

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA DEGRADACIÓN AGROAMBIENTAL A TRAVÉS DEL USO DEL SISTEMA MICROLEIS EN LOS SUELOS DE LOS LLANOS CENTRALES DE VENEZUELA

Diosey Ramón LUGO-MORIN¹ y Juan Carlos REY²

¹ Instituto Nacional de Tierras (INTi). Urb. Vista Alegre, C/ San Carlos. Qta. La Barranca. C.P: 1010 Caracas. Venezuela (morin@colpos.mx)

² Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA/CENIAP). Av. Universidad, El Limón. Apdo. 4653 Maracay 2105. Venezuela (jcrey@inia.gov.ve)

(Recibido octubre 2007, aceptado agosto 2008)

Palabras clave: *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, pastos, erosión, agrocontaminación, MicroLEIS

RESUMEN

La degradación de suelos agrícolas en Venezuela está actualmente en franco crecimiento, debido fundamentalmente a problemas relacionados con prácticas de manejo inadecuadas en diferentes usos agropecuarios. Con el propósito de realizar una evaluación del riesgo o vulnerabilidad a la erosión hídrica y a la agrocontaminación del sector Río Orituco-Chaguaramas del Estado Guárico de Venezuela, se evaluaron catorce unidades de tierra de la zona de interés frente a cuatro diferentes usos agropecuarios: maíz, sorgo, pasto con y sin fertilización. La evaluación se realizó con el sistema informático denominado MicroLEIS, a través del modelo Raizal (erosión hídrica) y Pantanal (agrocontaminación), los cuales permiten determinar la vulnerabilidad potencial, de manejo y actual agroambiental. Los resultados indicaron que la vulnerabilidad actual a la erosión hídrica bajo los usos de maíz y sorgo, fueron altas y muy altas en 30% del área de estudio debido a la confluencia de suelos con alta erosionabilidad y el uso de prácticas de manejo convencionales; sin embargo, para los pastos la vulnerabilidad actual a la erosión hídrica fue baja en toda el área, debido a la buena cobertura que ofrece y a la baja carga animal que utilizan los sistemas ganaderos de la zona. Por otra parte, la vulnerabilidad actual a la agrocontaminación por fósforo, nitrógeno, metales pesados y plaguicidas para los usos de maíz, sorgo y pastos con fertilización fue alta en más del 65% de la superficie, debido al uso excesivo de agroquímicos de alta persistencia en combinación con la susceptibilidad de los suelos a la alta escorrentía superficial, la baja capacidad de absorción de cationes (textura y mineralogía) y la baja capacidad de biodegradación de los pesticidas (bajos niveles de materia orgánica). Mediante la elaboración de mapas se ubica cuales son las zonas de mayor vulnerabilidad donde se recomienda la implementación de prácticas como el uso de cultivos protectores (pastos) en rotación con cultivos más limpios (maíz y sorgo), uso de mulch, labranza conservacionista y labranza en contorno con barreras vivas para el maíz y el sorgo, uso de franjas amortiguadoras intercaladas con cultivos limpios, el uso de agroforestería para las explotaciones ganaderas y el uso racional de agroquímicos para evitar los problemas de contaminación ambiental.

Key words: *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, pasture, erosion, agrocontamination, MicroLEIS

ABSTRACT

The agricultural ground degradation in Venezuela is dramatically increasing, mainly due to problems related to inadequate practices in handling different farming usages. In order to make an evaluation of the risk or vulnerability to the hydric erosion and the agrocontamination of the Orituco River-Chaguaramas Sector of the Guarico State of Venezuela, fourteen land units of the zone of interest were evaluated within four different farming usages: maize (*Zea mays*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and pasture with-without fertilization. The evaluation was done with Raizal and Pantanal models, a land evaluation decision support system (MicroLEIS) which allowed to determine the potential, present and handling vulnerability, according to the erosion (water) and agrocontamination risks. The results indicated that the present vulnerability to the hydric erosion under the uses of maize and sorghum, was high and very high in 30 % of the area of study due to the ground confluence with high erosionability and the use of conventional handling practices; however, for the pasture the present vulnerability to the hydric erosion was low in all the area, due to the good cover it offers and to the low animal load used by the cattle systems of the zone. On the other hand, the present vulnerability to agrocontamination by phosphorus, nitrogen, heavy metals and pesticides for the uses of maize, sorghum and pasture with fertilization was high in more than 65 % of the area due to the excessive use of high persistence agrochemicals in combination with the susceptibility of grounds to the high surface run-off, the low absorption capacity of cations (texture and mineralogy) and the low biodegradation capacity of the pesticides (low levels of organic matter). Through maps, the most vulnerable areas are located where is recommended the implementation of practices such as the usage of protective cultures (pasture) in rotation with cleaner cultures (maize and sorghum), the use of mulch, conservationist tillage systems and tillage in contour with alive barriers for the maize and the sorghum, intercalating strips of land with clean crops, the use of agroforestry for cattle operations and the rational use of agrochemicals to avoid problems of environmental pollution

INTRODUCCIÓN

El creciente énfasis sobre la agricultura sostenible está asociado a la convicción de que los recursos naturales son finitos, así como a los problemas crecientes y generalizados de degradación ambiental y a la necesidad de preservar los recursos naturales para uso a largo plazo. Las variadas formas de degradación de los suelos, derivadas primordialmente del uso y manejo que se le da a las tierras, se han transformado en la mayor limitación para la expansión e intensificación de la agricultura en todo el mundo, y especialmente en las regiones tropicales y subtropicales. Es decir, son los principales obstáculos para la producción de los futuros requerimientos de alimentos para la población mundial en su conjunto. Los procesos más extendidos y dañinos de degradación de los suelos son la erosión hídrica y eólica, compactación, sellado y encostramiento, pérdida de materia orgánica, salinización y acidificación y acumulación de tóxicos, todos los cuales a su vez provocan un continuo deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Pla

1993, RELACO 1995, Becerra 1998, de la Rosa y Cromptvoets 1998, Valetin e Ingram 1998, Cerdá y Lavee 1999, Mendoza *et al.* 2001, Pando *et al.* 2003, Schoijet 2005).

La erosión hídrica es un problema ambiental global de gran relevancia; en la mayoría de los países la tasa de erosión hídrica en tierras agrícolas oscila entre 20 y 50 Mg·ha⁻¹·año⁻¹. Se estima que la pérdida anual de tierras agrícolas es de 3 millones de hectáreas, debido a la erosión de suelo y 2 millones de hectáreas, debido a la desertificación a nivel mundial (Miller 1994, López 2001). Las zonas topográficas irregulares son las más propensas a que se produzca este tipo de degradación, pero los riesgos cambian de magnitud con las diferentes unidades de tierra.

La erosión hídrica, a través de la remoción y sedimentación del suelo superficial, altera las propiedades físicas y químicas de los suelos, afectándose los procesos que regulan la productividad del ecosistema. Podría decirse que es la forma más completa e integral de degradación de suelo; ya que reduce la reserva de nutrientes, disminuye el volumen efectivo de raíces y con ello reduce las

reservas de agua utilizables por la planta. Por otra parte, provoca daños ambientales en zonas fuera del lugar donde ocurre la remoción del suelo (Casanova *et al.* 1989, Pla 1993, RELACO 1995, Bonnieux *et al.* 1998, Goulding y Blake 1998, Guadagnin *et al.* 2005).

En Venezuela los problemas de erosión hídrica, que en el pasado estuvieron concentrados en las partes altas cultivadas de la Cordillera de Los Andes y donde han quedado profundas huellas, se han desplazado al sur hacia los Llanos Occidentales (partes altas de los ríos Uribante, Santo Domingo, Masparro, Boconó, Guanare, Acarigua) y hacia la región centro-occidental al este (Tucuyo), con desarrollos agrícolas temporales o permanentes, en áreas con altas pendientes que se han deforestado y se siguen deforestando sin ningún control. En la actualidad, las altas pendientes no son el problema principal, sino que en los últimos 15-20 años se ha alcanzado una pérdida de suelo por erosión en 36% de las áreas con topografía ondulada, de colinas suaves con pendientes moderadas. En ellas se ha extendido una parte importante de la producción de cereales (maíz y sorgo), y de algunos otros cultivos como algodónero y girasol, en el norte de los Llanos centrales y orientales, Centro-Occidentales y en el área de San Francisco de la Paragua en el estado Bolívar (Pla 1988, 1990, Mogollón y Comerma 1994, Lugo-Morin 2007).

La agrocontaminación al igual que la erosión no deja de ser un problema ambiental relevante, ya que la composición y características generales de los contaminantes es muy variada, por lo que la interacción de los mismos con los componentes edáficos puede ser múltiple y ocurrir simultáneamente varios tipos de reacciones (redox, de precipitación, de absorción, etc.) (Vázquez-Alarcón *et al.* 2001). Autores como Delgado y López (1990), Waliszewski e Infanzón (2003) indican que los fosfatos, los compuestos orgánicos nitrogenados y los insecticidas organoclorados y otros son ejemplos de sustancias que son transportadas por adsorción, en los sedimentos y semillas. El cobre y otros metales pesados que son constituyentes de algunos biocidas también son fuertemente adsorbidos por los coloides del suelo.

En Venezuela, la producción de algunos rubros agrícolas con aplicaciones elevadas de agroquímicos, en particular de pesticidas, como ocurre con la producción hortícola y cerealera, se lleva a cabo en áreas donde frecuentemente existen severos riesgos de erosión hídrica (Casanova *et al.* 1989, Delgado y López 1990).

Diversos autores señalan que la degradación de los suelos agrícolas en Venezuela está en franco crecimiento debido a problemas relacionados con prácticas de manejo inadecuadas en diferentes usos agropecuarios (Pla 1981, 1988, 1990, Casanova *et al.* 1989, Páez y Rodríguez 1989, Mogollón y Comerma 1994, Fernández *et al.* 1998, Rodríguez *et al.* 2003, Arrieche y Mora 2005, Lugo-Morin 2007).

