



SUELOS, INFORMACION Y SOCIEDAD

J.A. Zinck

Faculty of Geo-Information
Science and Earth
Observation (ITC)
University of Twente, P.O.
Box 6, 7500 AA Enschede,
The Netherlands



alfredzinck@gmail.com

Palabras clave:
Suelos, degradación,
cartografía

RESUMEN

Este trabajo consta de cuatro partes abordando sucesivamente: (1) el tema de la degradación de suelos a nivel global, con énfasis en los daños causados por acciones humanas; (2) la crisis de los inventarios sistemáticos de suelos y la merma creciente de información edáfica actualizada; (3) las nuevas tendencias en mapeo de suelos, estimuladas por los avances realizados en el campo de la tecnología de la información; y (4) una serie de aplicaciones de la información de suelos, como ejemplos que ilustran el carácter polivalente de dicha información.

SOILS, INFORMATION AND SOCIETY

Key words:
Soils, degradation,
mapping

ABSTRACT

This papers includes four parts addressing consecutively: (1) the issue of soil degradation at global level, with emphasis on the human-induced damages; (2) the crisis of the systematic soil inventories and the increasing lack of up-to-date soil information; (3) the new trends in soil mapping that develop thanks to progress in information technology; and (4) a set of soil information applications as examples that illustrate the polyvalent character of this information.

**SUELOS
ECUATORIALES**
44 (2): 113-124

ISSN 0562-5351

INTRODUCCIÓN

El recurso suelo no goza del mismo reconocimiento y del mismo aprecio que los demás recursos naturales como son, por ejemplo, las aguas, los bosques o los yacimientos minerales, porque no es un bien directamente consumible y también porque existe la creencia común, pero errónea, de que los suelos son renovables a escala humana. Probablemente es por esta razón que la sociedad en general se siente menos preocupada por la degradación de suelos que por el agotamiento de otros recursos naturales. En efecto, los seres humanos logran destruir en unos pocos años un recurso, que le cuesta a la naturaleza miles de años para formarlo. En la primera parte de este trabajo, se llama la atención sobre la gravedad y la magnitud de la degradación de suelos, con énfasis en los daños causados por acciones humanas. Los datos sobre degradación de suelos actualmente disponibles han sido en su mayoría derivados de la información generada por los levantamientos de suelos. Muchos de estos datos son de fines del siglo pasado y no han sido actualizados desde entonces, porque el inventario sistemático de suelos ha sido discontinuado en muchos países, en parte debido a que los levantamientos convencionales de suelos son caros y la información edáfica se presenta frecuentemente en forma poco amigable para los usuarios. Esto ha conducido a una situación de crisis, un aspecto que se aborda en la segunda parte del trabajo. Pero la crisis resultó también ser saludable, porque creó la oportunidad para idear y desarrollar nuevos enfoques de cartografía de suelos, estimulados por los avances realizados en el campo de la tecnología de la información. En la tercera parte, se describen algunas de estas nuevas tendencias en el mapeo de suelos. Sin embargo, lo importante es que se utilicen efectivamente los datos y la información de suelos para la solución de problemas prácticos por parte de las comunidades locales y la sociedad en general. En la última parte, se describe una serie de aplicaciones de la información de suelos, desarrolladas mediante obras de investigación a nivel doctoral y de maestría en el ITC de Holanda, como ejemplos que ilustran el carácter polivalente de la información edáfica. Tal como lo sugiere el título, el objetivo general del trabajo consiste en establecer puentes entre el recurso suelo y la comunidad de usuarios mediante flujos de información.

EL SUELO, UN RECURSO EN PELIGRO

La degradación de suelos en términos físicos

El concepto de degradación de suelos y el de degradación de tierras no son sinónimos, pero el

primero es indudablemente el componente más importante del segundo. Existen algunas aproximaciones cuantitativas de la degradación de suelos a nivel global y continental, pero resulta frecuentemente difícil comparar datos provenientes de fuentes diferentes porque no se utilizaron los mismos criterios en la evaluación de la degradación.

A escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de suelos inducida por intervenciones humanas, el cual afecta cerca de 11 millones de km² (= 8.5% de los 130 millones de km² de tierras en la superficie del globo terráqueo). En conjunto, la erosión hídrica (10.94 millones de km²), la erosión eólica (5.49 millones de km²), la degradación química (2.39 millones de km²) y la degradación física (0.83 millones de km²) afectan, en diferentes niveles de intensidad, casi 20 millones de km², esto es, 15% de la superficie global de tierras o aproximadamente 66% de las tierras potencialmente arables a nivel mundial (Oldeman, 1994). Estas cifras, muy posiblemente, están por debajo de la extensión real de tierras degradadas. A escalas más grandes, los datos son más precisos, revelando proporciones mayores de degradación.

En las regiones secas del mundo, por ejemplo, los suelos son particularmente vulnerables al uso y, como consecuencia, cerca del 70% de los 52 millones de km² de su extensión se encuentra afectado por algún tipo de degradación o por una combinación de procesos de degradación (Dregne&Chou, 1994). En las mismas regiones secas, cerca de 10 millones de km² corresponden a suelos afectados por salinidad primaria en condiciones naturales, en una extensión que representa 7.7% de la superficie global de tierras, o sea 20 veces la superficie de un país como Francia, y que equivale a 33% de las tierras potencialmente arables a nivel mundial. En adición, 0.8 millones de km² sufre salinización secundaria causada por el manejo inadecuado de tierras agrícolas, con 58% de éstas en áreas de regadío. Aproximadamente 20% de todas las tierras regadas se encuentra afectado por sales, y esta cifra se incrementa constantemente (Ghassemi et al., 1995). En algunas regiones de Africa, expuestas a erosión de suelos y desertificación, la productividad de las tierras ha mermado aproximadamente 50% (Dregne, 1990).

Todavía no se dispone de buena información sobre las tasas de degradación de tierras, porque esto requiere seguimiento temporal. Se estima que cada segundo se pierden 8.5 hectáreas de tierras productivas (Movillon et al., 2001).

