1). Los suelos de mayor necesidad de reconversión son 41 ha, los cuales son considerados como aptos para actividad pecuaria baja, seguidas por 161 que se clasificaron como aptos para actividad pecuaria media; un tercer grupo de 552 ha fue clasificado como de actividad pecuaria alta. En total la superficie dentro del área agrícola que fue clasificada como apta para actividades pecuarias es de 754 ha, y se ubica en su totalidad en la parte norte del ejido, la cual es una ampliación del mismo, y que fue abierta al cultivo en los últimos años.

Del total de la superficie de la clase litosol dentro del área agrícola (886 ha), sólo 133 ha quedaron fuera de las clases obtenidas con la sobreposición de indicadores, lo que indica que no todos los suelos de la clase litosol deberán ser reconvertidos, sino sólo aquellos cuyo nivel de deterioro y limitaciones físicas hayan rebasado los niveles aceptables. Los planes de reconversión para estas áreas deberán incluir opciones tecnológicas que permitan incrementar la cobertura vegetal con especies de rápido establecimiento, como cereales, pastos, y en algunos casos con arbustos, además de la inclusión de prácticas mecánicas para incrementar la captación de humedad, lo que permitirá un regreso gradual a su condición inicial.

Figura 1. Clasificación de aptitud productiva sugerida en base a indicadores de suelo en la área agrícola del ejido Pánuco, Zacatecas

Figure 1. Suggested productive suitability based on soil indicators in the agricultural area of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico



vegetation cover with species that establish themselves quickly, such as cereals, grasses and some bushes. It should also include mechanical methods to increase humidity retention and allow a gradual return to its initial condition.

Rangeland

The estimated average erosivity factor (R), using equation 2, was 670.8 (MJ mm/ha-hr), which corresponds to the intermediate value reported by other researchers⁽¹⁶⁾ over a four-year period (382.9 to 2110.3) (Table 3). The K values obtained with the methodology of Figueroa *et al.*⁽¹⁷⁾ varied from 0.019 for litosols, to 0.039 for castañozem to 0.079 for xerosols. Given the soils classes and textures on the ejido, these values are much higher than those reported by Serna and Echavarría⁽¹⁶⁾ for litosol (0.0023). This is likely because these authors used a potential erosion plot without vegetation instead of a parcel subject to traditional, continuous farming⁽⁸⁾.

Overestimations have been reported in total quantity of lost soil when using a model designed for estimation of soil loss in agricultural areas and not in rangeland⁽²²⁾. The rockiness and caliche outcrops in rangeland, as well as the natural compaction of the soil surface due to lack of farming, act as soil

Cuadro 3. Valores de los parámetros usados para elaborar los mapas de erosión en la área de agostadero del ejido Pánuco, Zacatecas

Table 3. Values for parameters used in mapping water erosion in the rangeland of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico

Source	Factors		
	R	K	C
Figueroa <i>et al.</i> ⁽¹⁷⁾	670.8	0.019 Litosol 0.039 Castañozem 0.079 Xerosol	0.0365 grass 20 % base cover 0.014 grass 60 % base cover
Serna and Echavarría ⁽¹⁶⁾	382.9 – 2110.3	0.002 ± 0.001 Litosol	0.0016 Dense cactus 0.0136 Medium bush 0.1586 Low bush 0.1701 F. Saltbush – cactus 0.2607 F. Saltbush – border

R= Rain erosivity factor (MJ-mm/ha-h)

K= Soil erodability factor (t-ha-h/MJ-mm-ha)

C= Vegetation factor (adimensional)