Una zona de importancia estratégica para el país por su potencial cerealero y ganadero son los Llanos Centrales, polo de desarrollo que puede verse afectado por la problemática mencionada anteriormente, debido a que sus suelos presentan susceptibilidad a problemas de compactación y erosión (Uzcátegui y Carrero 1992, Mireles *et al.* 1998, Ayala 1998, Hernández-Hernández y López-Hernández 2002, Pérez *et al.* 2002). Adicionalmente, la producción de rubros agrícolas se realiza con aplicaciones elevadas de agroquímicos, pudiendo generar problemas graves de contaminación.

Esta panorámica de la problemática, deja ver la importancia de formular e instrumentar acciones estratégicas que permitan el uso racional de las tierras con vocación agrícola. Dichas estrategias deben basarse en medios que permitan evaluar las condiciones agroecológicas adecuadamente y en un corto tiempo.

Como respuesta han surgido diferentes modelos para evaluar los procesos degradativos del suelo que pueden ocasionar las actividades de orden productivo. Una de las estrategias de respuesta para enfrentar dicha problemática es el diseño de los sistemas agroecológicos para la protección del suelo. El desafío futuro será incrementar la producción de cosecha utilizando menos tierras, menos labores y menos agua, fertilizantes y pesticidas. Sin embargo, para ser eficiente en el diseño de estos sistemas se requiere de estudios agroecológicos de evaluación de tierras, mediante la predicción de su potencialidad y vulnerabilidad cuando son utilizadas con fines específicos, para proporcionar una base racional para el uso y manejo sostenible (de la Rosa y Crompvoets 1998, de la Rosa *et al.* 2004, Larose *et al.* 2004, Trueba-Espinosa *et al.* 2004, De Mello *et al.* 2006, Castro *et al.* 2006, Chagas *et al.* 2006). Siguiendo este orden de ideas, el presente estudio se plantea como objetivo evaluar el riesgo agroambiental a partir del análisis de la vulnerabilidad a la erosión y agrocontaminación de los suelos de los Llanos Centrales de Venezuela para diferentes usos agropecuarios, mediante el uso del sistema MicroLEIS de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras.

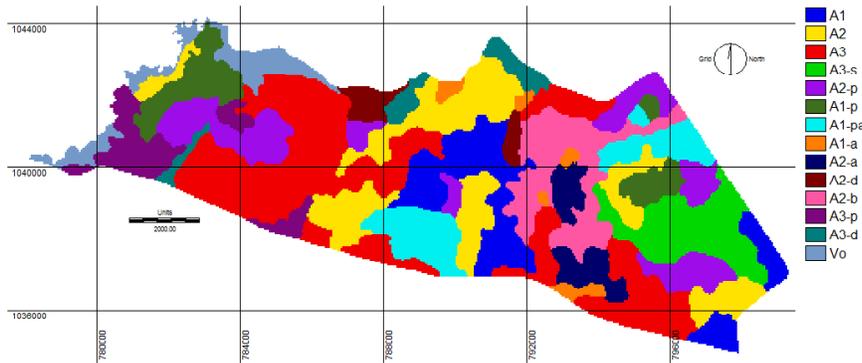


Fig. 2. Mapa de suelos del sector Río Orituco-Chaguaramas (Uzcátegui y Carrero 1992)

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio abarca una superficie de 9,813.83 hectáreas, se ubica en la región de Chaguaramas, Estado Guárico, Venezuela, entre las coordenadas 9°21'00" y 9°26'30" de latitud norte y entre los 66°17'00" y 66°28'00" de longitud oeste (Fig. 1). La zona se caracteriza por un clima de bosque seco tropical según el sistema propuesto por Holdridge (1978) con una precipitación media anual entre 693 y 1049 mm, evaporación media anual entre 1504 y 2000 mm y temperatura media anual de 26.9 °C. Esta zona es considerada como un polo de desarrollo agrícola importante debido a que en ella se produce cerca del 30% del maíz y sorgo de Venezuela (Castillo y Páez 1989, Uzcátegui y Carrero 1992).

Para este estudio se utilizó información disponible correspondiente a: 1) Estudio preliminar de suelos (escala 1:50.000) del sector Río Orituco-Chaguaramas (Uzcátegui y Carrero 1992). El mapa de la zona está

constituido por 14 unidades cartográficas, dentro de las cuales existen consociaciones y asociaciones de suelos clasificados por taxonomía de suelos americana a nivel de fases de familia (Fig. 2). En el cuadro I se indica el suelo representativo y el área de las 14 unidades cartográficas; 2) la información climática (Cuadro II) se obtuvo a partir de la estación climatológica del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP) Banco de San Pedro (8° 47' N; 67° 33' W) y la Estación Guárico de la Fuerza Aérea (9°22' N; 66°55' W) (FAV 1993); 3) la información de los usos

CUADRO I. SUELOS REPRESENTATIVOS Y UNIDADES DE TIERRA DELIMITADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

UT	UC	Suelo representativo	Área (ha)	% del área total
1	A1	Typic Haplustalf	903.23	9.20
2	A2	Typic Haplustalf	1352.19	13.77
3	A3	Typic Haplustalf	2282.09	23.24
4	A3-s	Typic Haplustalf	650.42	6.62
5	A2-p	Ultic Haplustalf	1062.00	10.82
6	A1-p	Ultic Haplustalf	526.14	5.36
7	A1-pa	Typic Haplustalf	597.20	6.09
8	A1-a	Psammentic Haplustalf	137.08	1.40
9	A2-a	Psammentic Paleustalf	308.75	3.14
10	A2-d	Typic Haplustalf	172.00	1.70
11	A2-b	Psammentic Paleustalf	733.03	7.46
12	A3-p	Ultic Haplustalf	447.70	4.56
13	A3-d	Typic Haplustalf	240.00	2.54
14	Vo	Typic Chromustert	402.00	4.10
Total			9,813.83	100

A: Altiplanicie de denudación; Vo: Valle; A1: relieve fuertemente ondulado; A2: relieve moderadamente ondulado; A3: relieve suavemente ondulado; a: texturas livianas; p: pedregosidad superficial o subsuperficial; b: asociación de texturas livianas y pesadas; d: mal drenaje; s: compactación, sodificación y salinificación. UT: Unidad de tierra; UC: Unidad cartográfica. Fuente: Uzcátegui y Carrero, 1992



Fig. 1. Localización del sector Río Orituco – Chaguaramas en el Estado Guárico, Venezuela.

CUADRO II. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO (PROMEDIOS OBTENIDOS CON DATOS ENTRE 1970 Y 1990)

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PPx	0.8	1.4	6.1	53.6	158.0	247.8	240.2	258.8	151.3	142.7	66.1	7.5
PPmx	0.7	0.4	3.2	28.9	64.8	52.0	79.3	72.5	30.3	40.0	23.8	4.0
Tx	27.2	28.0	28.8	29.2	27.9	26.0	25.6	26.2	26.6	26.9	26.9	26.7

PPx: Precipitación promedio; PPmx: Precipitación promedio máxima por evento; Tx: Temperatura promedio

se obtuvo de Mireles *et al.* (1998), Ayala (1998) y Uzcátegui y Carrero (1992) quienes señalan los diferentes tipos de utilización de la tierra (TUT) (**Cuadro III**) y la importancia de la zona como principal área cerealera del país.

CUADRO III. TIPOS DE UTILIZACIÓN DE LA TIERRA PREDOMINANTES EN EL SECTOR RÍO ORITUCO – CHAGUARAMAS

Tipo de Utilización	Descripción
Maíz (<i>Zea mays</i>)	Cultivo de secano. Preparación de tierras convencional (“big rome” + 4 a 6 pases de rastra) a inicio de lluvias dejando el suelo totalmente desnudo. Siembra en hileras. Fertilización a base de altas dosis de NPK, sin aplicación de abonos orgánicos. Alta aplicación de pesticidas (atrazina e insecticidas sistémicos) de alta residualidad. Ausencia de prácticas de conservación.
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	Cultivo de secano. Preparación de tierras convencional (“big rome” + 4 a 6 pases de rastra) a inicio de lluvias dejando el suelo totalmente desnudo. Siembra al voleo. Fertilización a base de altas dosis de NPK, sin aplicación de abonos orgánicos. Alta aplicación de pesticidas (atrazina e insecticidas sistémicos) de alta residualidad. Ausencia de prácticas de conservación.
Pastos con fertilización	Cultivo permanente. Preparación de tierras con labranza reducida (2 pases de rastra cruzados). Fertilización a base de dosis medias de NPK, sin aplicación de abonos orgánicos. Alta aplicación de pesticidas (malezas de hoja ancha) de alta residualidad. Ausencia de prácticas de conservación.
Pastos sin fertilización	Cultivo permanente. Preparación de tierras con labranza reducida (2 pases de rastra cruzados). Sin fertilización, ni aplicación de abonos orgánicos. Alta aplicación de pesticidas (malezas de hoja ancha) de alta residualidad. Ausencia de prácticas de conservación.

Definición de unidades de tierra y usos agropecuarios

Las unidades de tierra (UT) se construyeron combinando la información edáfica y climática previa. Con base a los estudios de Mireles *et al.* (1998), se establecieron los usos agropecuarios más representativos en la zona de estudio.

Las unidades se caracterizaron de acuerdo con las necesidades del sistema informático MicroLEIS (de la Rosa *et al.* 2004) En el **cuadro IV** se presentan las variables de las características de las unidades de tierra y las características de manejo de cultivo requeridos por el sistema.