La degradación de suelos en términos económicos

A escala global, se pierden anualmente 75 mil millones de toneladas de suelo, que representan un costo de US\$ 400 mil millones, o sea

aproximadamente US\$ 70 por persona cada año (Lal, 1998). Para el conjunto de los países del sur de Asia, se estima la pérdida de productividad del suelo por erosión hídrica en US\$ 5.4 mil millones por año y la pérdida de productividad del suelo por erosión eólica en US\$ 1.8 mil millones por año (UNEP, 1994). En los Estados Unidos de América (USA), el costo total de la erosión en tierras agrícolas monta a US\$ 44 mil millones por año, lo que significa US\$ 250 por hectárea (Lal, 1998).

También se ha estimado el impacto económico de procesos específicos de degradación como consecuencia del mal manejo de las tierras. Por ejemplo, la compactación de suelo en los USA genera pérdidas a nivel de finca de cerca de US\$ 1.2 mil millones por año (Gill, 1971). En Zimbabwe, el agotamiento de la fertilidad del suelo causa una pérdida de ganancia anual del orden de US\$ 1.5 mil millones (UNEP, 1994). El daño económico por salinización secundaria en la cuenca del Río Colorado se estima en US\$ 750 millones por año (Ghassemi et al., 1995).

Todas estas cifras son alarmantes. En realidad, se trata solamente de aproximaciones generales. Para obtener datos más precisos sobre el nivel de severidad, la extensión y la tasa de degradación de las tierras por tipo de proceso, se requieren evaluaciones y monitoreos a mayor escala.

LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELOS EN CRISIS

Tradicionalmente, el inventario sistemático de suelos a nivel de país o de región era la fuente principal de datos sobre degradación de suelos. Pero, desde principios de los años 1990, muchos países han descontinuado o disminuido drásticamente los proyectos y las operaciones de levantamiento de suelos por una serie de razones, que dependen tanto del contexto económico de la época (razones “coyunturales”) como de fallas en la calidad de la información edáfica (razones “estructurales”).

Razones coyunturales

Las razones coyunturales están relacionadas con la situación económica general y son por lo tanto exteriores al levantamiento de suelos.

La recesión económica global, relacionada mayormente con la crisis del petróleo, lleva a restricciones presupuestarias a nivel nacional, lo que causa una reducción de las actividades de inventario de los recursos naturales en general y de los suelos en particular.

La expansión del neo-liberalismo económico y la preeminencia de la economía de mercado tienden a

favorecer el control de las decisiones de uso del suelo por los mecanismos del mercado, mientras que las instancias gubernamentales pierden sus prerrogativas o abandonan sus responsabilidades en la planificación del uso de las tierras. Como consecuencia, la demanda y/o implementación de información edáfica disminuyen.

En muchos países desarrollados (occidentales), la cobertura cartográfica sistemática de suelos a escalas apropiadas está completa o por terminarse. En consecuencia, intereses y fondos se desplazan hacia levantamientos de suelo relacionados con proyectos específicos, generalmente a escala local, y aplicaciones innovadoras de la información edáfica existente.

Razones estructurales

Las razones estructurales son inherentes al levantamiento de suelos y se refieren básicamente a relaciones desfavorables entre productor y usuario de la información edáfica.

Visibilidad insuficiente y presentación inapropiada de la información edáfica

El lenguaje y el formato de los informes técnicos, de los mapas y de las leyendas no son amigables y difícilmente accesibles al no-especialista (nomenclatura complicada).

Los mapas muestran excesivos detalles, que obscurecen los patrones de distribución de los suelos y de sus potenciales de uso.

El estilo de presentación y publicación no resulta atractivo (p.e. mapas en blanco y negro), llevando al usuario a subestimar la calidad de la información proporcionada.

Los mapas generales de suelos se utilizan para tomar decisiones y solucionar problemas, que pueden situarse en realidad fuera de los objetivos de los mapas concernidos, lo que lleva a cuestionar injustamente la adecuación de la información edáfica.

El usuario no está interesado en el mapa taxonómico básico de suelos, sino en los mapas interpretativos derivados del documento básico, con leyendas simples diseñadas para propósitos específicos.

Falta de precisión en los mapas de suelos

Los límites cartográficos no pasan por donde deberían pasar debido a imprecisiones en el levantamiento de campo o por desplazamientos de delineaciones que resultan de la manipulación cartográfica.

Las unidades cartográficas no son lo suficientemente homogéneas para los propósitos de uso. La presencia de impurezas y la inclusión de suelos contrastantes disminuyen la calidad de las predicciones sobre el potencial de uso de los suelos. Raramente, se menciona el grado de confiabilidad del mapa de suelos.

Las propiedades edáficas, que se requieren para usos específicos, no se encuentran mencionadas en la leyenda del mapa o en el informe, porque el inventario se diseñó y ejecutó para planificación general del uso de las tierras y no para aplicaciones locales.

Altos costos de los levantamientos de suelos

El levantamiento sistemático de suelos es una operación lenta y costosa. El mismo involucra personal de nivel universitario especializado, equipos y determinaciones de campo y de laboratorio, y datos de teledetección, que contribuyen todos a encarecer la información edáfica.

Los costos de oportunidad son altos, porque la información no se suministra en el momento adecuado, lo que hace que las decisiones sobre uso y manejo de los suelos se tomen sin ella.

En la evaluación de los costos, no se toma en cuenta el valor agregado generado por las interpretaciones con fines de usos múltiples, que se derivan del mismo mapa básico de suelos.

El levantamiento de suelos no se considera una actividad directamente productiva. Los beneficios derivados y la relación costo/beneficio son difíciles de evaluar en términos cuantitativos.

Esta situación no ha cambiado fundamentalmente en tiempos recientes y todavía sirve de telón de fondo a los cambios que se están perfilando en la actualidad. Sólo unos pocos países continúan realizando levantamientos sistemáticos de suelos, a pesar de que el 30% de los países del mundo, que representan 70% de las tierras emergidas y 60% de la población mundial, todavía no tienen una cobertura cartográfica de suelos completa a escalas cercanas al 1:1 millón (datos de 1992 según Purnell, 1995), sin mencionar la falta de información cartográfica de suelos a escalas más detalladas.