Agostadero

Los valores de los parámetros de la USLE utilizados se muestran en el Cuadro 3. El factor de erosividad promedio estimado (R) utilizando la ecuación 2 fue de 670.8 (MJ mm/ha-hr), el cual corresponde a un valor intermedio al obtenido por otros investigadores⁽¹⁶⁾ en cuatro años (382.9 a 2110.3). Dadas las clases de suelo presentes en el ejido Pánuco y las texturas de cada una de ellas, los valores de K variaron desde 0.019 para los litosoles, 0.039 para castañozem y 0.079 para xerosoles, valores mucho más grandes que los obtenidos por Serna y Echavarría⁽¹⁶⁾ para el litosol (0.0023), debido principalmente a que estos autores utilizaron una parcela de erosión potencial desprovista de vegetación, en lugar de la tradicional parcela en labranza continua⁽⁸⁾. Se han señalado sobrestimaciones en la cantidad total de pérdidas de suelo, por el uso de un modelo diseñado para evaluar pérdidas de suelo en áreas agrícolas y no de agostadero⁽²²⁾. En los terrenos de agostadero, la pedregosidad y los afloramientos de caliche existentes, además de la compactación natural de la superficie debido a la ausencia de la labranza, actúan como agentes de estabilidad del suelo, lo que incrementa la resistencia al desprendimiento y transporte, y reduce los valores de erosión, lo que

stability agents. They increase its resistance to separation and transport and reduce the erosion values, which explains the K datum reported by Serna and Echavarría⁽¹⁶⁾. This datum, however, only represents one soil type while the rangeland in the present study area has spatial variation. Because of this difference the estimates determined with the methodology of Figueroa *et al.*⁽¹⁷⁾ were used in the present study.

Potential erosion values for the xerosol class are greater than those for the litosol class due to the xerosols' higher susceptibility to erosion (K= 0.079) (Table 4). These are deeper and more developed than litosols, and thus have greater productive potential when managed properly. When xerosols are present in grazing areas they require adequate vegetation cover to avoid degradation from water erosion. A total of 208 ha of xerosols are present in the communal rangeland at the ejido and these should be given priority in conservation plans due to their high erosion susceptibility.

Mean water erosion values recorded fall into six general categories (Table 5). The highest value is that of erosion potential (no vegetation cover), followed by areas with Fourwing Saltbush (*Atriplex*

Cuadro 4. Valores de erosión hídrica potencial (t/ha) por clases de suelo y superficies en la área de agostadero del ejido Pánuco, Zacatecas

Table 4. Potential water erosion values (t/ha) by soil class and area in rangeland of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico

	Range	Mean	Standard deviation	Area (ha)
Litosols and xerosols	0-150.95	11.07	11.37	2470
Litosols	0-130.39	8.65	5.88	2262
Difference*		2.42	-----	208

* attributed to xerosols

Cuadro 5. Valores de erosión hídrica en diferentes tipos de cubierta vegetal en la área de agostadero del ejido Pánuco, Zacatecas (t/ha)

Table 5. Water erosion values in different vegetation coverage types in the rangeland of the Panuco ejido, Zacatecas, Mexico (t/ha)

	Estimated range	Mean	Standard deviation	Measured range
Potential erosion	0 - 130.39	8.65	5.88	0.36 - 7.08
F. Saltbush +borders	0 - 34.00	2.25	1.53	0.03 - 1.08
F. Saltbush + cactus	0 - 22.17	1.47	1.00	0.05 - 1.00
Low bush	0 - 20.68	1.37	0.93	0.09 - 0.91
Grassland	0 - 18.25	1.21	0.82	0.11 - 0.75
Medium bush	0 - 1.77	0.12	0.08	0 - 0.05
Dense cactus	0 - 0.20	0.01	0.00	0 - 0.01

explica el dato de K obtenido por Serna y Echavarría⁽¹⁶⁾. Sin embargo, el dato obtenido sólo representa un tipo de suelo, y dada la variación espacial presente en el agostadero, se prefirió utilizar los estimados a partir de la metodología de Figueroa *et al.*⁽¹⁷⁾.

Los valores de erosión potencial son mayores en la clase de suelo xerosol que en litosol (Cuadro 4), debido principalmente a una mayor susceptibilidad a la erosión de los xerosoles ($K= 0.079$), que son suelos con mayor profundidad y más desarrollados que los litosoles, por lo que presentan un mayor potencial productivo cuando son manejados adecuadamente. Cuando estos suelos se encuentran en áreas dedicadas al pastoreo, es necesario mantener una cubierta vegetal adecuada para evitar

cannecens) with edges at surface level (2.2 t/ha). When Fourwing Saltbush is established in the bottom of water holding cavities associated with trailing cactus, which form a protective barrier, erosion potential decreases (1.47 t/ha). These are followed by four native vegetation cover conditions under grazing exclusion that range from low bush cover, to grasslands, to medium bush to maximum erosion protection in dense cactus.