Evaluación de riesgo agroambiental

Las unidades de tierra fueron evaluadas para cada uno de los usos seleccionados por medio de un sistema experto de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras, denominado MicroLEIS (de la Rosa *et al.* 2004). Los sistemas expertos son herramientas basadas en inteligencia artificial. Son programas de ordenador que simulan los procedimientos para solucionar problemas en un campo determinado, tal y como lo harían expertos humanos. Específicamente el MicroLEIS utiliza el conocimiento inferido mediante árboles de decisión, con el objetivo de determinar la vulnerabilidad potencial, de manejo y real a la erosión (hídrica y eólica), y a la contaminación por agroquímicos. La vulnerabilidad potencial considera el riesgo biofísico de que la aptitud del suelo pueda ser dañada en una o más de sus funciones ecológicas; la vulnerabilidad de manejo considera el riesgo a la degradación que conlleva un tipo de utilización de campo particular y la vulnerabilidad real considera simultáneamente los riesgos biofísicos y de manejo para la unidad de tierra determinada. La erosión y contaminación agroquímica de suelos se estudiaron separadamente mediante el empleo de los modelos Raizal (riesgo de erosión hídrica) y Pantanal (riesgo de contaminación), respectivamente. El modelo Raizal consideran los factores de degradación erosión hídrica y eólica; y el modelo Pantanal evalúa

CUADRO IV. VARIABLES EMPLEADAS EN EL MODELO RAIZAL Y PANTANAL

Variables de características de tierra		
<i>De lugar:</i>	<i>De suelo:</i>	<i>De clima:</i>
Forma del terreno	Drenaje	Precipitación media mensual
Pendiente	Textura	Precipitación máxima mensual
Profundidad de la capa freática	Pedregosidad superficial	Temperatura media mensual
Latitud	Materia orgánica	
	Capacidad de intercambio catiónico	
	pH y Saturación de Na	
Variables de características de manejo		
<i>De cultivo:</i>	<i>De labores:</i>	<i>De fertilización y pesticida:</i>
Tipo de utilización de la tierra	Fecha de siembra	Utilización de fertilizante fosfatado
Rotación de cultivo	Tipo de laboreo	Utilización de fertilizante nitrogenado
Duración del período de cultivo	Profundidad de laboreo	Utilización de estiércol animal
Duración de las hojas	Método de laboreo	Utilización de residuo industrial/urbano
Posición de las hojas	Espaciamiento entre hileras	Fecha de fertilización
Área foliar específica	Drenaje artificial	Utilización del pesticida
Altura de la planta	Nivel artificial del agua subterránea.	Persistencia del pesticida
Profundidad volumétrica de raíces	Prácticas de conservación del suelo (agua)	Toxicidad (LD-50) del pesticida
Estructura del cultivo	Prácticas de conservación del suelo (viento)	Método de aplicación
Uso de tierras en pendientes	Tratamiento de residuos	

Nota: el uso de pesticidas puede indicar la presencia de metales pesados en el suelo (Delgado y López 1990; de la Rosa *et al.* 2004)

la vulnerabilidad a la contaminación por fósforo, nitrógeno, metales pesados (Cu, Zn, Cd, Hg, Pb) y pesticidas (general, hidrófila, hidrófoba) (de la Rosa y Crompvoets 1998, Fernández *et al.* 1998, de la Rosa *et al.* 2004).

Para el estudio en el Sector del Río Orituco – Chaguaramas sólo se evaluó la vulnerabilidad de las tierras a la erosión hídrica, debido a que la degradación por erosión eólica en esta área no es relevante.

El MicroLEIS determinó los riesgos de erosión

y agrocontaminación de la siguiente manera: las características de tierra y manejo (**Cuadro IV**), generalizadas en clases o niveles, fueron combinadas por medio de árboles de decisión para obtener las cualidades de tierra y manejo (**Cuadro V**). Estas fueron asociadas a través de árboles de decisión basados en la metodología de sistema experto para generar las clases de vulnerabilidad. La evaluación generó clases de vulnerabilidad que, para el caso del modelo Raizal, están comprendidas desde la

CUADRO V. CUALIDADES DE TIERRA Y MANEJO

Modelo Raizal	
Cualidades de tierra	Cualidades de manejo
t- Relieve	o- Propiedades del cultivo para la erosión hídrica
k- Erosionabilidad del suelo a la erosión hídrica	z- Prácticas de cultivo para la erosión hídrica
r- Erosividad de la lluvia	c- Propiedades del cultivo para la erosión eólica
e- Erosionabilidad del suelo a la erosión eólica	u- Prácticas de cultivo para la erosión eólica
Modelo Pantanal	
Cualidades de tierra	Cualidades de manejo
r- Escorrentía superficial	i- Manejo de fosfato
l- Grado de lavado	j- Manejo de nitrógeno
o- Adsorción de pesticidas	q- Manejo de metales pesados
g- Degradación de pesticidas	t- Manejo de pesticidas
c- Capacidad de adsorción de cationes	r- Manejo de la erosión del suelo
d- Desnitrificación	
f- Fijación de fosfato	

clase V1 hasta la clase V10 para la vulnerabilidad potencial y actual; y entre las clases V1 a la V4 para la vulnerabilidad de manejo (**Cuadro VI**). Para el caso del modelo Pantanal, las clases de vulnerabilidad potencial y manejo van desde la clase V1 hasta la clase V4; y para la vulnerabilidad real, las clases van de V1 a V5 (**Cuadro VII**) (de la Rosa *et al.* 2004).

Finalmente, se utilizó el sistema de información geográfica IDRISI (Ronald 1996) para expresar mediante mapas las clases de vulnerabilidad a la agrocontaminación de manera de conocer los sitios más susceptibles y enfocar las recomendaciones de uso y manejo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Definición de las unidades de tierra (UT) y los usos agropecuarios

Dado que las condiciones climáticas son similares en toda el área de estudio, las UT se delimitaron siguiendo el mapa de suelos generado por Uzcátegui y Carrero (1992), obteniéndose 14 UT (**Cuadro I**). El mapa original se creó usando como base cartográfica la carta 6944 (Chaguaramas) de Cartografía Nacional, de escala 1:100,000 en la proyección UTM para propósito de este estudio.

Las unidades y los tipos de uso de la tierra se caracterizaron de acuerdo con las necesidades de los

CUADRO VI. MODELO RAIZAL. EXPLICACIONES DE LAS CLASES DE VULNERABILIDAD

Potencial y actual	Clases de vulnerabilidad	Manejo
Nula Unidades no vulnerables	V1	Muy baja Prácticas de manejo adecuadas para alcanzar un uso sostenible de la tierra
Muy baja La erosión sólo ocurrirá bajo condiciones climáticas extremas	V2	Moderadamente baja Las prácticas de manejo influyen muy poco en la vulnerabilidad de estas tierras
Baja Se puede presentar una leve erosión laminar o eliminación de poca cantidad de suelo por el viento. No se alterará espesor y carácter del horizonte A	V3	Moderadamente alta Las prácticas de manejo utilizadas propiciarán los procesos erosivos hídricos y eólicos
Moderadamente baja Estos suelos pueden ser erosionados en A hasta donde alcanza la maquinaria agrícola. El viento puede eliminar cantidades considerables de suelo del horizonte A	V4	Muy alta Las prácticas de manejo aceleran en gran medida los procesos erosivos. Sería necesario evitar estas clases de manejo para conseguir un uso sostenible de la tierra
Ligeramente baja La erosión puede llegar hasta horizontes subsuperficiales pudiéndose presentar cárcavas superficiales. El viento puede eliminar cantidades considerables de suelo del horizonte A	V5	
Ligeramente alta Los procesos erosivos pueden eliminar por completo el horizonte A, los procesos hídricos serán anuales, pudiendo aparecer cárcavas someras. El viento podrá eliminar totalmente el horizonte A	V6	
Moderadamente alta El horizonte A desaparecerá siendo la capa arable el horizonte B o subyacentes, siendo frecuentes cárcavas someras y algunas profundas. El viento eliminará el horizonte A y parte del B	V7	
Alta Se diferencia del anterior en la moderada aparición de cárcavas profundas	V8	
Muy alta Estas tierras se erosionaran hasta la aparición de cárcavas moderadamente profundas. El viento eliminará gran parte del perfil del suelo	V9	
Extrema Aparición de cárcavas muy profundas, su recuperación será muy difícil	V10	

CUADRO VII. MODELO PANTANAL. EXPLICACIONES DE LAS CLASES DE VULNERABILIDAD

Potencial y manejo	Clases de vulnerabilidad	Actual
Nula No vulnerable a contaminación agroquímica con riesgos biofísicos muy bajos de contaminación difusa de suelos y aguas. Muy elevada capacidad de almacenamiento de agroquímicos. La escorrentía superficial y el lavado de contaminantes son muy bajos	V1	Nula Unidades muy poco vulnerables a contaminación de agroquímicos. Cualquier sistema agrícola puede ser suplementado
Baja Vulnerabilidad baja. La capacidad de almacenamiento de contaminantes es alta y el grado de lavado y escorrentía superficial son bajos	V2	Baja Unidades ligeramente vulnerables. Los sistemas de manejo y condiciones biofísicas casi nunca afectan a la calidad de suelo y agua
Moderada Razonablemente alta vulnerabilidad. La capacidad de almacenamiento de contaminantes es baja y/o el grado de lavado y escorrentía va de moderado a alto	V3	Moderada Unidades moderadamente vulnerables. Los sistemas de manejo y condiciones biofísicas dañan la calidad de suelo y agua
Alta Muy vulnerable y con riesgos biofísicos muy severos de contaminación difusa de suelos y aguas. Muy baja capacidad de almacenamiento de agroquímicos. La escorrentía superficial y el lavado de contaminantes son muy altos	V4	Alta Unidades altamente vulnerables. El impacto simultáneo de los sistemas de manejo y condiciones biofísicas dañan en gran medida la calidad de suelo y agua
	V5	Extrema Unidades extremadamente vulnerables. La intensidad de las actividades agrícolas y la alta vulnerabilidad biofísica dañan la calidad de suelo y aguas a una escala extremadamente elevada

modelos Raizal y Pantanal (**Cuadro IV**). Según la caracterización de las UT, se observa predominio de suelos con capacidad de intercambio catiónico media, baja pedregosidad superficial, la forma del terreno es ondulado, menos para la vega que es plano, los suelos presentan buen drenaje, con pendientes moderadas a altas (5-15 %), materia orgánica alta (> 2 %), pH de 4.8 a 8.9 y baja saturación de sodio.