TENDENCIAS ACTUALES EN INFORMACION DE SUELOS

Para abaratar los levantamientos de suelos y hacerlos más atractivos a los usuarios, se han desarrollado innovaciones tecnológicas y metodológicas para la recolección de datos y la conversión de éstos en información, básicamente a través del uso creciente de la tecnología de la información en tres áreas principales: teledetección,

sistemas de información geográfica, y estadísticas espaciales.

Teledetección y modelos digitales de elevación: para la captura y el monitoreo de datos, aprovechando los progresos sostenidos en términos de resolución espectral, espacial y temporal, y las ventajas derivadas de la fusión de datos espectrales multi-fuentes y la integración de éstos con información contextual.

Sistemas de información geográfica (SIG): para el almacenamiento, el procesamiento y la modelización de datos, así como para el despliegue de la información en términos amigables a los usuarios, con énfasis creciente en la calidad de los datos de entrada, la cual controla a su vez la calidad de la información de salida.

Estadísticas espaciales: para evaluar, controlar y mejorar la calidad de los datos en términos de confiabilidad y precisión (kriging, lógica difusa, geometría fractal, inferencia de datos mediante funciones de transferencia, etc).

Estos avances tecnológicos y metodológicos han conducido a disminuir la recolección de datos de campo y de determinaciones de laboratorio, sin poder sustituirlos cabalmente. En algunos países, se reciclan datos edáficos de 30-40 años de edad en importantes proyectos de desarrollo o para la evaluación de riesgos ambientales, sin perspectiva clara de que estos datos vayan a ser actualizados a corto plazo.

En términos de cartografía de suelos, el tradicional mapa taxonómico, rica base para múltiples interpretaciones con fines agrícolas, ingenieriles, sanitarios, ambientales, ecológicos, turísticos y estéticos, está siendo reemplazado por mapas parciales, enfocados hacia propósitos más específicos. A continuación, se mencionan algunas de estas orientaciones actuales en el dominio de la cartografía de suelos, incluyendo mapas temáticos de suelos, mapas pedométricos, mapas geopedológicos y mapas participativos de suelos.

Mapas temáticos de suelos

Los mapas temáticos de suelos muestran un solo atributo edáfico a la vez (p.e. carbono orgánico, conductividad eléctrica, pH, etc.) o una combinación de pocos atributos interrelacionados. Usualmente, los datos se refieren a la capa superficial del suelo, se procesan mediante técnicas geoestadísticas y se relacionan con algún problema específico de uso o manejo del suelo, frecuentemente de carácter ambiental (p.e. degradación o contaminación de suelos). Este enfoque consiste en cartografiar una rebanada 2D de suelo y conlleva a ver el manto edáfico en forma fragmentaria, algo limitada en

comparación con el concepto de suelo como entidad 3D y como cuerpo organizado con múltiples interacciones. En los casos donde se requiere alta confiabilidad de la información edáfica, como por ejemplo en aplicaciones para agricultura de precisión, los mapas de atributos se realizan a nivel super-detallado.

Mapas pedométricos

Típicamente, en la elaboración de los mapas pedométricos, los modelos digitales de elevación o de terreno (MDE) sirven de sustento a la cartografía de suelos. Combinados con datos derivados de la teledetección para caracterizar propiedades de la cubierta vegetal (p.e. NDVI), de la superficie del terreno (p.e. rugosidad, costra salina) y de la capa arable (p.e. materia orgánica, humedad), los MDE se utilizan para inferir atributos edáficos y modelizar la distribución espacial de los suelos, con, frecuentemente, pocos puntos de verificación de campo. Los datos faltantes se generan mediante funciones de transferencia a partir de los pocos datos primarios disponibles. En casos extremos de modelización “in-vitro”, se ha llegado a considerar el mapa de pendientes como un sustituto del mapa de suelos.

Mapas geopedológicos

El enfoque geopedológico para cartografiar suelos combina activamente la contribución de la geomorfología y de la pedología, considerando el suelo como un cuerpo 3D en el paisaje (soilscape o paisaje edáfico). El levantamiento geomorfológico suministra los límites cartográficos de las unidades de mapeo de suelos, mientras que la pedología proporciona el contenido edáfico de estas unidades de mapeo en términos de componentes taxonómicos, su porcentaje areal y su patrón de distribución espacial. Este enfoque es particularmente robusto, porque combina los procedimientos convencionales de campo con las ventajas de la teledetección para la captura de datos y de los SIG para su procesamiento.

Mapas participativos de suelos

En las sociedades rurales tradicionales, se manejan conjuntamente el conocimiento empírico de los campesinos y el conocimiento técnico de los pedólogos para preparar mapas de suelos integrados. La colaboración de antropólogos, pedólogos y geógrafos, entre otros, permite abordar la cartografía de suelos y tierras, y su interpretación con fines prácticos, en forma multidisciplinaria, donde los agricultores/campesinos participan activamente en la elaboración de los mapas de suelos y paisajes edáficos (básicos e interpretativos) de su territorio. Los mapas

participativos de suelos gozan de la adhesión de los actores involucrados, lo que garantiza un uso efectivo de la información.

APLICACIONES DE LA INFORMACION DE SUELOS

Al fin y al cabo, la necesidad de usar la sofisticada tecnología moderna de la información para mejorar el inventario de suelos es probablemente un problema menos relevante que el de llenar la brecha entre productor de información y usuario potencial de la misma. Si la información de suelos no es fácil de acceder e implementar, el usuario estará inclinado a ignorarla en su toma de decisiones. Resulta por lo tanto importante anticipar la demanda y ofrecer aplicaciones creativas de la información de suelos, para así contribuir a la solución de problemas relacionados con el manejo y la degradación de suelos, el uso sustentable de las tierras, la planificación del uso de las tierras, y la evaluación de riesgos ambientales, entre otras cosas.

