

Evaluación y modelización hidrológica para el diagnóstico de “desastres naturales”

Evaluation and hydrological modelization in the natural hazard prevention

Recibido para evaluación: 30 de Septiembre de 2011
Aceptación: 01 de Diciembre de 2011
Recibido versión final: 13 de Diciembre de 2011

Ildefonso Pla Sentís¹

RESUMEN

La degradación de suelos afecta negativamente sus funciones como base de la producción de alimentos, de la regulación del ciclo hidrológico y de la calidad ambiental. Está creciendo en todo el mundo, en parte debido a faltas o deficiencias en las evaluaciones de los procesos y causas de dicha degradación en cada situación específica. Los procesos de degradación física de suelos se manifiestan a través de problemas de compactación, sellado, encostrado, escorrentía, erosión hídrica y eólica, movimientos en masa, etc., con efectos colaterales “in situ” y a distancia, a menudo con consecuencias desastrosas como inundaciones, deslizamientos de tierra, sedimentaciones, sequías, etc. Estos procesos están frecuentemente asociados a cambios desfavorables en los procesos hidrológicos responsables del balance de agua y régimen hídrico de los suelos, derivados principalmente de cambios en el uso y manejo de las tierras y de cambios climáticos. La evaluación de dichos procesos bajo diferentes escenarios de cambios de clima, propiedades de los suelos y uso y manejo de las tierras con el uso de modelos de simulación sencillos y flexibles, basados en procesos hidrológicos, permitiría predecir su desarrollo, y con ello, la selección y aplicación de prácticas apropiadas de conservación de suelos para eliminar o moderar sus efectos. Estos modelos requieren, como base, información adecuada sobre clima y propiedades hidrológicas de los suelos. A pesar de que existen metodologías y equipos comerciales cada vez más sofisticados y “precisos” para medir las diferentes propiedades físicas e hidrológicas de los suelos relacionados con los procesos de degradación, la mayoría de ellos solo son aplicables bajo condiciones de laboratorio y en suelos y condiciones muy particulares. A menudo se utilizan métodos indirectos, basados en relaciones o índices empíricos sin una adecuada validación, que frecuentemente conducen a costosos errores en la evaluación de procesos de degradación de suelos y de sus efectos sobre desastres naturales. Deberían preferirse métodos de campo simples y directos, adaptables a diferentes tipos de suelos y climas, y a los tamaños de muestras y variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas a evaluar a nivel de campo. Se propone un sistema de modelización basado en procesos hidrológicos, debidamente evaluados con metodologías adecuadas para cada combinación de suelos, topografía, clima y sistema de manejo, la cual ha probado ya su utilidad en la evaluación de las causas y efectos de degradación de suelos y aguas bajo muy diferentes condiciones.

Palabras claves: Degradación de suelos, Física de suelos, Modelos de simulación, Propiedades del suelo, SOMORE

ABSTRACT

Soil degradation affects negatively his functions as a base to produce food, to regulate the hydrological cycle and the environmental quality. All over the world soil degradation is increasing partly due to lacks or deficiencias in the evaluations of the processes and causes of this degradation on each specific situation. The processes of soil physical degradation are manifested through several problems as compaction, runoff, hydric and eolic erosion, landslides... with collateral effects “in situ” and in the distance, often with disastrous consequences as floods, landslides, sedimentations, droughts, etc. These processes are frequently associated to unfavorable changes into the hydrologic processes responsible of the water balance and soil hydric regimes, mainly derived to soil use changes and different management practices and climatic changes. The evaluation of these processes using simple simulation models; under several scenarios of climatic change, soil properties and land use and management; would allow to predict the occurrence of this disastrous processes and consequently to select and apply the appropriate practices of soil conservation to eliminate or reduce their effects. This simulation models require, as base, detailed climatic information and hydrologic soil properties data. Despite of the existence of methodologies and commercial equipments (each time more sophisticated and precise) to measure the different physical and hydrological soil properties related with degradation processes, most of them are only applicable under really specific or laboratory conditions. Often indirect methodologies are used, based on relations or empiric indexes without an adequate validation, that often lead to expensive mistakes on the evaluation of soil degradation processes and their effects on natural disasters. It could be preferred simple field methodologies, direct and adaptable to different soil types and climates and to the sample size and the spatial variability of the hydraulic properties, evaluable at field. It is proposed a model system, based on hydrological processes, properly evaluated with adequate methodologies for each combination of soil, topography, climate and management system. This model has been proved to evaluate the causes and effects of soil and water degradation under different conditions.