El uso actual de las tierras comprende un sistema de explotación mixta, caracterizado por la siembra de un cultivo de ciclo corto, maíz (zonas más bajas) o sorgo (zonas más altas) durante la temporada de lluvia, y una actividad pecuaria en la temporada seca con base en restos de cosechas y pastos naturales y mejorados (Uzcátegui y Carrero 1992, Mireles *et al.* 1998). Según Ayala (1998) y Bolpriaven (2007), el maíz y el sorgo se siembran prácticamente en todo el país, y los estados, Portuguesa, Guárico y Barinas concentraron entre 70 a 80 % de la producción nacional de 1990 a 2005; en Guárico la producción promedio de maíz y sorgo se ha mantenido entre 25 y 35 %, respectivamente del total nacional, en el mismo período. El estado Guárico posee grandes extensiones de pastos naturales y mejorados (Mireles *et al.* 1998) donde se desarrolla una ganadería extensiva, los más generalizados son el pasto Brasil (*Hypparrhenia rufa* Ness) y el Guinea (*Panicum maximum* Jacq.). Las prácticas de manejo inadecuadas predominan en el área, el uso excesivo de pesticidas de alta persistencia y toxicidad, el tipo de laboreo es convencional y la ausencia de prácticas

de conservación de suelo y de rotación de los cultivos es importante. Basado en lo anterior, los tipos de uso de la tierra más representativos en la zona de estudio son maíz, sorgo y ganadería extensiva con pastos sin fertilización y fertilizados (**Cuadro III**).

Evaluación del riesgo agroambiental de las tierras

El riesgo agroambiental se analiza por separado, por un lado aspectos erosivos y, por otro, la agrocontaminación. En ambos casos se consideran tres aspectos, vulnerabilidad potencial, de manejo y real.

Vulnerabilidad agroambiental según riesgos de degradación por erosión

Vulnerabilidad potencial

La vulnerabilidad potencial, según los riesgos de erosión hídrica, es relativamente baja, con calificaciones desde nula (V1) hasta moderadamente baja (V4) en el 96% de la superficie de la zona de estudio; el resto presenta una vulnerabilidad potencial a la erosión hídrica ligeramente baja (V5 (**Cuadro VIII; Fig. 3**)). Los suelos con la mayor vulnerabilidad potencial a la erosión hídrica (V5) en la zona de estudio se corresponden con alfisoles ubicados en relieves de moderada a fuertemente ondulados (pendientes > 4 %) con texturas medias a pesadas y drenaje deficiente. Mientras que los que presentan la menor vulnerabilidad (V1 y V2) son alfisoles y vertisoles ubicados en las áreas más planas (pendientes < 4 %); indicando que el relieve, la presencia de horizontes argílicos (alfisoles) y la textura

CUADRO VIII. VULNERABILIDAD POTENCIAL A LA EROSIÓN (HÍDRICA Y EÓLICA) EN LA ZONA DE ESTUDIO

UT	UC	Suelo representativo	Erosión hídrica	% del área total
1	A1	Typic Haplustalf	V4	9.20
2	A2	Typic Haplustalf	V4	13.77
3	A3	Typic Haplustalf	V1	23.24
4	A3-s	Typic Haplustalf	V1	6.62
5	A2-p	Ultic Haplustalf	V1	10.82
6	A1-p	Ultic Haplustalf	V2	5.36
7	A1-pa	Typic Haplustalf	V4	6.09
8	A1-a	Psammentic Haplustalf	V4	1.40
9	A2-a	Psammentic Paleustalf	V2	3.14
10	A2-d	Typic Haplustalf	V5k	1.70
11	A2-b	Psammentic Paleustalf	V2	7.46
12	A3-p	Ultic Haplustalf	V2	4.56
13	A3-d	Typic Haplustalf	V5k	2.54
14	Vo	Typic Chromustert	V1	4.10
Total				100

UT: Unidad de tierra; UC: Unidad cartográfica; A: Altiplanicie de denudación; Vo: Valle; A1: relieve fuertemente ondulado; A2: relieve moderadamente ondulado; A3: relieve suavemente ondulado; a: texturas livianas; p: pedregosidad superficial o subsuperficial; b: asociación de texturas livianas y pesadas; d: mal drenaje; s: compactación, sodificación y salinificación; k: Erosionabilidad del suelo a la erosión hídrica

son determinantes en la definición de la vulnerabilidad de los suelos a la erosión hídrica. Estos resultados coinciden con los presentados por Páez y Rodríguez (1989) para los Llanos Altos Centrales, indicando una erosionabilidad del suelo baja entre 0.35 y 0.29 Mg·ha⁻¹/Mj·mm/ha·h. Fernández *et al.* (1998) señalan una gran variabilidad en el riesgo de erosión de los suelos representativos de esta zona, con un predominio de áreas de bajo riesgo de erosión hídrica, influenciado por la textura superficial.

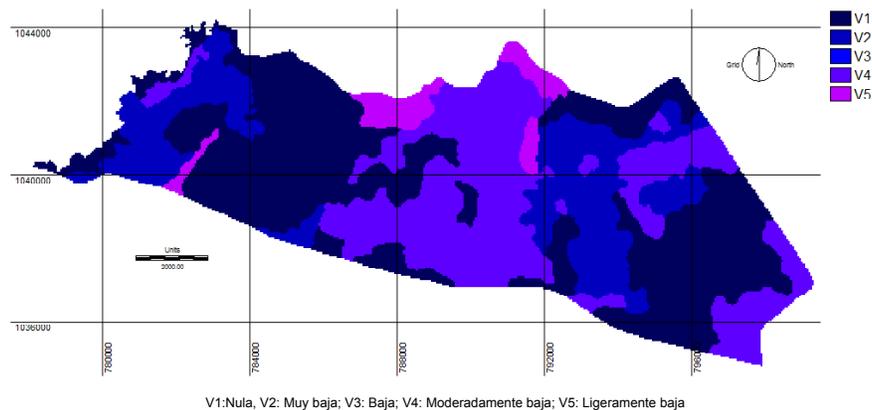
Por otra parte, unidades de tierra con alfisoles ubicados en relieves moderadamente ondulados (pendientes entre 4 y 8 %) presentan un riesgo de erosión hídrica bajo (**Cuadro VIII**), debido al contenido de materia orgánica (> 2%) que disminuye los riesgos por estabilidad estructural; coincidiendo con lo señalado por da Silva y Schulz (2002) y Siegrist *et al.* (1998), quienes destacan que altos contenidos de materia orgánica y bajas pendientes en el suelo inciden en una baja erosionabilidad ($k = 0.002$).

Otros estudios destacan la relevancia que tiene la estabilidad estructural de los agregados y la variabilidad topográfica del terreno en la dinámica del proceso de erosionabilidad del suelo (Perret *et al.* 1996, Gilley y Doran 1997, De Mello *et al.* 2006).

Vulnerabilidad de manejo

Los usos maíz y sorgo presentan una vulnerabilidad de manejo a la erosión hídrica alta (V4) (**Cuadro IX**), debido a las prácticas convencionales utilizadas para estos cultivos: gran uso de maquinaria agrícola, laboreo superficial, ausencia de prácticas de conservación y gran uso de fertilizantes y pesticidas. Las características del cultivo con ciclo corto, posición vertical de las hojas y estructura fina contribuyen a una alta vulnerabilidad.

Tengberg *et al.* (1997), Hernani *et al.* (1999) y Mendoza *et al.* (2001) indican que el uso de sistemas convencionales de manejo de suelo puede elevar las pérdidas de nutrientes y de materia orgánica por erosión hídrica. Estudios acerca de los usos para maíz, sorgo en México y leguminosas en Holanda, coinciden en que el manejo convencional genera pérdidas importantes de suelo (3.5 a 4.1 Mg·ha⁻¹) por escorrentía superficial y erosión (Kwaad *et al.* 1998, Uribe-Gómez *et al.* 2002). Otros estudios, como el de Draghi *et al.* (2005) demuestra la conveniencia

**Fig. 3.** Mapa de riesgos de erosión hídrica potencial del sector Río Orituco-Chaguaramas

de los sistemas de manejo convencionales para un mejor aprovechamiento radicular de los cultivos en suelos pesados y compactados.

Los sistemas de producción con pastos no generan complicaciones con las prácticas de manejo actuales: bajo nivel de mecanización, cobertura protectora del suelo contra la degradación y una baja carga animal; por tal motivo, la vulnerabilidad de manejo es baja (V2-V3) según los riesgos de erosión hídrica. En este sentido, el manejo actual de los pastos en el área está dentro de los límites permisibles para tierras con estos suelos y sus características intrínsecas. Estudios realizados por Betancourt *et al.* (1998), Ranieri *et al.* (1998) y Rodrigues *et al.* (2007) en México y Brasil, a través del manejo agronómico del maíz, índices de comparación espacial de riesgos de degradación y dinámicas de regeneración, señalan que el pastizal representa una alternativa importante para disminuir los riesgos de degradación de tierras.