A continuación, se hace referencia a trabajos de investigación aplicada desarrollados en el ITC, ahora una facultad de la Universidad de Twente, Países Bajos, con base en tesis doctorales, tesis de maestría y proyectos cooperativos de investigación. Todos estos trabajos han utilizado teledetección para recolectar y monitorear datos, así como técnicas de SIG para procesar datos y generar información, pero con claro énfasis en solucionar problemas de desarrollo más bien que mejorar la tecnología de la información. Son ejemplos ilustrativos de las múltiples posibilidades de implementar información edáfica en un amplio espectro de aplicaciones, incluyendo degradación de suelos, manejo de suelos, riesgos ambientales inducidos por propiedades edáficas, los suelos en la planificación del uso de las tierras, y los suelos en los estudios sobre cambio climático. En todos estos trabajos, la geopedología constituye la piedra angular del marco conceptual y metodológico que sustenta la investigación. Se usó también este marco para estructurar un modelo conceptual de base geográfica de datos de suelo (Zinck & Valenzuela, 1990) y para analizar patrones espaciales de distribución de los suelos mediante índices cuantitativos (Saldaña, 1997; Saldaña et al., 1998).

Degradación de suelos resultando de manejo inapropiado

Compactación de la capa arable. La creciente demanda de alimentos requiere un constante incremento de la producción agrícola. Esto puede lograrse de dos maneras: mejorando la productividad de los cultivos o ampliando la superficie cultivada. La

tendencia actual es hacia la expansión de la frontera agrícola con base en deforestación (100.000 km² por año a nivel mundial) e incorporación de tierras nuevas, especialmente en dos zonas agro-ecológicas: los trópicos húmedos y las áreas sub-húmedas a semi-áridas. Resulta que en ambas zonas los suelos son particularmente frágiles y de baja resiliencia, frecuentemente con aptitudes marginales para agricultura y por lo tanto expuestos a rápida degradación, especialmente mediante compactación de la capa arable.

Se ha hecho un seguimiento de la compactación de suelos en la planicie sub-húmeda a semi-árida del Chaco, Provincia de Tucumán, en el noroeste de Argentina, un área de frontera agrícola en plena expansión gracias a los precios muy favorables de la soya en los mercados internacionales. A este efecto se utilizó una serie temporal de datos de teledetección multi-fuentes, cubriendo un período de 25 años (Flores, 1997; Zinck et al., 2006). Los valores de los indicadores de compactación, incluyendo resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo, aumentaron de 10-50% en la capa arable después de apenas dos décadas de agricultura mecanizada. De igual manera, en la región semi-árida de Shiraz, Provincia de Fars, en Irán central, los altos valores de densidad aparente causados por el monocultivo mecanizado de trigo resultaron ser el factor más limitativo para el manejo sustentable del suelo (Moameni, 1999; Moameni&Zinck, 1999).

En los trópicos húmedos, una causa mayor de compactación del suelo es el pisoteo por bovinos en pastos establecidos. Se ha analizado este problema en el área de San José del Guaviare, en la Amazonia colombiana, donde 350.000 hectáreas de bosque han sido deforestadas durante las últimas dos a tres décadas para establecer pastizales. Después de unos pocos años dedicados a cultivos anuales, se introduce *Brachiaria* para la cría de ganado bovino, con densidades de animal relativamente altas (0.5-0.7 UA/ha) en los primeros años, pero sin rotación de potreros. En el plazo de unos 10 años, la calidad y la cantidad de los pastos disminuyen bajo el efecto de compactación del suelo por pisoteo, a tal punto que se abandonan los potreros y se rozan nuevas áreas de bosque mediante tala y quema (Martínez & Zinck, 1994, 2004).

Salinización de suelos

La salinización es un creciente problema de degradación de suelos en regiones sub-húmedas, semi-áridas y áridas, especialmente en áreas de regadío. Resulta relativamente fácil identificar y monitorear la presencia de sales en la superficie del terreno con

datos de teledetección, pero el origen de las sales se encuentra frecuentemente en las capas profundas del manto edáfico, en el contacto con el material parental o la mesa freática, lo que necesita detallado trabajo de campo para diagnosticar el problema y seguir su evolución. Se han utilizado diversos enfoques para monitorear el riesgo ambiental de la salinización de suelos: (1) mediante la comparación de series temporales de datos de teledetección en el área de Cochabamba, Andes orientales de Bolivia (Metternicht, 1996; Metternicht&Zinck, 1996, 1997, 2003), y en el área de Shiraz, Irán central (Moameni, 1999); y (2) mediante la comparación de mapas históricos y mapas actuales de salinidad en el área de Gorgan, en el norte de Irán (Naseri, 1998).

Agotamiento de la fertilidad de suelos

En la agricultura mecanizada moderna se utilizan fertilizantes químicos para suministrar nutrientes a los cultivos. En cambio, raramente se aplica estiércol, lo que resulta en que el contenido de materia orgánica en los suelos se encuentra usualmente por debajo de los niveles de requerimiento de las plantas. El diagrama de control de calidad, comúnmente utilizado en el campo de la producción industrial, es una técnica adecuada para evaluar y monitorear el estado de los nutrientes en el suelo por comparación con los niveles de aceptación/suficiencia específicos de cada cultivo. Esta técnica se implementó en el área de Shiraz, Provincia de Fars, en Irán central, para diagnosticar el agotamiento de los nutrientes en el suelo bajo cultivo continuo de trigo. Esto permitió demostrar que los contenidos de carbono orgánico y de nitrógeno se encontraban completamente fuera de control agronómico en comparación con los requerimientos del trigo (Moameni&Zinck, 1997).

Modelización integrada de la degradación de suelos

Frecuentemente los procesos de degradación de suelos operan en cadena. Por ejemplo, el agotamiento de la materia orgánica contribuye a debilitar la estructura del suelo, una situación que a su vez favorece la compactación de la capa arable y, por vía de consecuencia, la erosión laminar. El uso de indicadores para monitorear estos procesos en el tiempo, junto con mapas multi-temporales de uso de las tierras, permitió construir modelos de degradación continua del suelo en un dominio combinado tiempo-profundidad, en un área de producción de soya de la Provincia de Río Grande do Sul, en el sur de Brasil (Wöhl-Coelho, 1999).