The erosion gradient measured in the grazing exclusion area, or USLE estimated area, demonstrates the behavior of the two technological intervention types in the rangeland. The lowest erosion values are in those treatments in which no soil movement took place and only exclusion was used.

que la acción erosiva de la lluvia los degrade. La superficie ocupada por xerosoles en el agostadero comunal es de alrededor de 208 ha, las cuales deberán ser consideradas como prioritarias en planes de conservación debido a su susceptibilidad a la erosión.

Los valores medios de erosión hídrica (Cuadro 5) se presentan en orden descendente, y ubican en primer lugar a los valores de erosión potencial (sin cubierta vegetal); posteriormente la que se obtiene al establecer chamizo (*Atriplex canescens*) con bordos a nivel (2.2 t/ha), y la obtenida cuando se establecen chamizos en fosas asociados con nopal rastrero, usando este último como barrera protectora (1.47 t/ha). Por último, los niveles siguientes se refieren a erosión en áreas de vegetación nativa bajo exclusión. Las cuatro condiciones se presentan en un gradiente de cobertura que va desde el matorral de cobertura baja, pastizal, matorral medio y una condición de máxima protección que es la de nopalera densa.

El gradiente de erosión medido en la área excluida o estimado con la USLE, sirve para observar el comportamiento de los dos tipos de intervenciones tecnológicas en el agostadero. Los valores más bajos de erosión se presentan en aquellos tratamientos donde no se realizó ningún movimiento de suelo, y donde sólo se dio un tratamiento de exclusión (descanso).

Cuadro 6. Rendimiento de materia seca de material herbáceo y porcentaje de cobertura basal en condición de exclusión y en pastoreo continuo

Table 6. Dry matter (DM) yield from herbaceous material and base cover (BC) percentage under grazing exclusion and continuous grazing conditions

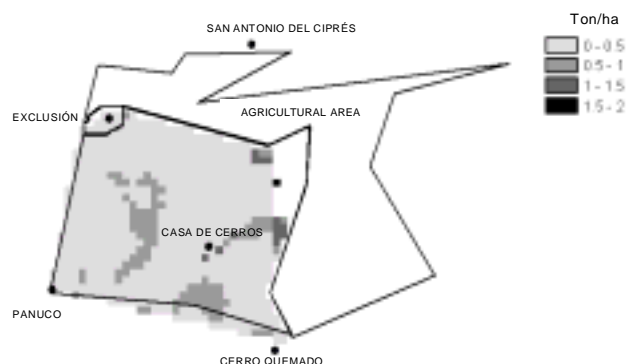
Year	Management condition			
	Grazing exclusion		Continuous grazing	
	DM (kg/ha)	BC (%)	DM (kg/ha)	BC (%)
1998	1164		300	
1999	1130		174	
2001	602	58	138	20
2002	803	63	121	22

Dry matter from herbaceous material values for the areas inside and outside the grazing exclusion area were at least 50 % higher in the exclusion area in all cases (Table 6). In 2001 and 2002 the herbaceous material values decreased due to intrusions by cattle into the exclusion area. Despite this intrusion, base cover values for these years were still around 60 %. The average water erosion value for 60 % base cover under grazing exclusion conditions was 1 t/ha (Figure 2).