Vulnerabilidad real

El riesgo potencial (**Cuadro VIII**), junto al riesgo de manejo (**Cuadro IX**), generaron una vulnerabilidad real superior a las obtenidas en forma individual. En la **Fig. 4** se presenta el mapa de vulne-

CUADRO IX. VULNERABILIDAD DE MANEJO A LA EROSIÓN HÍDRICA Y A LA AGROCONTAMINACIÓN PARA LOS USOS AGROPECUARIOS SELECCIONADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Usos	Erosión hídrica		Agrocontaminación		
	Fósforo	Nitrógeno	Metales Pesados	Pesticidas	
Maíz	V4 oz	V3i	V4j	V3q	V4t
Sorgo	V4 oz	V3i	V4j	V3q	V4t
Pasto con fertilizante	V2	V3i	V4j	V3q	V4t
Pasto sin fertilizante	V2	V2i	V3j	V3q	V4t

o: Propiedades del cultivo para la erosión hídrica; z: Prácticas de cultivo para la erosión hídrica; i: Manejo de fosfato; j: Manejo de nitrógeno; q: Manejo de metales pesados; t: manejo de pesticidas

rabilidad actual a los riesgos por erosión para maíz y sorgo, observándose que más de 30 % del área presenta una vulnerabilidad alta o muy alta, concentradas hacia la parte central del área de estudio. Estas tierras se corresponden con alfisoles ubicados en relieves moderada a fuertemente ondulados (pendientes > 4 %), con texturas de livianas a pesadas,

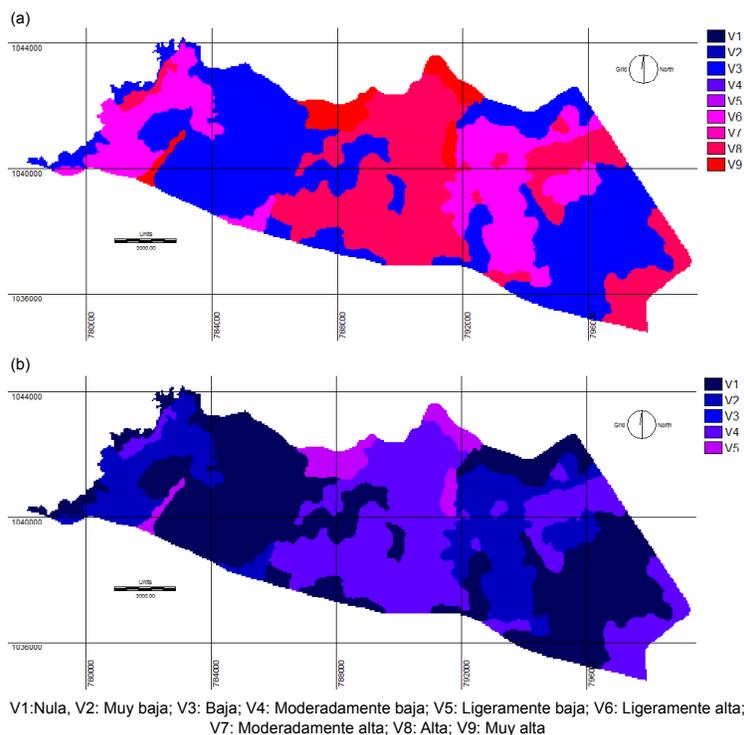


Fig. 4. Mapas de riesgos de erosión hídrica actual para los usos maíz y sorgo (a) y pastos con y sin fertilización (b) del Sector Río Orituco-Chaguaramas.

pero con bajos contenidos de materia orgánica (< 2 %), lo cual genera una alta erosionabilidad. Adicionalmente el manejo convencional de los cultivos (maíz y sorgo) aumentan la vulnerabilidad a la degradación de las tierras. Por otra parte, se aprecia un 20 % de tierras con una vulnerabilidad ligeramente alta (V6) con suelos Alfisoles ubicados en relieves moderada a ligeramente ondulados (pendientes < 4 %) con texturas variables, pero pedregosos y con drenaje deficiente. Finalmente, en alrededor de 50 % del área la vulnerabilidad actual para maíz y sorgo es baja, ocurriendo en estas áreas alfisoles y vertisoles de texturas medias a pesadas, con pendientes menores a 4 % y contenidos más altos de materia orgánica (>2 %), donde localmente son frecuentes problemas de compactación y salinización (**Cuadro X, Fig. 4**).

La coincidencia de las labores de preparación de tierras que incluyen “big-rome” y varios pases de rastra (Mireles *et al.* 1998) con la caída de las primeras lluvias de alta intensidad, inducen a un muy marcado efecto erosivo del área produciendo pérdidas de suelo en corto tiempo. El área de estudio presenta altos valores de erosividad anual de la lluvia (entre 500 y 900 Mj-mm/ha-h), con una mayor concentración en los meses de preparación de tierra y siembra (mayo-junio-julio), lo cual refleja que la combinación de las condiciones ambientales con prácticas de manejo inadecuadas genera los proble-

mas de degradación (Rodríguez *et al.* 1989). La recuperación, según Fernández *et al.* (1998), RELACO (1995) y Hernández-Hernández y López-Hernández (2002), requiere prácticas y medidas de conservación específicas, como la rotación de cultivos y cambios en el tipo de laboreo.

Con los sistemas de producción de pastos con y sin fertilizantes los riesgos de erosión hídrica son comúnmente menores (V1-V4), alcanzando una vulnerabilidad ligeramente baja (V5) en apenas un 4 % del área de estudio, correspondiente a alfisoles con drenaje deficiente (**Cuadro X, Fig. 4**). Las características del cultivo y su manejo, entre las cuales la densidad de siembra es factor importante, contribuyen a disminuir el impacto de las gotas de lluvia bajando las probabilidades de una alta escorrentía superficial; por tal motivo, la vulnerabilidad actual a la erosión bajo pasto es mucho menor a la del maíz y el sorgo, en las mismas unidades de tierra. Estas afirmaciones coinciden con lo señalado por Mwendera y Saleem (1997), en relación a que vegetaciones de pastizales reducen directamente el impacto de la gota de lluvia incrementando el flujo interno. Por otra parte, estudios en Brasil, Venezuela y México demuestran la efectividad que tiene el pasto en la protección del suelo y mejoramiento de la actividad microbiana (Betancourt *et al.* 1998, Álvarez-Solis y Anzuelo-Martínez 2004, Rodríguez *et al.* 2004, Sparovek *et al.* 2007).

CUADRO X. VULNERABILIDAD ACTUAL A LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

UT	UC	Suelo representativo	Usos				Área (%)
			Maíz	Sorgo	P con F	P sin F	
1	A1	Typic Haplustalf	V8-/oz	V8-/oz	V4-/-	V4-/-	9.20
2	A2	Typic Haplustalf	V8-/oz	V8-/oz	V4-/-	V4-/-	13.77
3	A3	Typic Haplustalf	V3-/oz	V3-/oz	V1-/-	V1-/-	23.24
4	A3-s	Typic Haplustalf	V3-/oz	V3-/oz	V1-/-	V1-/-	6.62
5	A2-p	Ultic Haplustalf	V3-/oz	V3-/oz	V1-/-	V1-/-	10.82
6	A1-p	Ultic Haplustalf	V6-/oz	V6-/oz	V2-/-	V2-/-	5.36
7	A1-pa	Typic Haplustalf	V8-/oz	V8-/oz	V4-/-	V4-/-	6.09
8	A1-a	Psammentic Haplustalf	V8-/oz	V8-/oz	V4-/-	V4-/-	1.40
9	A2-a	Psammentic Paleustalf	V6-/oz	V6-/oz	V2-/-	V2-/-	3.14
10	A2-d	Typic Haplustalf	V9k/oz	V9k/oz	V5k/-	V5k/-	1.70
11	A2-b	Psammentic Paleustalf	V6-/oz	V6-/oz	V2-/-	V2-/-	7.46
12	A3-p	Ultic Haplustalf	V6-/oz	V6-/oz	V2-/-	V2-/-	4.56
13	A3-d	Typic Haplustalf	V9k/oz	V9k/oz	V5k/-	V5k/-	2.54
14	Vo	Typic Chromustert	V3-/oz	V3-/oz	V1-/-	V1-/-	4.10
Total							100

UT: Unidad de tierra; UC: Unidad cartográfica; P: Pasto; F: Fertilizante A: Altiplanicie de denudación; Vo: Valle; A1: relieve fuertemente ondulado; A2: relieve moderadamente ondulado; A3: relieve suavemente ondulado; a: texturas livianas; p: pedregosidad superficial o subsuperficial; b: asociación de texturas livianas y pesadas; d: mal drenaje; s: compactación, sodificación y salinificación; o: Propiedades del cultivo para la erosión hídrica; z: Prácticas de cultivo para la erosión hídrica; k: Erosionabilidad del suelo a la erosión hídrica.

Vulnerabilidad agroambiental según riesgos de degradación por agrocontaminación

Vulnerabilidad potencial

Las UT presentan una vulnerabilidad potencial variable. En la **figura 5** se presentan los mapas de vulnerabilidad a la agrocontaminación por fósforo, nitrógeno, metales pesados y pesticidas en el área de estudio. Para el caso de agrocontaminación por fósforo el 46 % del área presentó una alta (V4) vulnerabilidad, correspondiente a alfisoles con relieve moderado a fuertemente ondulado, texturas variables, en algunos casos pedregosos y otros con drenaje deficiente que favorecen la escorrentía superficial de los suelos. Para el nitrógeno generalmente la vulnerabilidad es de ninguna a baja (V1-V2) abarcando más del 90% del área. Por otra parte, alrededor de 50% del área presentó una vulnerabilidad moderada (V3) a la agrocontaminación por metales pesados y más del 35 % una vulnerabilidad moderada a alta (V3-V4) a la contaminación por pesticidas, correspondientes a unidades de tierra con alfisoles con relieve moderada a fuertemente ondulado, baja capacidad de intercambio catiónico (< 10 cmol/kg) y bajos contenidos de materia orgánica (< 2 %); estas características se relacionan con los riesgos de escorrentía superficial, la baja capacidad de adsorción de cationes y la baja capacidad de biodegradación de los pesticidas (**Cuadro XI, Fig. 5**). Las moderadas a altas pendientes y los bajos contenidos de

materia orgánica que inciden notablemente en una menor cantidad de microorganismos en el suelo son las características que ocasionan estos problemas (Ramos-Bello *et al.* 2001, Ferrera y Alarcón 2001). Estos resultados son consistentes con los estudios de Bonnieux *et al.* (1998) y de la Rosa y Crompvoets (1998) los cuales reportan que el transporte y los procesos de transformación de un lugar a otro puede incrementar la contaminación por agroquímicos inducida por los procesos de erosión y escorrentía superficial, pudiendo en algunos casos contaminar las aguas superficiales y subsuperficiales.