Manejo de suelos y agricultura sustentable

La degradación de los suelos afecta negativamente la sustentabilidad agrícola. Se han hecho grandes esfuerzos para identificar indicadores y calcular índices de sustentabilidad (Farshad&Zinck, 1993; Zinck&Farshad, 1995). Los términos de la sustentabilidad agrícola, incluyendo criterios e indicadores para la evaluación, son específicos, entre otras consideraciones, a las escalas espaciales y temporales, a los niveles jerárquicos de la estructura de los sistemas agrícolas, y a los tipos de sistemas de producción a nivel de finca. Por lo tanto, se necesita una amplia variedad de enfoques para evaluar correctamente la sustentabilidad a diferentes escalas, niveles y tipos de agricultura. Este problema se abordó mediante una metodología de pasos escalonados, con una serie de enfoques anidados que emplean indicadores simples o compuestos con fines de evaluar la sustentabilidad agrícola a cuatro niveles jerárquicos, incluyendo el sistema de manejo del suelo, el sistema de cultivo, el sistema de producción, y el sistema del sector agrícola como un todo.

Se han realizado varios estudios de caso para ensayar y calibrar una serie de técnicas de evaluación específicas a cada nivel del macro-sistema agrícola (Zinck et al., 2004).

Sistema de manejo del suelo

Un estudio de caso en Irán enfoca al sistema de manejo del suelo a nivel de las unidades individuales de suelo, utilizando diagramas estadísticos de control de calidad para evaluar el estado de la fertilidad de suelo y su efecto en la sustentabilidad agrícola. Límites estadísticos son adecuados para monitorear el comportamiento de una población de datos durante un lapso de tiempo determinado, pero los mismos tienen que ser substituidos por estándares de aceptación/suficiencia para evaluar la sostenibilidad. Una limitación importante de esta técnica es que se necesitan grandes series de datos para poder seleccionar al azar muestras representativas a partir de la población total y comprobar su distribución normal (Moameni&Zinck, 1997; Moameni, 1999).

Sistema de cultivo

Un segundo estudio de caso en Kenya se concentra en el sistema de cultivo a nivel de parcela, utilizando el análisis de la brecha de rendimientos para evaluar la sustentabilidad de la productividad de los cultivos. Aunque esta técnica no indica directamente qué nivel de rendimiento es sustentable, la misma señala que hay niveles de productividad de los cultivos más altos que los rendimientos actuales de los agricultores, que podrían alcanzarse con el uso de insumos adicionales

y de prácticas de manejo mejoradas. Si el agricultor pudiese elevar el rendimiento a un nivel superior, su actividad agrícola sería más provechosa y por lo tanto económicamente más sustentable (Wokabi, 1994).

Sistema de producción

Un tercer estudio de caso en Irán se refiere al sistema agrícola a nivel de la unidad de producción, o sea a nivel de finca, utilizando el análisis del balance energético para comparar la sustentabilidad de sistemas agrícolas modernos y tradicionales. Esta técnica presenta la ventaja de expresar todos los parámetros de entrada y salida en una misma y sola unidad de medición. También permite establecer razones de entrada/salida y comparar diferentes sistemas de producción en términos cuantitativos con fines de evaluar su sustentabilidad. Sin embargo, este enfoque debe ser combinado con técnicas complementarias para cubrir las variadas facetas del concepto de sustentabilidad (Farshad, 1997; Farshad&Zinck, 2000).

Sistema del sector agrícola

Un último estudio de caso realizado en Venezuela aborda el sector agrícola como un todo, utilizando un índice agregado para monitorear la sustentabilidad de la actividad agrícola a nivel regional/nacional. Los indicadores componentes del índice fueron seleccionados de acuerdo a la disponibilidad de datos, la sensibilidad de estos datos a cambios temporales, y su capacidad de describir cuantitativamente el comportamiento del sector agrícola de una región o de un país. El índice que se utilizó necesita ser afinado con la integración de indicadores adicionales y la alocación de pesos diferenciales a los indicadores para reflejar adecuadamente su relevancia y su dinámica (Berroterán&Zinck, 2000).

En general, se necesitan todavía esfuerzos para integrar los varios enfoques metodológicos en un marco coherente, que permita navegar a través de los niveles jerárquicos del macro-sistema agrícola y tomar en cuenta los muchos requerimientos involucrados en un modelo holístico de la sustentabilidad.

Conocimiento indígena y manejo de suelos

En sociedades rurales tradicionales, la co-evolución entre ecosistema y sociosistema dió a los campesinos/agricultores un conocimiento profundo sobre manejo de suelos. Partiendo de esta realidad, se analizaron prácticas y sistemas integrados de manejo de suelos y aguas, que han demostrado su sustentabilidad gracias a una co-evolución milenaria, en la Provincia de Hamadan, Irán occidental

(Farshad&Zinck, 1998). Paralelamente, especial atención fue dedicada a la definición del campo conceptual y metodológico de la etnopedología, la disciplina que estudia el conocimiento local (o indígena) de suelos (Barrera-Bassols, 2003; Barrera-Bassols&Zinck, 2003).

La etnopedología, una disciplina híbrida alimentada por las ciencias naturales y sociales, abarca todos los sistemas cognitivos de suelos y tierras en comunidades rurales, desde los más tradicionales hasta los modernos. Inicialmente, los estudios etnográficos clásicos concentraban su atención en el análisis lingüístico de los sistemas locales de clasificación de suelos y tierras, mientras que el enfoque comparativo se proponía establecer similitudes y diferencias entre conocimiento local e información científica. Más recientemente, el interés cambió y se dirigió hacia un enfoque más integral, que hace hincapié en el contexto cultural como base para la modelización del manejo sustentable de suelos a nivel local. La investigación etnopedológica cubre un amplio abanico de tópicos, centrados alrededor de cuatro áreas mayores: (1) la formalización del conocimiento local sobre suelos y tierras en esquemas de clasificación, (2) la comparación entre clasificaciones de suelos locales y técnicas, (3) la descripción de los sistemas locales de evaluación de tierras, y (4) la evaluación de prácticas de manejo agro-ecológicas.