Dry matter values for continuous grazing areas during 2001 and 2002 fluctuated from 174 to 300 kg/ha (Table 6) with base cover around 20 %. Estimated erosion for the communal rangeland under these conditions was 3 t/ha, which is representative of its current condition (Figure 3). Other, lower erosion values were recorded in other portions of the rangeland area; of these, the highest were associated with induced vegetation treatments. High values for induced treatments come from the soil movement required for planting bed preparation, which eliminates the original vegetation cover that protected the soil. Lower erosion values correspond to erosion under conditions of greater coverage with the lowest values in grazing exclusion areas. This is because these areas do not experience any

Figura 2. Erosión hídrica estimada considerando la condición de exclusión al pastoreo ($C = 0.014$) y sin incluir los suelos de la clase xerosol

Figure 2. Estimated water erosion including grazing exclusion condition ($C = 0.014$) and excluding xerosol soils class



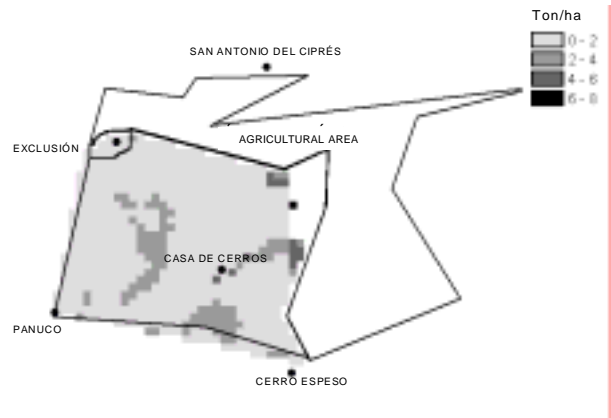
Los valores de rendimiento de materia seca del material herbáceo dentro de una área excluida al pastoreo y fuera de la misma, se presentan en el Cuadro 6. En todos los casos, las diferencias en los valores son al menos mayores al 50 % a favor de la exclusión. En los años 2001 y 2002, los valores de material herbáceo disminuyeron debido a intromisiones de ganado dentro del área excluida; a pesar de eso, los valores de cobertura basal en 2001 y 2002 fueron de alrededor del 60 %. Los valores de erosión estimados considerando un 60 % de cobertura basal bajo la condición de exclusión al pastoreo, se presentan en la Figura 2. El valor promedio de erosión hídrica para esta condición fue de 1 t/ha.

Los valores de materia seca con pastoreo continuo en los años 2001 y 2002, fluctuaron entre 174 y 300 kg/ha (Cuadro 6), y los valores de cobertura basal fueron de alrededor del 20 %; con esta cobertura se estimó la erosión para todo el agostadero comunal, y con el cual se obtuvo un valor promedio de 3 t/ha, los cuales representan la condición actual del agostadero del ejido (Figura 3). Sin embargo, otros valores de erosión menores que el obtenido con pastoreo continuo se presentan para toda la área de agostadero. De estos, los valores más altos de erosión se asocian con los tratamientos de vegetación inducida; esto es debido al movimiento del suelo con fines de preparación de cama de siembra, lo que a su vez eliminó la cubierta vegetal que originalmente protegía al suelo. Los valores siguientes corresponden a la erosión obtenida en condiciones de mayor cobertura. Los valores de erosión más bajos fueron aquellos relacionados con el descanso (exclusión al pastoreo), debido a que no sufrieron ninguna alteración ecológica ajena a las condiciones naturales del sitio (Cuadro 5 y Figura 2).

Es importante destacar también, que los costos (no evaluados en este estudio) son menores cuando se realiza una intervención tecnológica de exclusión y empotrado con la finalidad de realizar un pastoreo controlado, que cuando se realiza una intervención tecnológica con establecimiento de especies vegetales y movimiento de suelo. Esto último no sólo implica un costo material, sino también, el

Figura 3. Erosión hídrica estimada considerando la cobertura vegetal para pastoreo continuo (C = 0.0365) sin incluir los suelos de la clase xerosol

Figure 3. Estimated water erosion including continuous grazing vegetation cover (C = 0.0365) and excluding xerosol soils class



ecological alteration from natural site conditions (Table 5; Figure 2).

An important aspect of exclusion/pasturing intervention technology in the establishment of controlled grazing is that the costs (which are not evaluated in this study) are lower than for intervention using induced plantings and soil movement. This is because the latter treatment not only implies materials cost but also the ecological costs of causing certain seasonal soil instability and consequently increasing erosion levels. An additional cost is that of maintaining the site in its new condition^(23,24). Based on this, the cost of soil preparation, planting and maintenance are important considerations when planning the rehabilitation of deteriorated sites⁽²⁵⁾.