Vulnerabilidad de manejo

En forma general, las técnicas de manejo aplicadas en los usos agropecuarios seleccionados de la zona de estudio hacen que la vulnerabilidad de las tierras a ser contaminadas sea elevada (**Cuadro IX**). Para el maíz, sorgo y pasto con fertilizante la vulnerabilidad de manejo presenta clases que van desde moderada (V3) a alta (V4) para contaminación por fósforo, nitrógeno, metales pesados y pesticidas; esto se debe fundamentalmente al excesivo uso de fertilizantes y agroquímicos altamente tóxicos y de alta residualidad, y a la ausencia de prácticas de conservación que disminuyan la susceptibilidad o escorrentía superficial. Estudios realizados por Fadalski y Tormena (2005) y Cabral da Silva *et al.* (2005), demuestran que los sistemas convencionales de manejo son altamente degradativos.

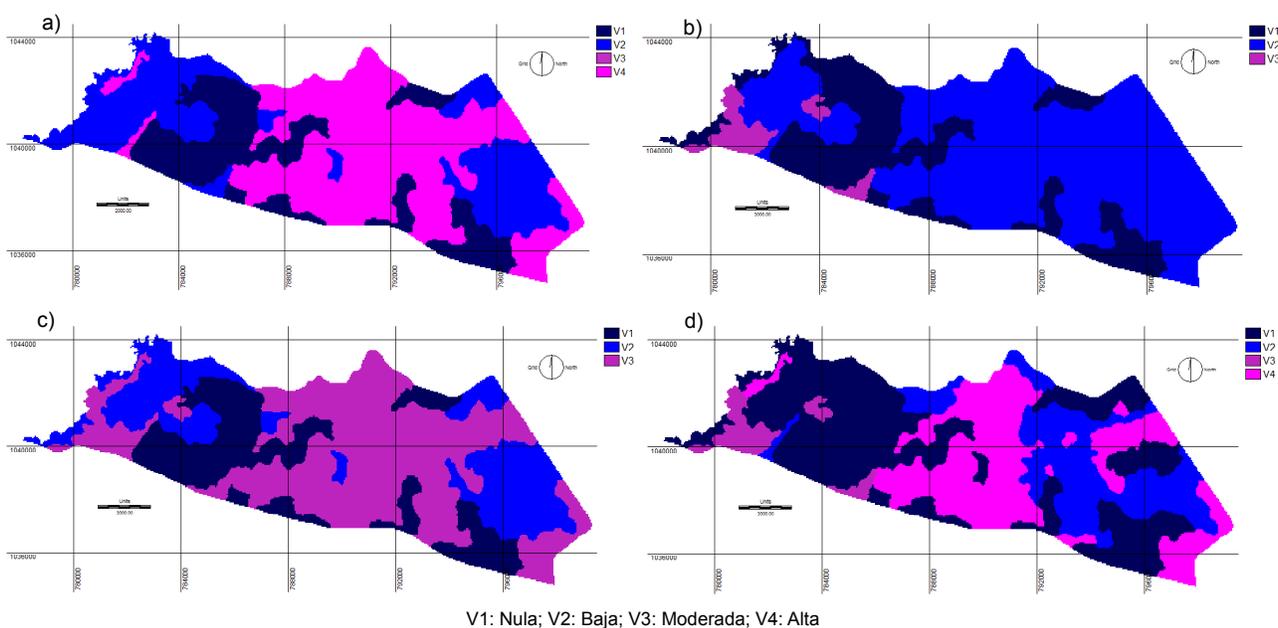


Fig. 5. Mapas de riesgos potenciales de agrocontaminación por fósforo (a), nitrógeno (b), metales pesados (c) y pesticidas (d).

CUADRO XI. VULNERABILIDAD POTENCIAL DE AGROCONTAMINACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

UT	UC	Suelo representativo	Fósforo	Nitrógeno	M. pesados	Pesticidas	Area(%)
1	A1	Typic Haplustalf	V4	V2r	V3r	V4r	9.20
2	A2	Typic Haplustalf	V4	V2r	V3r	V4r	13.77
3	A3	Typic Haplustalf	V1	V1	V1	V1	23.24
4	A3-s	Typic Haplustalf	V2	V2	V2	V2	6.62
5	A2-p	Ultic Haplustalf	V2	V2	V2	V1	10.82
6	A1-p	Ultic Haplustalf	V2	V2	V2	V1	5.36
7	A1-pa	Typic Haplustalf	V4	V2r	V3r	V4r	6.09
8	A1-a	Psammentic Haplustalf	V4r	V2r	V3r	V4or	1.40
9	A2-a	Psammentic Paleustalf	V4	V2	V3	V2	3.14
10	A2-d	Typic Haplustalf	V4r	V2rd	V3	V2r	1.70
11	A2-b	Psammentic Paleustalf	V4	V2	V3	V2	7.46
12	A3-p	Ultic Haplustalf	V2	V3cd	V3c	V3g	4.56
13	A3-d	Typic Haplustalf	V4r	V2rd	V3	V2r	2.54
14	Vo	Typic Chromustert	V2	V1	V2	V1	4.10
Total							100

UT: Unidad de tierra; UC: Unidad cartográfica; P: Pasto; F: Fertilizante A: Altiplanicie de desnudaación; Vo: Valle; A1: relieve fuertemente ondulado; A2: relieve moderadamente ondulado; A3: relieve suavemente ondulado; a: texturas livianas; p: pedregosidad superficial o subsuperficial; b: asociación de texturas livianas y pesadas; d: mal drenaje; s: compactación, sodificación y salinificación; r: Escorrentía superficial; g: Degradación de pesticidas; c: Capacidad de adsorción de cationes; d: Desnitrificación; o: Adsorción de pesticidas.

Para el pasto sin fertilizante se aprecian niveles más bajos para contaminación por fósforo (baja - V2) y nitrógeno (moderada - V3) con respecto al resto de los usos seleccionados, debido a la no aplicación de fertilizantes en el manejo. Sin embargo, el uso de

pesticida es una práctica de manejo común para el uso pasto sin fertilizantes generando una moderada (V3) y alta (V4) vulnerabilidad a la contaminación por metales pesados y pesticidas, respectivamente. Estos resultados coinciden con los reportados de

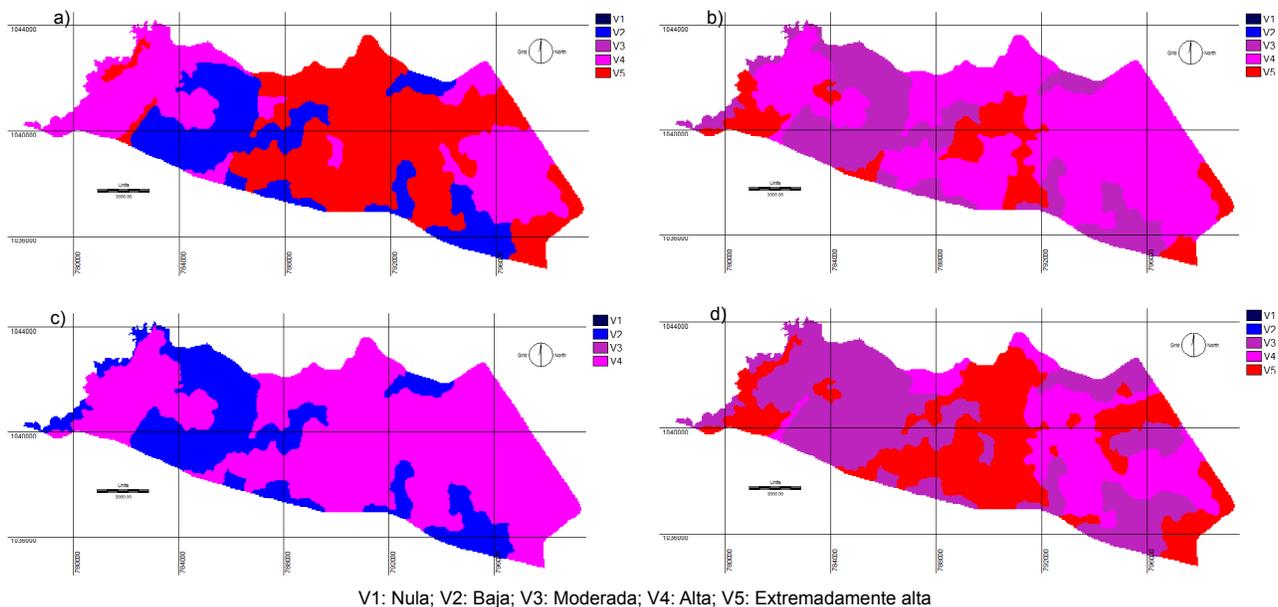


Fig. 6. Mapas de riesgos actuales de agrocontaminación por fósforo (a), nitrógeno (b), metales pesados (c) y pesticidas (d) para maíz y sorgo.

Fernández *et al.* (1998), donde indica que el manejo convencional utilizado en la zona de estudio involucra un alto uso de fertilizantes y pesticidas de alta toxicidad y persistencia, generando riesgos biofísicos muy severos de contaminación de suelos y aguas.

Vulnerabilidad real

El riesgo potencial (**Cuadro XI**), combinado con el riesgo de manejo (**Cuadro IX**) generó en las UT una vulnerabilidad real a la agrocontaminación muy variable. Sin embargo, el modelo indica que los usos maíz y sorgo son los que generan mayores riesgos de contaminación. En la **figura 6** se presentan los mapas de vulnerabilidad de las tierras a agrocontaminación para maíz y sorgo.