Se ha evaluado la situación actual de la etnopedología a nivel mundial con base en una compilación de 895 referencias con respecto a la abundancia, la distribución y la diversidad de los estudios etnopedológicos (EPS) (Barrera-Bassols&Zinck, 2000). Los EPS recopilados se distribuyen en 61 países, esencialmente en África, América y Asia, abarcando 217 grupos étnicos. La densidad geográfica de EPS se correlaciona positivamente con la diversidad lingüística y la diversidad biológica, respectivamente. La mayoría de los EPS se ejecutó en zonas agro-ecológicas frágiles, donde las comunidades locales han desarrollado sistemas complejos de manejo de tierras y aguas para compensar la escasez de recursos. Entre los tres componentes principales de la etnopedología, los sistemas cognitivos locales (Corpus) y los sistemas de manejo locales (Praxis) han recibido hasta ahora más atención que los sistemas locales de creencias y percepción (Kosmos). Si la investigación etnopedológica le diera más importancia a la cosmovisión de las comunidades locales, los EPS podrían mejorar su contribución a la formulación e implementación de los programas de desarrollo rural.

Los suelos en la planificación del uso de las tierras

La planificación del uso de las tierras puede abordarse desde diferentes perspectivas. Se trata

claramente de un área multidisciplinaria, que necesita la contribución concertada de una variedad de especialistas. Hay una tajada de suelos en el pastel, y ésta es la brecha que hemos tratado de ocupar con el propósito de contribuir a la planificación física a nivel local y al análisis de los conflictos de uso de las tierras a nivel regional. La planificación física en áreas rurales necesita información edáfica para agricultura, instalaciones sanitarias y obras de ingeniería civil, entre otras aplicaciones. Diseñar y desarrollar un sistema de riego, por ejemplo, necesita información de suelos para la selección de cultivos, método de riego y frecuencia de riego. La construcción de un centro poblado para los regantes requiere información de suelos para casas, carreteras, rellenos sanitarios y campos de absorción de los pozos sépticos (Zinck, 1990).

Otro tipo de ambiente donde la información edáfica demostró ser de mucha utilidad son las áreas peri-urbanas, por donde las ciudades se expanden rápida y desordenadamente, en general a expensas de tierras agrícolas de primera calidad. Las periferias urbanas son áreas volátiles, donde ocurren cambios repentinos y no planificados en el uso de las tierras. En una economía de mercado global, planificar la ocupación del suelo puede resultar ser una actividad frustrante, ya que el uso de las tierras se encuentra controlado por el comportamiento de los mercados financieros. Aún con estas limitaciones, la información de suelos es útil para detectar conflictos de uso, evaluar las aptitudes de las tierras para uso agrícola y uso urbano, establecer escenarios de uso de las tierras y proponer esquemas de usos preferidos. Se desarrolló un estudio de este tipo en la periferia occidental de Caracas, Venezuela (Rodríguez, 1995).

Procesos y riesgos ambientales inducidos por suelos

Las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje determinan su susceptibilidad a ser dañados por procesos como son erosión laminar, incisión de cárcavas y movimientos en masa.

Erosión laminar

La erosión laminar es mucho menos espectacular que la erosión por cárcavas o por deslizamientos, pero contribuye al truncamiento de los suelos años tras años, por lo que causa pérdidas considerables de la capa arable. Para entender los mecanismos involucrados en la erosión laminar y evaluar la magnitud de la pérdida de suelo que ocasiona, un buen enfoque consiste en caracterizar el comportamiento del suelo en pequeñas parcelas experimentales sometidas a lluvia artificial. Esto permite medir con precisión la contribución de la saltación pluvial y del

escurrimiento superficial, respectivamente, a la producción de sedimentos. Los resultados así obtenidos pueden extrapolarse a la totalidad de una cuenca hidrográfica en base a un mapa de suelos. Se ejecutó un estudio de esta naturaleza en la región semi-árida de Maroua, en el norte de Camerún (Mainam&Zinck, 1998; Mainam, 1999; Mainam et al., 2002).

Erosión por cárcavas

Los mecanismos que intervienen en la erosión por cárcavas todavía no se entienden cabalmente, lo que contribuye a hacer la modelización determinística engorrosa (Zinck et al., 2001). Una cárcava, por ejemplo, puede iniciarse a partir de un entalle de surco, o a partir de un deslizamiento de suelo, o aún a partir de un conducto subterráneo de sufusión. La fusión de datos de teledetección para el reconocimiento de rasgos en la superficie del terreno y la modelización cartográfica en SIG ofrecen interesantes posibilidades para vencer las limitaciones de la modelización determinística. En la cuenca de Cochabamba, ubicada en la cordillera oriental de los Andes bolivianos, se logró discriminar áreas con cárcavas de otros rasgos de superficie gracias a la fusión de datos de Landsat TM y de JERS-1 SAR (Metternicht&Zinck, 1998). La exploración de relaciones de causa-efecto entre factores ambientales y cárcavas resultantes permite identificar los factores más favorables a la formación de cárcavas y sus valores umbrales. Estos valores pueden incorporarse en sistemas expertos para detectar áreas potencialmente susceptibles al entalle de cárcavas. Se implementó un enfoque de este tipo en dos pasos, exploratorio-predictivo, para evaluar el riesgo de erosión por cárcavas en un área de altiplanicie de la faja volcánica transmexicana, en México central (Vázquez-Selem&Zinck, 1994).

Movimientos en masa

De manera similar a la formación de cárcavas, los movimientos en masa todavía escapan substancialmente a la modelización determinística. Las propiedades de suelo (físicas, mecánicas, químicas y biológicas) controlan en gran parte la susceptibilidad intrínseca de la cobertura edáfica a la erosión por movimientos en masa (Zinck et al., 2001). Este estrecho control permitió establecer relaciones de causa-efecto y preparar mapas de severidad de riesgos, a partir de una combinación de información geomorfológica y edáfica, en las altiplanicies de México central (Bocco, 1990) y en los Andes colombianos (López &Zinck, 1991).