Drastic modification of a rangeland ecosystem is sometimes required. An accepted criterion for determining if this is necessary is if the perennial native species are almost completely eliminated⁽²⁶⁾. This indicates that forage condition has become poor or very poor. If forage condition is still regular to good, rotating grazing may be sufficient to improve rangeland condition, though quantifying the threshold beyond which revegetation is required

costo ecológico de inducir cierta inestabilidad temporal del suelo, y por consiguiente aumentos en los niveles de erosión. Además, debe considerarse la inversión requerida para mantener el sitio en la nueva condición^(23,24). De ahí que el alto costo de preparación de suelos, la siembra y el mantenimiento, son consideraciones que deben hacerse cuando se pretende rehabilitar sitios deteriorados⁽²⁵⁾.

Algunas veces se requiere una modificación drástica del ecosistema de un agostadero. Un criterio aceptado es detectar si las especies nativas perennes están casi completamente eliminadas⁽²⁶⁾. Esto es una indicación de que la condición del forraje es de pobre a muy pobre; si la condición es regular o buena, el pastoreo rotacional puede ser suficiente para mejorar la condición del agostadero; sin embargo, es difícil cuantificar el umbral de decisión para realizar la revegetación. Reportes como el de Cox y Jordan⁽²⁶⁾ permiten tener una idea de cuándo practicar mejoramiento del pastizal; estos autores encontraron que una plántula de *Eragrostis* spp por metro cuadrado era suficiente para mantener una densidad aceptable en Arizona, EUA.

En evaluaciones dentro del ejido Pánuco y en otros seis sitios de estudio distribuidos en el Estado, se han registrado valores promedio de 20 % de cobertura basal, lo que al contrastarse con el 60 % de cobertura obtenido dentro del área de exclusión de Pánuco, muestra con claridad que existe un potencial de condición y productividad del pastizal que puede ser recuperado. La práctica inicial sugerida para la recuperación es el manejo del pastoreo rotacional (cuatro potreros), sin descartar la opción de revegetación para condiciones de deterioro mayores o de menor cobertura basal⁽²⁸⁾.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

La superficie susceptible de ser reconvertida dentro del área agrícola presenta diferentes grados de falta de aptitud. El total de la superficie identificada para reconvertir es de 753 ha. La superficie de agostadero que requiere mayor

is difficult. Cox and Jordan⁽²⁶⁾ provide an idea of when to initiate pasture improvement. They found that a single *Eragrostis* spp. plant per square meter was enough to maintain density in Arizona, USA.

Pasture evaluations on Panuco ejido and at six other study sites in the state have produced values of 20 % base cover. The 60 % recorded in the exclusion area at Panuco clearly shows that there are a potential pasture condition and productivity that can be recovered. The initial suggested method for pasture recovery is rotational grazing management (four pastures), though revegetation is an option given serious deterioration or low base cover conditions⁽²⁸⁾.

CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

The surface within the agricultural area appropriate for reconversion has different degrees of unsuitability. The total area identified for reconversion is 753 ha and the rangeland area requiring attention due to erosion susceptibility is 208 ha. Fallowing and a rotational grazing system is a technological option for the rangeland at Panuco that will allow the reduction of erosion levels and gradual recovery of the soils.

ACKNOWLEDGEMENTS

Our sincere thanks to the Panuco ejido members and leaders for allowing experimental use of their rangeland. Special thanks to Conrado López-Nieto for his help during the surveys and soil sampling around the ejido.

End of english version

atención debida a su susceptibilidad a la erosión es de 208 ha. El descanso y un sistema de apacentamiento rotacional es una opción tecnológica para el agostadero de Pánuco, que permitirá una reducción en los niveles de erosión del ejido y una recuperación gradual.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de ejidatarios y autoridades del ejido Pánuco, por permitir el uso del agostadero con fines experimentales, especialmente se agradece la colaboración del Ing. Conrado López Nieto en los recorridos y muestreo de suelos alrededor del Ejido.