Key words: Soil degradation, Soil physic, Simulation model, Soil properties, SOMORE

1. Universitat de Lleida, Lleida (España)
ipla@macs.udl.es

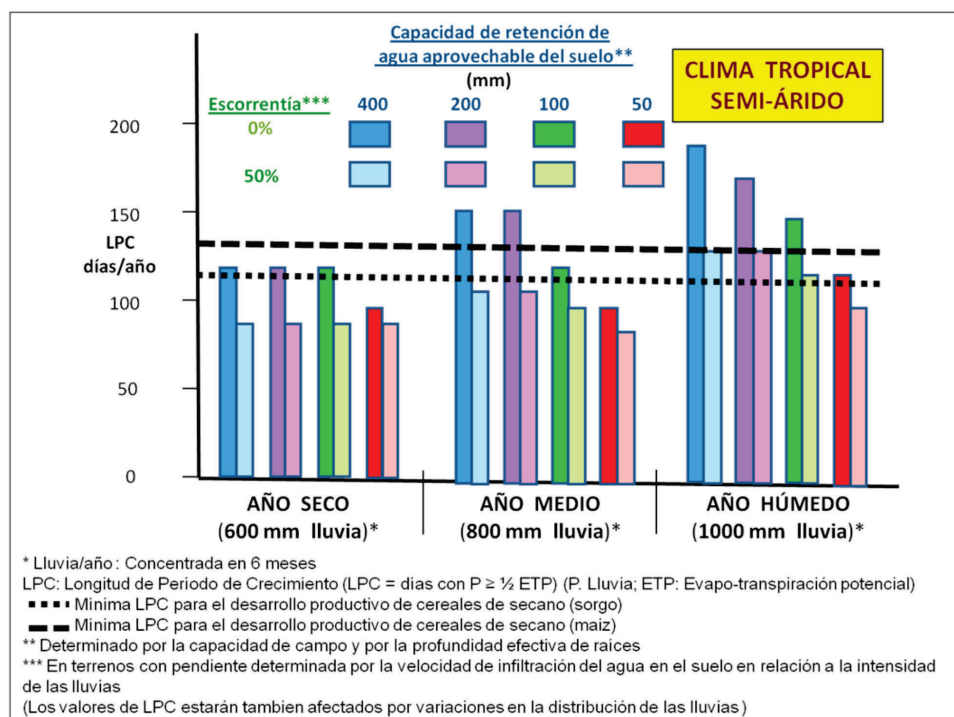
1. HIDROLOGÍA Y DEGRADACIÓN FÍSICA DE SUELOS

El mal manejo de los recursos suelo y agua puede conducir a una fuerte degradación de suelos y tierras. La degradación de suelos ha sido definida como un descenso en la habilidad del suelo para cumplir sus funciones como medio para el crecimiento de las plantas, como regulador del *régimen hídrico*, y como filtro ambiental, debido a causas naturales o antropogénicas.

La degradación de suelos y recursos hídricos es el principal factor que atenta contra la sostenibilidad de la utilización agrícola de las tierras en todo el mundo, lo que conduce a crecientes dificultades para producir los requerimientos de alimentos y fibras para su creciente población. Como efectos indirectos de la degradación de suelos y agua, se presentan riesgos crecientes de desastres naturales (inundaciones, sedimentaciones, deslizamientos de tierra, etc.), con características a veces catastróficas, así como disminución de la biodiversidad, deterioro de la suplencia de agua en cantidad y calidad, y efectos en cambios climáticos globales y sus consecuencias.