Para el caso de agrocontaminación por fósforo y nitrógeno para los usos maíz, sorgo y pasto con

fertilizante más del 75 % del área presentó una alta a extrema vulnerabilidad (V4-V5), debido a la aplicación intensiva de fertilizante en suelos alfisoles ubicados en relieves moderada a fuertemente ondulados (pendientes >4 %) que pueden generar problemas de escorrentía, suelos de texturas livianas con riesgos de lixiviación y suelos con drenaje deficiente. Para el uso pasto sin fertilizante más de un 50 % del área presentó una vulnerabilidad baja a contaminación por nitrógeno y fósforo, mostrando sólo alta vulnerabilidad los alfisoles con altas pendientes (>4 %). Por otra parte, el 73 % del área presentó una alta vulnerabilidad (V4) a la agrocontaminación por metales pesados y el 66 % presentó una vulnerabilidad moderada a alta (V3-V4) a la contaminación por pesticidas para todos los usos seleccionados, en concordancia con prácticas inadecuadas de manejo

CUADRO XII. VULNERABILIDAD ACTUAL A LOS RIESGOS POR AGROCONTAMINACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

UT	UC	Suelo Representativo	Fósforo			Nitrógeno			Metales pesados			Pesticidas			Área (%)
			M y S	P con F	P sin F	M y S	P con F	P sin F	M y S	P con F	P sin F	M y S	P con F	P sin F	
1	A1	Typic Haplustalf	V5-/i	V5-/i	V4-/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4r/q	V4r/q	V4r/q	V5r/t	V5r/t	V5r/t	9.20
2	A2	Typic Haplustalf	V5-/i	V5-/i	V4-/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4r/q	V4r/q	V4r/q	V5r/t	V5r/t	V5r/t	13.77
3	A3	Typic Haplustalf	V2-/i	V2-/i	V1-/i	V3-/j	V3-/j	V2-/j	V2-/q	V2-/q	V2-/q	V3-/t	V3-/t	V3-/t	23.24
4	A3-s	Typic Haplustalf	V4-/i	V4-/i	V2-/i	V4-/j	V4-/j	V4-/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V4-/t	V4-/t	V4-/t	6.62
5	A2-p	Ultic Haplustalf	V4-/i	V4-/i	V2-/i	V4-/j	V4-/j	V4-/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V3-/t	V3-/t	V3-/t	10.82
6	A1-p	Ultic Haplustalf	V4-/i	V4-/i	V2-/i	V4-/j	V4-/j	V4-/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V3-/t	V3-/t	V3-/t	5.36
7	A1-pa	Typic Haplustalf	V5-/i	V5-/i	V4-/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4r/q	V4r/q	V4r/q	V5r/t	V5r/t	V5r/t	6.09
8	A1-a	Psammentic Haplustalf	V5r/i	V5r/i	V4r/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4r/q	V4r/q	V4r/q	V5or/t	V5or/t	V5or/t	1.40
9	A2-a	Psammentic Paleustalf	V5-/i	V5-/i	V4-/i	V4-/j	V4-/j	V4-/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V4-/t	V4-/t	V4-/t	3.14
10	A2-d	Typic Haplustalf	V5r/i	V5r/i	V4r/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V4r/t	V4r/t	V4r/t	1.70
11	A2-b	Psammentic Paleustalf	V5-/i	V5-/i	V4-/i	V4-/j	V4-/j	V4-/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V4-/t	V4-/t	V4-/t	7.46
12	A3-p	Ultic Haplustalf	V4-/i	V4-/i	V2-/i	V5cd/j	V5cd/j	V4cd/j	V4c/q	V4c/q	V4c/q	V5g/t	V5g/t	V5g/t	4.56
13	A3-d	Typic Haplustalf	V5r/i	V5r/i	V4r/i	V4r/j	V4r/j	V4r/j	V4-/q	V4-/q	V4-/q	V4r/t	V4r/t	V4r/t	2.54
14	Vo	Typic Chromustert	V4-/i	V4-/i	V2-/i	V3-/j	V3-/j	V2-/j	V2-/q	V2-/q	V2-/q	V3-/t	V3-/t	V3-/t	4.10
Total														100.00	

UT: Unidad de tierra; UC: Unidad cartográfica; M: Maíz; S: Sorgo; P: Pasto; F: Fertilizante; A: Altiplanicie de denudación; Vo: Valle; A1: relieve fuertemente ondulado; A2: relieve moderadamente ondulado; A3: relieve suavemente ondulado; a: texturas livianas; p: pedregosidad superficial o subsuperficial; b: asociación de texturas livianas y pesadas; d: mal drenaje; s: compactación, sodificación y salinificación; r: Escorrentía superficial; c: Capacidad de adsorción de cationes; d: Desnitrificación; i: Manejo de fosfatos; j: Manejo de nitrógeno; g: degradación de pesticidas; q: Manejo de metales pesados; t: Manejo de pesticidas.

que incluyen aplicación excesiva de agroquímicos, muchos ellos de alta persistencia, en suelos alfisoles con riesgos de escorrentía superficial (pendientes > 4 % y presencia de horizonte argílico), baja capacidad de adsorción de cationes (Ultic Haplustalfs) y baja capacidad de biodegradación de los pesticidas, por niveles bajos de materia orgánica (**Cuadro XII**). En estudios en Brasil revelan que los elementos señalados anteriormente representan un problema para el uso de suelos agrícolas (Fernandes *et al.* 2007). En este sentido, estudios realizados en México demuestran que la incorporación de materia orgánica al suelo puede disminuir la presencia de plaguicidas, debido fundamentalmente al aumento de la cantidad de microorganismos (Sauri y Castillo 2002, Velasco y Volke 2003).

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad actual a la erosión hídrica bajo los usos de maíz y sorgo, fueron altas y muy altas en 30 % del área de estudio debido al uso de prácticas de manejo convencionales en suelos alfisoles con pendientes superiores a 4 %, de texturas variables, pero con la presencia de un horizonte argílico o drenaje deficiente que genera problemas de escorrentía superficial; sin embargo, para los pastos la vulnerabilidad actual a la erosión hídrica fue baja en toda el área, debido a la buena cobertura que ofrece y a la baja carga animal que utilizan los sistemas ganaderos de la zona.

La vulnerabilidad actual a la agrocontaminación por fósforo, nitrógeno, metales pesados y plaguicidas para los usos de maíz, sorgo y pastos con fertilización fue alta en más del 65 % del área de estudio debido al uso excesivo de agroquímicos de alta persistencia en combinación con la susceptibilidad de los suelos (alfisoles) a la alta escorrentía superficial, la baja capacidad de absorción cationes (textura y mineralogía) y la baja capacidad de biodegradación de los pesticidas (bajos niveles de materia orgánica).

La unidad de tierra que presentó menos riesgos a la erosión hídrica y la agrocontaminación fue la que se encuentra en posición de vega, con suelos vertisoles. Estos suelos aún cuando presentan un drenaje deficiente, están ubicados en pendientes menores al 1 % con un riesgo nulo de escorrentía superficial y tienen arcillas tipo 2:1 con alta capacidad de intercambio catiónico y buenos niveles de materia orgánica que generan muy bajos riesgos de lixiviación y le dan a los suelos una alta capacidad de biodegradación de los agroquímicos.

El sistema MicroLEIS en combinación con el uso de un SIG, permitió la localización de las unidades de tierra con alta vulnerabilidad a los procesos de erosión hídrica y agrocontaminación, indicando las causas (intrínsecas y de manejo) relacionadas con los riesgos, lo que permitirá enfocar la aplicación de usos y prácticas alternativas de manejo para reducir estos problemas. Por otra parte, la determinación de la vulnerabilidad a estos procesos de degradación se realizó con información climática mensual y un levantamiento de suelos, lo cual es una ventaja con respecto al uso de modelos de simulación más complejos como EPIC o WEPP que requieren de una información mucho más detallada.

RECOMENDACIONES

Con base a los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad de las tierras a la erosión hídrica y a la agrocontaminación, se recomienda hacer una ordenación de los usos de la tierra, promoviendo usos más conservacionistas como la agroforestería y forestería en las zonas de mayor riesgo, así como la implementación de prácticas como el uso de cultivos protectores (pastos) en rotación con cultivos más limpios (maíz y sorgo), uso de "mulch", labranza conservacionista y labranza en contorno con barreras vivas para el maíz y el sorgo, uso de franjas amortiguadoras intercaladas con cultivos limpios en las zonas donde los riesgos son moderados a bajos.

La implementación de los usos y prácticas alternativas debe acompañarse con un monitoreo de campo que permita validar y ajustar los sistemas de manejo para adecuarlos a las características particulares de los suelos y así lograr la sostenibilidad de la producción agropecuaria.

El sistema MicroLEIS fue desarrollado para implementarlo en condiciones del Mediterráneo europeo, por tal motivo se deben cambiar algunas terminologías (e.g. uso de estaciones: primavera, verano, otoño, invierno) y ajustar árboles de decisión a las condiciones tropicales, mediante una comparación entre los resultados del modelo y evaluaciones de campo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a María Fernanda Rodríguez del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas por la digitalización de la cartografía empleada en este estudio. Asimismo, al