LITERATURA CITADA

- Diario Oficial de la federación. Lineamientos y mecanismo específico de operación del subprograma de apoyos a la conversión del cultivo de frijol, del ciclo primavera verano 2002, por el cultivo de avena forrajera, del estado de Zacatecas. Gobierno de la República. 27 de septiembre de 2002:19-26.
- Comisión de estudios para el territorio nacional (CETENAL). Sistemas de clasificación de la capacidad agrológica de la tierra. Gobierno de México. 1968.
- Comisión de estudios para el territorio nacional (CETENAL). Sistemas de clasificación de la tierra para uso potencial. Secretaría de la Presidencia. Boletín especial. 1973.
- Gotway CA, Ferguson RB, Hergert GW, Peterson TA. Comparison of Kriging and inverse methods for mapping soil parameters. *Soil Sci Soc Am* 1996;60:1237-1247.
- Liebhold AM, Rossi RE, Kemp WP. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Ann Rev Entomol* 1993;38:303-327.
- Medina GG, Ruiz CJA, Martínez PARA, Ortiz VM. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agric Téc Méx* 1997;23(1):69-90.
- DeMers MN. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. 2nd ed. New York, USA: John Wiley and Sons; 2000.
- Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, *Agric Handbook* 537, Washington, DC. USA. 1978.
- Ortiz VM. Datos climatológicos del estado de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Zacatecas, Campo Experimental Zacatecas, México. 1990.
- FAO/UNESCO. Soil classification system. FAO. Rome. Italy. 1968.
- Comisión Técnico Consultiva para la Condición de Agostaderos (COTECOCA). Determinación de coeficientes de agostadero, Zacatecas y Aguascalientes. 1980.
- Rzedowski J. *Vegetación de México*. México: Edit. Limusa; 1978.
- Winter EJ. *El agua, el suelo y la planta*. 2ª ed. México, DF: Editorial Diana; 1977.
- Kincaid DR, Williams G. Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement treatments. *J Range Manage* 1966;(19):346-351.
- Pieper RD. Técnicas de medición para vegetación herbácea y arbustiva. Departamento de ciencias animales de los pastizales y de la fauna silvestre. Universidad Estatal de Nuevo México. Las Cruces, Nuevo México. 1973.
- Serna PA, Echavarría CHFG. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I Pérdidas de suelo. *Téc Pecu Méx* 2002;40(1):37-53.
- Figueroa SB, Amante OA, Cortés THG, Pimentel LJ, Osuna CES, Rodríguez OJM, Morales FFJ. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de postgraduados. México. 1991.
- Eastman RJ. *IDRISI for windows: User's guide (Ver 1.0)*. Clark University. 1995.
- Isaaks EH, Srivastava RM. *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press; 1989.
- Robertson GP. *GS+*, Geostatistics for the environmental sciences. Plainwell, Michigan USA: Gamma Design Software; 1998.
- SARH. *Manual de conservación del suelo y agua*. Colegio de Posgraduados. México. 1982.
- Spaeth KE, Pierson FB, Weltz, MA, Blackburn WH. Evaluation of USLE and RUSLE estimated soil loss on rangelands. *J Range Manage* 2003;56(3):234-247.
- Evans RA, Young JA. Seedbed microenvironment, seedling recruitment, and plant establishment on rangeland. In: Frasier GW editor. *Proceeding of symposium seed and seedbed ecology of rangeland plants*. USDA-ARS. 1987:212-220.
- Wiedemann HT. Engineering seeding systems for restoration of rangelands In: Frasier GW editor. *Proceeding of symposium seed and seedbed ecology of rangeland plants*. USDA-ARS 1987:292-298.
- Ethridge DE, Sherwood RD, Sosebee RE, Herbel CH. Economic feasibility of rangeland seeding in the arid southwest. *J Range Manage* 1997;50:185-190.
- Holechek JL, Pieper RD, Herbel CH. *Range management: principles and practices*. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA. Prentice-Hall, Inc; 1998.
- Cox JR, Jordan GL. Density and production of seeded range grasses in southeastern Arizona. *J Range Manage* 1983;36:619-652.
- INIFAP. *500 Tecnologías llave en mano*. SAGAR-INIFAP. México. 1999.