Fragilidad y vulnerabilidad de ecosistemas naturales

Los ecosistemas tropicales son intrínsecamente frágiles y altamente vulnerables a tensores externos. En estas condiciones, intervenciones humanas inadecuadas pueden causar daños irreversibles. Las sabanas de arenas blancas sobre podzoles gigantes en la Cuenca Amazónica son muy vulnerables a la construcción de carreteras, mientras que los suelos rojos de baja fertilidad natural son muy vulnerables a la sedentarización de tribus nómadas, que practican la tradicional agricultura itinerante de roza-tumba-quema. Se analizó el impacto de acciones de este tipo en la Amazonia venezolana (Bastidas de Calderón, 1998; Bastidas &Zinck, 1998).

Balance de erosión-sedimentación a nivel de cuenca

Un estudio en el Himalaya de Nepal central permitió determinar relaciones dinámicas entre áreas de erosión, almacenamiento (entrampamiento) y sedimentación en la cuenca del Río Trisuli (Shrestha, 2000). En las altas montañas, la producción de sedimentos por movimientos en masa y erosión glaciar se encuentra controlada esencialmente por procesos naturales de ablación, sin intervención humana. Las cuencas de las montañas medias, densamente pobladas e intensivamente utilizadas para el cultivo de arroz en terrazas, se comportan como sistemas cerrados, que retienen in-situ una amplia proporción de los sedimentos producidos. Los sedimentos, que vienen de las altas montañas a través de grandes ríos troncales, causan degradación de tierras en las cuencas bajas debido al azolvamiento de los sistemas de riego y de su infraestructura de bombeo, conducción y distribución de agua.

Suelos y cambio climático

Los cambios climáticos, un tema de gran preocupación para la sociedad, pueden ser aproximados desde varias perspectivas. El conocimiento de los cambios climáticos del pasado ayuda a predecir eventos futuros. La información edáfica puede contribuir a mejorar este conocimiento, ya que los suelos registran fielmente las condiciones climáticas vigentes en el pasado. Se abordó este tema a través de la datación radiocarbónica de paleosuelos, que cubren el Pleistoceno Superior y el Holoceno en diferentes tipos de ambientes: turbas (Histosoles) en las altas mesetas (“tepuies”) de la Amazonia venezolana (Zinck et al., 2011), secuencias de loess-paleosuelos en los Andes secos y la planicie del Chaco en el noroeste de Argentina (Zinck & Sayago, 1999, 2001), y paleodunas en la cuenca del Río Branco, en

el norte de la Amazonia brasileña (Carneiro Filho & Zinck, 1994).

CONCLUSION

Combinando técnicas convencionales de levantamiento (con datos de campo y de laboratorio), teledetección, y procesamiento y modelización de datos en SIG, el inventario de suelos está en condiciones de suministrar una valiosa información para el manejo de suelos, la planificación del uso de las tierras y la evaluación de riesgos ambientales.

REFERENCIAS

- Barrera-Bassols N. 2003. Symbolism, knowledge and management of soil and land resources in indigenous communities: ethnopedology at global, regional and local scales. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 2 volumes, 796 pp.
- Barrera-Bassols N, Zinck JA. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspective: An annotated bibliography. ITC Publication 77. ITC, Enschede, The Netherlands, 636 pp.
- Barrera-Bassols N, Zinck JA. 2003. Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. *Geoderma* 111 (2003): 171-195.
- Bastidas de Calderón M. 1998. Environmental fragility and vulnerability assessment of Amazonian landscapes and ecosystems in the middle Orinoco River Basin, Venezuela. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 394 pp.
- Bastidas M, Zinck JA. 1998. The vulnerability of fragile ecosystems in the Venezuelan Amazon. Impact assessment of road construction. Proceedings 16th World Congress of Soil Science, Symposium 36, Montpellier, France. 7 pages, CD-ROM.
- Berroterán JL, Zinck JA. 2000. Indicadores de la sostenibilidad agrícola nacional cerealera. Caso de estudio: Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela*, No. 17: 138-154.
- Bocco G. 1990. Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case study in Central Mexico. University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 130 pp.
- Carneiro Filho A, Zinck JA. 1994. Mapping paleo-aolian sand cover formations in the northern Amazon Basin from TM image. *ITC Journal* 1994-3: 270-282.
- Dregne HE. 1990. Erosion and soil productivity in Africa. *Journal of Soil and Water Conservation* 45: 431-436.
- Dregne HE, Chou NT. 1994. Global desertification dimensions and costs. In: Dregne HE (ed). *Degradation and Restoration of Arid Lands*. Texas Technical University, Lubbock, USA.
- Farshad A. 1997. Analysis of integrated soil and water management practices within different agricultural systems under semiarid conditions of Iran and evaluation of their sustainability. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 57, Enschede, The Netherlands, 395 pp.
- Farshad A, Zinck JA. 1993. Seeking agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 47: 1-12.
- Farshad A, Zinck JA. 1998. Traditional irrigation water harvesting and management in semiarid western Iran: a case study of the Hamadan region. *Water International* 23 (1998): 146-154.
- Farshad A, Zinck JA. 2000. Assessing agricultural sustainability using the six-pillar model: Iran as a case study. In: Gliessman SR (ed.). *Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies*. CRC Press, Boca Raton, pp.137-151.
- Flores E. 1997. Monitoring land use changes and comparing soil physical properties between arable and forest land in the western Chaco plain, NW Argentina. MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands, 151 pp.
- Ghassemi F, Jakeman AJ, Nix HA. 1995. Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies. The Australian National University, Canberra, Australia, and CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Gill WR. 1971. Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph, St. Joseph, USA.
- Lal R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 17: 319-464.
- López HJ, Zinck JA. 1991. GIS-assisted modelling of soil-induced mass movement hazards: a case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC Journal* 1991-4: 202-220.
- Mainam F. 1999. Modelling soil erodibility in the semiarid zone of Cameroon. Assessment of interrill erodibility parameters for mapping soil erosion hazard by means of GIS techniques in the Gawar area. Doctoral Thesis, Ghent University,