Dr. Benito Ramírez Valverde del Colegio de Postgraduados por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- Álvarez-Solís J. y Anzueto-Martínez M. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 38, 13-22.
- Arrieche I. y Mora O. (2005). Efecto de la aplicación de residuos orgánicos sobre el cultivo del maíz en suelos degradados del estado Yaracuy, Venezuela. *Biagro*. 17, 1-9.
- Ayala J. (1998). Análisis de la competitividad de los cereales en Venezuela. *Agroalimentaria* 7, 13-18.
- Becerra M. (1998). Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿Utopía o posibilidad en México? *Terra* 16, 173-179.
- Betancourt P., González J., Figueroa B. y González F. (1998). Cobertura vegetativa y fertilización nitrogenada en la producción de maíz. *Terra* 16, 231-237.
- Bonnieux F., Carpentier A. y Weaver R. (1998). Reducing soil contamination: economic incentives and potential benefits. *Agr. Ecosyst. Environ.* 67, 275-288.
- Bolprien (Base de datos Agroalimentaria de Venezuela) (2007). Indicadores de la producción agrícola: tabla variable con la distribución porcentual del volumen de producción por entidad federal. Disponible En: www.bolprien.com/website/bdatop.asp.
- Cabral da Silva E., Buzetti S., Guimarães G.L, Lazarini E.M., Eustáquio de Sá (2005). Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio directo sobre latossolo vermelho. *R. Bras. Ci. Solo* 29, 353-362.
- Casanova E., Páez M. y Rodríguez O. (1989). Pérdidas de nutrimentos por erosión bajo diferentes manejos en dos suelos agrícolas. *Rev. Fac. Agronomía-UCV. Alcance* 37, 33-43.
- Castillo J. y Páez M. (1989). Impacto de la erosión en la productividad en suelos Alfisoles. *Rev. Fac. Agronomía - UCV. Alcance* 37, 137-147.
- Castro M., Avelino R., de Carvalho F. y Falco F. (2006). Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o estado de Sao Paulo. *R. Bras. Ci. Solo* 30, 1069-1076.
- Cerdá A. y Lavee H. (1999). Escorrentía y erosión a lo largo de un gradiente climático-altitudinal efecto por el pastoreo en el desierto de Judea. *Cuadernos Geográficos* 29, 27-50.
- Chagas C., de Carvalho W., Rendeiro N. y Fernandes E. (2006). Aplicação de um sistema automatizado (ALES-Automated Land Evaluation System) na avaliação das terras das microrregiões de Chapecó e Xanxeré, oeste catarinense, para o cultivo de grãos. *R. Bras. Ci. Solo* 30, 509-522.
- da Silva A. y Schulz H. (2002). Redução do desprendimento das partículas do solo mediante uso de residuos vegetais de origem urbana. *R. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 6, 531-534.
- de la Rosa D. y Cromptoets J. (1998). Evaluating mediterranean soil contamination risk in selected hydrological change scenarios. *Agr. Ecosyst. Environ.* 67, 239-250.
- de la Rosa D., Mayol F., Díaz-Pereira E., Fernández M. y de la Rosa Jr. D. (2004). A land evaluation decision support system (*MicroLEIS DSS*) for agricultural soil protection. *Environ. Model. Softw.* 19, 929-942. Disponible En: www.microleis.com
- De Mello G., Bueno C. y Pereira G. (2006). Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 10, 315-322.
- Delgado F. y López M. (1990). Algunas consideraciones generales sobre necesidades de investigación de la erosión como factor de polución ambiental. *Memorias*. (R. López y M. Páez (Eds). CIDIAT, Mérida, 117 p.
- Draghi L., Botta G., Balbuena R., Claverie J. y Rosatto H. (2005). Diferencias de las condiciones mecánicas de un suelo arcilloso sometido a diferentes sistemas de labranza. *R. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 9, 120-124.
- Fadalski y Tormena C.A. (2005). Dinâmica da calagem superficial em um latossolo vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo* 29, 235-247.
- FAV (Fuerza Aérea Venezolana) (1993). Estadísticas Climatológicas de Venezuela, Período 1961-1990. República de Venezuela. Ministerio de la Defensa. Publicación Especial No. 5, Caracas, 143 p.
- Fernandes R., Luz W., Fontes M. y Fontes L. (2007). Avaliação da concentração de metais pesados em áreas olerícolas no estado de Minas Gerais. *R. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 11, 81-93.
- Fernández L., Florentino A. y Rey J.C. (1998). *Aplicación de un sistema informático integrado para la evaluación de la degradación medio ambiental en el trópico*. Memorias. Proyecto de Investigación, Maracay, Universidad Central de Venezuela-de Extremadura, 117 p.
- Ferrera R. y Alarcón A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum.* 8, 175-183.
- Gilley J.E. y Doran J.W. (1997). Tillage effect on soil erosion potential and soil quality of a former conservation reserve program site. *J. Soil Water Cons.* 52, 184-188.

- Goulding K. y Blake L. (1998). Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals. *Agr. Ecosyst. Environ.* 67, 135-144.
- Guadagnin J., Bertol I., Cassol P. y do Amoral A. (2005). Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo* 29, 277-286.
- Hernández-Hernández R. y López-Hernández D. (2002). El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia* 27, 529-536.
- Hernani L., Kurihara C. y Silva W. (1999). Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *Br. J. Soil Sci.* 23, 145-154
- Holdrige L. (1978). *Ecología en zonas de vida*. Organización de Estados Americanos (OEA). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José de Costa Rica, 123 p.
- Kwaad F., van der Zijp M. y van Dijk P. (1998). Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil Tillage Res.* 46, 13-21.
- Larose M., Oropeza-Mota J., Norton D., Turrent-Fernández A., Martínez-Menes M., Pedraza-Oropeza J. y Francisco-Nicolás N. (2004). Application of the wepp model to hillside lands in the Tuxtla, Veracruz, México. *Agrociencia* 38, 155-163.
- López M. (2001). Degradación de suelos en Sonora. *Región y Sociedad* 13, 73-97.
- Lugo-Morin D.R (2007). Evaluación del riesgo agroambiental de los suelos de las comunidades indígenas del estado Anzoátegui, Venezuela. *Ecosistemas* 16, 69-79.
- Mendoza M., Oltra J., Vidal C. y Tomás C. (2001). La calidad de las prácticas agrícolas en el proceso de transformación a la agricultura ecológica en Enguera y Anna (Comunidad Valenciana). *Cuadernos Geográficos* 30, 129-147.
- Miller T. (1994). *Ecología y Medio Ambiente. Recursos del Suelo*. Iberoamericana 7a ed. México, 360 p.
- Mireles M., Comerma J. y Quintero J. (1998). *Tipos de usos de la tierra en el nororiente de Guárico*. Maracay. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Serie C N° 11, 34 p.
- Mogollón L. y Comerma J. (1994). *Suelos de Venezuela*. Exlibris, Maracay, 265 p.
- Mwendera E. y Saleem M. (1997). Infiltration rates, surface runoff and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands. *Soil Use Manag.* 13, 29-35.
- Páez M. y Rodríguez O. (1989). El riesgo de erosión hídrica como criterio de diagnóstico en la evaluación de tierras. *Rev. Fac. Agronomía-UCV. Alcance* 37, 9-19.
- Pando M., Gutiérrez M., Maldonado A., Palacio J. y Estrada A. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas* 51, 23-36.
- Perret S., Michellon R., Boyer J. y Tassin J. (1996). Soil rehabilitation and erosion control through agro-ecological practices on Reunion Island (French Overseas Territory, Indian Ocean). *Agr. Ecosyst. Environ.* 59, 149-157.
- Pla I. (1981). Soil characteristics and erosion risk assessment of some agricultural soils in Venezuela. *En: Soil conservation problems and prospects*. (R. Morgan Ed.) J. Wiley and Sons, Chichester, Inglaterra, 138 p.
- Pla I. (1988). Desarrollo de índices y modelos para el diagnóstico y prevención de la degradación de suelos agrícolas en Venezuela. Ed. Banco Consolidado, Caracas, 40 p.
- Pla I. (1990). La degradación y el desarrollo agrícola de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 40, 7-27.
- Pla I. (1993). Uso, manejo y degradación de suelos en América Latina. *Memorias. XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Salamanca-Sevilla. 1-24 p.
- Ramos-Bello R., Cajuste L., Flores-Román D. y García-Calderón N. (2001). Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia* 35, 385-395.
- Ranieri S., Sparovek G., Souza M. y Dourado D. (1998). Aplicação de índice comparativo na avaliação do risco de degradação das terras. *Br. J. Soil Sci.* 22, 751-760.
- RELACO (Reunión de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista) (1995). *Efectos de los sistemas de labranza en la degradación y productividad de los suelos*. (I. Pla y F. Ovalles eds). Maracay. FONAIAP-FAO-ISSS-UNELLEZ-RELACO. (Serie especiales No. 32). 386 p.
- Rodrigues G., Maltoni K. y Cassiolato A. (2007). Dinâmica de regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma cerrado. *R. Bras. Eng. Agric. Ambiental* 11, 73-80.
- Rodríguez B., España M. y Cabrera E. (2004). Propiedades químico-estructurales de la materia orgánica del suelo en un agrosistema de los llanos centrales venezolanos bajo diferentes prácticas de manejo. *Interciencia* 29, 461-467.
- Rodríguez O., Páez M. y Mendoza C. (1989). Obtención computarizada de un mapa isoerodante para los Llanos Altos Centrales. *Rev. Fac. Agronomía-UCV. Alcance* 37, 97-102.
- Ronald J. (1996). IDRISI for Windows. Version 2.0: User's guide. Clark Labs Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University. Worcester, MA, EUA.

- Sauri M. y Castillo E. (2002). Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes. *Ingeniería Revista Académica* 6, 55-60.
- Schoijet M. (2005). Desertificación y tormentas de arenas. *Región y Sociedad* 17, 167-187.
- Siegrist S., Schaub D., Pfiffner L. y Mader P. (1998). Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long - term field study on loess in Switzerland. *Agr. Ecosyst. Environ.* 69, 253-264.
- Sparovek G., Correchel V. y Pereira A. (2007). The risk of erosion in Brazilian cultivated pasture. *Scientia Agricola* 64, 77-82.
- Tengberg A., Stocking M. y da Veiga M. (1997). The impact of erosion on the productivity of a ferrasol and a sambisol in Santa Catarina, southern Brazil. *Soil Use Manage.* 13, 90-96.
- Trueba-Espinosa A., Oropeza-Mota J., Ortiz-Solorio C., Martínez-Alcántara A. y Ruelas-Ángeles G. (2004). Identificación de zonas erosionadas mediante el tratamiento de imágenes digitales con una red neuronal. *Agrociencia* 38, 573-581.
- Uribe-Gómez S., Francisco-Nicolás N. y Turrent-Fernández A. (2002). Pérdida de suelo y nutrientes en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36, 161-168.
- Uzcátegui H. y Carrero L. (1992). Estudio de suelos del Sector Río Orituco-Chaguaramas, Edo. Guárico. Nivel Preliminar (Escala 1:50.000). Documento del MARNR, Caracas, 51 p.
- Valetin C. e Ingram J. (1998). Global change and soil degradation. 16th World Congress of Soil Science. Abstracts. Montpellier.
- Vázquez-Alarcón A., Justin-Cajuste L., Siebe-Grabach C., Alcántar-González G. y de la Isla de Bauer M. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35, 267-274.
- Velasco J. y Volke T. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta Ecológica* 66, 41-53.
- Waliszewski S. e Infanzón R. (2003). Diferencias en concentración de plaguicidas organoclorados persistentes en suelo, paja y granos de trigo. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 19, 5-11.