Un “desastre natural” es un evento que produce daños al ecosistema en general, con efectos directos o indirectos en la población, más o menos graves o perdurables. Se ha tratado de hacer una clasificación de estos efectos, dependiendo del factor o agente causante o involucrado: geológicos (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, etc.); hidro- meteorológicos (huracanes, inundaciones, sequías, incendios etc.); químicos (contaminaciones de aire, agua, suelos, etc.); sanitarios (epidemias, pandemias, etc.); sociales (relacionados con concentraciones humanas en diferentes espectáculos y actos, conflictos armados, etc.), aunque algunos, como los deslizamientos de tierra pueden pertenecer a más de un grupo (hidro- meteorológico y geológico). Entre los “desastres naturales”, los más frecuentes son los relacionados con factores climáticos, que se han duplicado en los últimos 15 años, especialmente en países en desarrollo con climas tropicales y subtropicales. Estos tipos de desastres se pueden clasificar en meteorológicos (huracanes, ciclones, lluvias y nevadas extraordinarias), hidrológicos (inundaciones, deslizamientos de tierra, avalanchas) y climatológicos (ondas de calor o de frío extremos, sequías, incendios). Las actividades humanas pueden afectar, en forma más o menos determinante, la frecuencia y severidad de muchos de ellos. Entre éstas, se destacan el crecimiento de la población y de sus necesidades, la concentración de la población en grandes centros urbanos, y la localización de desarrollos urbanos e industriales en zonas vulnerables a desastres relacionados con el clima.

Figura 1. Efectos de los principales parámetros hidrológicos críticos derivados de cambios climáticos, del uso y manejo de la tierra y de los procesos de degradación de suelos sobre la longitud potencial del periodo de crecimiento bajo condiciones de un clima tropical semiárido (Llanos Centrales de Venezuela). Se muestran los posibles problemas de sequía relacionados con la producción de cereales de secano como maíz y sorgo.



En los desastres naturales relacionados con factores climáticos, los procesos de degradación de suelos y recursos hídricos están fuertemente ligados a través de alteraciones desfavorables en los *procesos hidrológicos* determinantes del balance de agua en el suelo y del régimen de humedad del suelo. Están también determinados por las condiciones climáticas y por el uso y manejo de los recursos suelo y agua. Sin embargo, a pesar de que ya generalmente es aceptada la existencia de una estrecha relación entre la conservación de los recursos suelo y agua, aún en la mayoría de los casos son evaluados en forma separada, y consecuentemente, la predicción y prevención de los efectos derivados de su degradación resultan inadecuados en muchos casos. Esto aún reviste más importancia, considerando que se prevé que los cambios climáticos globales afectarían principalmente los *procesos hidrológicos* en la superficie de la tierra que están en su mayoría relacionados con el balance de agua en el campo (Easterling *et al*, 2000; FAO, 2008; Fischer *et al*, 2002).

El periodo máximo de crecimiento efectivo, tanto de vegetación natural como de cultivos de secano, depende en primer lugar de la duración del periodo efectivo de lluvias, y de la disponibilidad de agua en el suelo. En tierras en pendiente, cuando no hay limitaciones de temperatura o de drenaje interno, la longitud del periodo potencial de crecimiento dependerá de las condiciones climáticas (lluvia y evapo- transpiración potencial), de la distribución de la lluvia entre escorrentía e infiltración (afectada por los efectos de sellado superficial), y de la capacidad de almacenaje de agua en el suelo (determinado por la profundidad efectiva de raíces y las propiedades de retención de agua del suelo). Por lo tanto, la escorrentía y la capacidad efectiva de retención de agua del suelo, ambos componentes del balance de agua y afectados por procesos de degradación del suelo, deben tomarse en cuenta, e incluso pueden ser determinantes, en la evaluación y predicción de los efectos de dichos procesos de degradación en la conservación de agua y en el crecimiento potencial de las plantas y producción de cultivos (Ver: Figura 1).