- Ghent, Belgium. ITC Dissertation 67, Enschede, The Netherlands, 387 pp.
- Mainam F, Zinck JA. 1998. Erodibility assessment of selected soils in northern Cameroon using a field rain simulator. Proceedings 16th World Congress of Soil Science, Symposium 31, Montpellier, France. 7 pages, CD-ROM.
- Mainam F, Zinck JA, Van Ranst E. 2002. Modelling interrill soil erosion in the semiarid zone of Cameroon. Proceedings 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, Symposium 23, Paper 37: 1-9, CD-ROM.
- Martínez LJ, Zinck JA. 1994. Modelling spatial variations of soil compaction in the Guaviare colonization area, Colombian Amazonia. ITC Journal 1994-3: 252-263.
- Martínez LJ, Zinck JA. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil & Tillage Research* 75 (2004): 3-17.
- Metternicht G. 1996. Detecting and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba valleys, Bolivia. A synergistic approach. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 36, Enschede, The Netherlands, 390 pp.
- Metternicht GI, Zinck JA. 1996. Modelling salinity – alkalinity classes for mapping salt-affected top soils in the semiarid valleys of Cochabamba (Bolivia). ITC Journal 1996-2: 125-135.
- Metternicht GI, Zinck JA. 1997. Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 18, No. 12: 2571-2586.
- Metternicht GI, Zinck JA. 1998. Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53 (1998): 143-153.
- Metternicht GI, Zinck JA. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85 (2003): 1-20.
- Moameni A. 1999. Soil quality changes under long-term wheat cultivation in the Marvdasht plain, South-Central Iran. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 284 pp.
- Moameni A, Zinck JA. 1997. Application of statistical quality control charts and geostatistics to soil quality assessment in a semi-arid environment of south-central Iran. In: Conf. Geo-Information for Sustainable Land Management, ITC, Enschede, The Netherlands, CD-ROM.
- Moameni A, Zinck JA. 1999. Data integration for assessing agricultural soil degradation in south central Iran. In: Proceedings Intern. Conf. on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management, IIRS, Dehradun, India, pp. 33-51.
- Movillon M, Richards B, Tumawis H. 2001. What happens on earth in one minute? In: Bridges EM et al. (eds). *Response to Land Degradation*. Science Publishers Inc., Enfield, NH, USA, p. 40.
- Naseri M. 1998. Characterization of salt-affected soils for modelling sustainable land management in semiarid environment. A case study in Gorgan Region, Northeast Iran. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 52 (2001), Enschede, The Netherlands, 321 pp.
- Oldeman LR. 1994. The global extent of land degradation. In: Greenland DJ, Szabolcs I (eds). *Land Resilience and Sustainable Land Use*. CABI, Wallingford, pp. 99-118.
- Purnell MF. 1995. Soil survey information supply and demand: international policies and stimulation programmes. *FAO, World Soil Resources Report* 80, Rome, pp. 30-35.
- Rodríguez O. 1995. Land use conflicts and planning strategies in urban fringes. A case study of western Caracas, Venezuela. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 27, Enschede, The Netherlands, 266 pp.
- Saldaña A. 1997. Complexity of soils and soilscape patterns on the southern slopes of the Ayllon Range, Central Spain. A GIS-assisted modelling approach. Doctoral Thesis, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands. ITC Dissertation 49, Enschede, The Netherlands, 251 pp.
- Saldaña A, Stein A, Zinck JA. 1998. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares river (Spain). *Catena* 33 (1998): 139-153.
- Shrestha D. 2000. Aspects of erosion and sedimentation in the Nepalese Himalaya: highland-lowland relations. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 77, Enschede, The Netherlands, 265 pp.
- UNEP. 1994. *Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people*. FAO, World Soil Resources Report 78, Rome.

- Vázquez-Selem L, Zinck JA. 1994. Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasca area, Central Mexico. *ITC Journal* 1994-3: 238-251.
- Wöhl-Coelho O. 1999. Modelamento da degradação de latossolos na Região de Fortaleza dos Valos, Rio Grande do Sul: uma aplicação SIG / sensoriamento remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 165 pp.
- Wokabi S. 1994. Quantified land evaluation for maize yield gap analysis at three sites on the eastern slope of Mount Kenya. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. *ITC Dissertation* 26, Enschede, The Netherlands, 289 pp.
- Zinck JA. 1990. Soil Survey: epistemology of a vital discipline. *ITC Journal* 1990-4: 335-351.
- Zinck JA, Berroterán JL, Farshad A, Moameni A, Wokabi S, Van Ranst E. 2004. Approaches to assessing sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 23 (4): 87-109.
- Zinck JA, Farshad A. 1995. Issues of sustainability and sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science* 75: 407-412.
- Zinck JA, Flores E, Sayago JM. 2006. Soil compaction and fertility depletion. In: Zinck JA (ed). *Land use change and land degradation in the western Chaco plain, Tucumán Province, Northwest Argentina, Burruyacú Region*. ITC-INGEMA, ITC Publication 84, pp. 169-231.
- Zinck JA, García P, Van der Plicht J. 2011. Tepuipeatlands: age record and environmental changes. In: Zinck JA, Huber O (eds). *Peatlands of the Western Guayana Highlands, Venezuela. Properties and Paleogeographic Significance of Peats*. Ecological Studies, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 189-236.
- Zinck JA, López J, Metternicht GI, Shrestha DP, Vázquez-Selem L. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, JAG* 3 (2001-1): 43-53.
- Zinck JA, Sayago JM. 1999. Loess-paleosol sequence of la Mesada in Tucuman province, northwest Argentina. Characterization and paleoenvironmental interpretation. *Journal of South American Earth Sciences* 12 (1999): 293-310.
- Zinck JA, Sayago JM. 2001. Climatic periodicity during the late Pleistocene from a loess-paleosol sequence in northwest Argentina. *Quaternary International* 78 (2001): 11-16.
- Zinck JA, Valenzuela, CR. 1990. Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal* 1990-3: 270-294.