La erosión hídrica del suelo es el proceso de degradación del suelo con mayor influencia en la conservación de los recursos suelo y agua. Los procesos de erosión hídrica son causados por las interacciones del suelo, lluvia, pendiente, cubierta vegetal y manejo, y generalmente provocan o son causados por cambios desfavorables en el balance de agua del suelo y en el régimen de humedad del suelo, y en las posibilidades de desarrollo y actividad radicular. La erosión del suelo tiene efectos negativos directos sobre el crecimiento de las plantas y la producción de los cultivos, y efectos indirectos fuera del sitio en el aumento de riesgos de inundaciones, sedimentaciones, deslizamientos de tierra, etc., a veces con carácter catastrófico. Es provocada por deforestaciones, por introducción de cultivos estacionales que dejen el suelo desprotegido, por intensificación o abandono de actividades agrícolas, por sobre- pastoreo, o por mal mantenimiento de las plantaciones y de las estructuras de conservación.

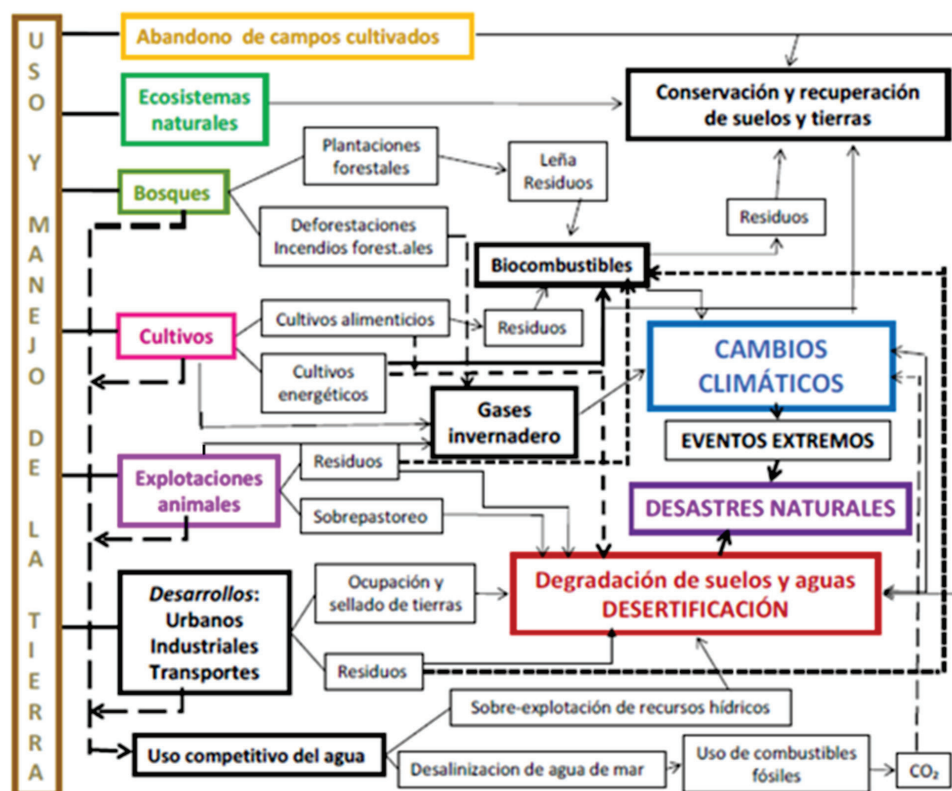
El riego de tierras agrícolas ha sido considerado desde hace ya varios milenios como la manera más efectiva de incrementar y regular la producción de alimentos, especialmente en zonas áridas y semiáridas. Frecuentemente, estos beneficios no han sido sostenibles debido a la salinización de los suelos, la cual puede conducir a una pérdida parcial o total de su capacidad productiva, causada por una degradación interna de sus propiedades químicas o físicas. El desarrollo creciente de agricultura de riego es indispensable para la regularización e incremento de la producción de alimentos requeridos actualmente y en el futuro en muchas regiones del mundo. Dicho desarrollo se ve limitado por la creciente salinización de los suelos y por la escasez y mayor salinidad de los recursos hídricos aún disponibles, y por el uso competitivo de dichos recursos para otros fines. Aunque a nivel mundial el área afectada por procesos de salinización inducida por el hombre es mucho menor que el área afectada por procesos de erosión, este proceso de degradación es también muy importante desde puntos de vista social, económico y ambiental, por los elevados costos de los desarrollos de agricultura de riego, por el uso y degradación de altas cantidades de recursos de agua cada vez más escasos, y por la decisiva contribución de las tierras bajo riego a la producción de alimentos en algunos países. La introducción del riego en una zona provoca cambios drásticos en el régimen y balance de agua y solutos en el perfil del suelo. Los problemas de salinidad son una consecuencia de la acumulación de sales en zonas y profundidades donde el régimen de humedad del suelo se caracteriza por fuertes pérdidas de agua por evaporación y transpiración, y por reducido lavado de las sales que permanecen. Esto ocurre cuando el manejo del agua de riego y drenaje no es adecuado para las condiciones particulares de clima, suelos, cultivos, fertilización, profundidad de nivel freático, calidad de agua de riego, y sistema de riego.



2. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE TIERRAS Y DESASTRES NATURALES

La degradación de tierras depende en parte de las características de suelos y clima, pero se debe fundamentalmente a un uso y manejo no apropiados de los recursos suelo y agua (Ver: Figura 2). El agua es el principal factor causante de la degradación de suelos, pero a su vez, es el recurso más afectado por dicha degradación. Uno de los principales efectos de la degradación de suelos es la pérdida de capacidad de los suelos para regular el *régimen hídrico* tanto a nivel local como de cuencas hidrográficas, lo cual afecta negativamente la suplencia regular de agua, en cantidades adecuadas, para usos agrícolas, urbanos e industriales. Por otro lado, para lograr incrementar y regularizar la producción agrícola de las tierras, y para contrarrestar uno de los principales efectos negativos de la degradación de suelos, crece la necesidad de utilizar agua para riego, lo cual puede llevar al agotamiento de las reservas de agua superficial y subterránea, y a incrementar la competencia de uso para otros fines. Por lo tanto este desarrollo agrícola no será sostenible, y de no encontrarse soluciones alternativas pudiera resultar en consecuencias catastróficas dentro de unas décadas. Los objetivos supuestamente conflictivos de productividad de agro- ecosistemas y su vulnerabilidad a la degradación ambiental son controlados por los mismos factores (suelo, clima, topografía, manejo) y *procesos hidrológicos* fundamentales. Por ello, el control de la degradación de tierras y sus efectos depende de una adecuada planificación del uso y manejo de los recursos suelo y agua. Para ello es necesario realizar previamente unas adecuadas identificación y evaluación de los procesos de degradación, y de las relaciones causa- efectos de los diferentes problemas generados, y predecir el efecto de cambios en el uso y manejo de las tierras, y de eventos climáticos extraordinarios asociados a cambios climáticos globales, sobre impactos ambientales relacionados con la conservación de suelos y agua y con desastres naturales. El monitoreo o seguimiento a nivel de campo, con observaciones y mediciones directas adecuadas, puede ayudar mucho a entender mejor cómo ocurren los procesos de degradación de suelos y recursos hídricos, y los cambios que provocan las intervenciones humanas. Esto es indispensable para la solución y desarrollo de prácticas efectivas de conservación adaptadas a cada condición particular de suelo y clima.

Figura 2. Interacciones entre los factores de uso y manejo de las tierras y agua con el cambio climático y los procesos de degradación de suelos y agua y con los desastres naturales (inundaciones, deslizamientos de tierra, sedimentaciones).



En muchos países, las políticas de desarrollo y de expansión agrícola en las últimas décadas han llevado frecuentemente a procesos de degradación de suelos y agua, afectando negativamente cuencas hidrográficas importantes, con descensos en la productividad, aumentos en los costos de producción, e incremento en los problemas relacionados con la suplencia de agua, inundaciones, deslizamientos de tierra, sedimentación en embalses, etc., todos ellos con importantes consecuencias sociales y económicas. A pesar de que hay evidencias claras de que grandes y crecientes áreas de tierras están siendo afectadas por diferentes procesos de degradación de suelos, la mayoría de las evaluaciones existentes de los tipos, extensión e intensidad de degradación de suelos no son muy precisas ni objetivas, debido a una inadecuada identificación y evaluación de dichos procesos, y de las relaciones causa- efectos de los diferentes problemas.



La degradación de tierras agrícolas y suelos se debe generalmente a un uso y manejo no adecuado de la tierra, frecuentemente generado por crecientes presiones sociales, económicas y políticas, derivadas de crecimiento de la población, políticas de mercados internacionales, falta de recursos y deuda externa. Sin embargo, en muchos casos, la adopción de sistemas integrales adecuados y sostenibles de uso y manejo de los recursos suelo y agua, se ve limitado por deficiencias en el conocimiento de los *procesos hidrológicos* asociados, y por la utilización de metodologías inadecuadas para la evaluación y monitoreo de dichos procesos.

Los procesos de degradación de suelos y agua conducentes a la degradación de tierras están fuertemente asociados a cambios desfavorables en los *procesos hidrológicos* responsables del balance de agua en el suelo y del régimen de humedad del suelo. Estos están afectados por las condiciones climáticas y sus variaciones, y por los cambios en el uso y manejo de los recursos suelo y agua. Por lo tanto, para unos adecuados desarrollos, selección y aplicación de prácticas sostenibles y efectivas de uso y manejo de las tierras, será indispensable la utilización de una *base hidrológica* para la evaluación y predicción de sistemas de conservación de suelos y agua que impidan o controlen los procesos de degradación y desastres naturales asociados. Sin esa base, las consideraciones sobre grados de degradación de tierras son en gran parte subjetivas, basadas en criterios indirectos, y no en mediciones directas de *parámetros hidrológicos*.

La evaluación de los *procesos hidrológicos*, bajo escenarios diferentes y cambiantes de clima, propiedades del suelo y uso y manejo de la tierra, con modelos de simulación flexibles basados en esos procesos, puede ayudar a predecir y a identificar las causas biofísicas de la desertificación a niveles local, nacional y regional. Este es un paso previo requerido para una planificación del uso racional de la tierra, y para la selección y desarrollo de estrategias a corto y largo plazo, y de tecnologías para reducir o controlar los procesos de degradación de tierras, y los problemas asociados de naturaleza social, económica y de seguridad (Pla, 2002b).

3. PREDICCIÓN DE PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS Y AGUA, Y DE DESASTRES NATURALES A TRAVÉS DE UN ENFOQUE HIDROLÓGICO

Para lograr desarrollar, seleccionar y aplicar prácticas de uso y manejo de las tierras, que sean efectivas y sostenibles, se requerirá un *enfoque hidrológico* en la evaluación de los procesos de degradación de suelos y agua (Pla, 2002a). El principal objetivo debe ser evaluar los *procesos hidrológicos* pertinentes, y desarrollar metodologías y técnicas para corregirlos o controlarlos bajo diferentes escenarios de suelos, clima, topografía y sistemas de uso u manejo. Con ello, podremos suprimir o aliviar los efectos negativos, directos o indirectos, de la degradación de suelos y agua sobre el crecimiento de las plantas, sobre la sostenibilidad de la producción agrícola, sobre la suplencia de agua en cantidades y calidad adecuadas, y sobre eventos catastróficos como inundaciones, sedimentaciones, y deslizamientos de tierra.

La utilización del gran número de variables importantes relacionadas con los procesos de degradación y sus interacciones, para determinar probabilidades y riesgos de degradación de suelos y agua, y su influencia en la producción de cultivos y daños ambientales, puede facilitarse con su integración en modelos (Richter y Streck, 1994). Aunque los modelos no den una simulación exacta

de las situaciones reales, permiten obtener resultados aproximados de acuerdo a las simplificaciones asumidas. Ayudan a entender situaciones complejas, mediante una descripción cuantitativa de los procesos más significativos, y por ello pueden usarse como herramientas para la toma de decisiones para reducir o eliminar riesgos de degradación de suelos y recursos hídricos. Modelos de simulación basados en *procesos hidrológicos* pueden ser muy útiles para integrar y convertir los parámetros medidos o estimados de suelo, clima, plantas y manejo, en predicciones de balances de agua y regímenes de humedad en el suelo, para cada combinación particular de ellos, ya sea actual o prevista. Estudios experimentales y observaciones basadas en procesos, y que provean datos más detallados bajo condiciones controladas pueden ayudar a simplificar los modelos, determinando qué procesos son más importantes a diferentes escalas temporales y espaciales, proveyendo además datos para calibrar y validar los modelos.

La precisión de los diagnósticos de problemas de degradación de suelos y tierras con el uso de modelos de simulación basados en procesos hidrológicos, dependerá de una adecuada evaluación de los parámetros hidrológicos que se utilicen como entrada. Para ello deben utilizarse metodologías apropiadas para cada condición de tierras, suelos y clima. Excepto en el cumplimiento de ciertas condiciones y principios físicos fundamentales, no existen metodologías estándar para la evaluación, y menos para la interpretación de la mayoría de las propiedades hidrológicas de los suelos, las cuales depende mucho de los fines perseguidos, y los métodos utilizados deben en cualquier caso ser ajustados a las particularidades de suelo, clima y alternativas de uso y manejo para cada caso, y a los objetivos del estudio. En general, deben preferirse métodos de laboratorio y campo rápidos, simples y de bajo costo, de tal forma que permitan hacer muchas mediciones replicadas en cada unidad de suelo y condición de uso y manejo, tomando en consideración la fuerte variabilidad espacial en las propiedades hidrológicas del suelo (Pla, 1969a, 1969b, 1981, 1983, 1986, 1990, 1992, 1996; Nacci, 2008; Nacci y Pla, 1991, 1993).



Se argumenta que los métodos existentes para medición directa en el campo de propiedades hidráulicas de los suelos son complejos, largos y costosos, y limitados por la gran variabilidad espacial y temporal, requiriéndose por ello muchas mediciones a menudo prohibitivas en tiempo y dinero. Esto ha llevado a la justificación del uso de estimaciones indirectas de propiedades hidráulicas del suelo a partir de datos más fácilmente disponibles (textura, densidad aparente, materia orgánica y otros) en estudios previos de suelos, las cuales son conocidas como funciones de pedo- transferencia (FPT). A través de FPT se ha tratado de establecer puentes entre bases de datos de los estudios básicos y mapas de suelos ya existentes y la información de hidrología de suelos requerida en modelos de simulación, para evaluar procesos de importancia social y económica, ambiental, ecológica, agrícola y de recursos naturales, como calidad de agua, calidad del suelo, manejo de cuencas, paisajes, ciclo de nutrientes, disposición de residuos y contaminantes, agricultura de precisión, cambio climático y desastres naturales (Wösten *et al.* 1999 y 2001; Ferrer *et al.*, 2004; Pachepsky *et al.*, 2006). En muchos casos, cuando se ha evaluado la efectividad de FPT para la modelización hidrológica de los suelos, no se ha encontrado buenas correspondencias entre los resultados de mediciones directas y los calculados con FPT, ni entre los calculados con diferentes FPT. Por ello, si no hay la posibilidad de comparar las estimaciones y simulaciones con FPT con mediciones de campo, hay que tomar muchas precauciones en la interpretación de los resultados. La utilización de nuevos métodos estadísticos, motivo de numerosas publicaciones recientes, no mejora la confiabilidad de las FPT, si no se dispone de una base actualizada y confiable de datos, obtenidos con métodos directos apropiados.

La escorrentía superficial es uno de los parámetros hidrológicos de mayor importancia en la modelización de balances hídricos y de procesos y efectos relacionados de erosión superficial, inundaciones, etc. Para su estimación, se ha ido generalizando, más que todo debido a su simplicidad, el uso de un método empírico conocido como el “método del número de la curva” desarrollado por el USDA- SCS (1972) en USA. Al ser utilizada en regiones con características de suelos, topografía y clima (lluvias) muy diferentes a las existentes en las zonas de USA donde se desarrolló, generalmente sin validaciones adecuadas a nivel de campo, se puede llegar a estimaciones muy erradas, con graves consecuencias en la predicción y prevención de problemas relacionados de erosión, inundaciones, sedimentaciones, contaminación de aguas, sequías, etc.

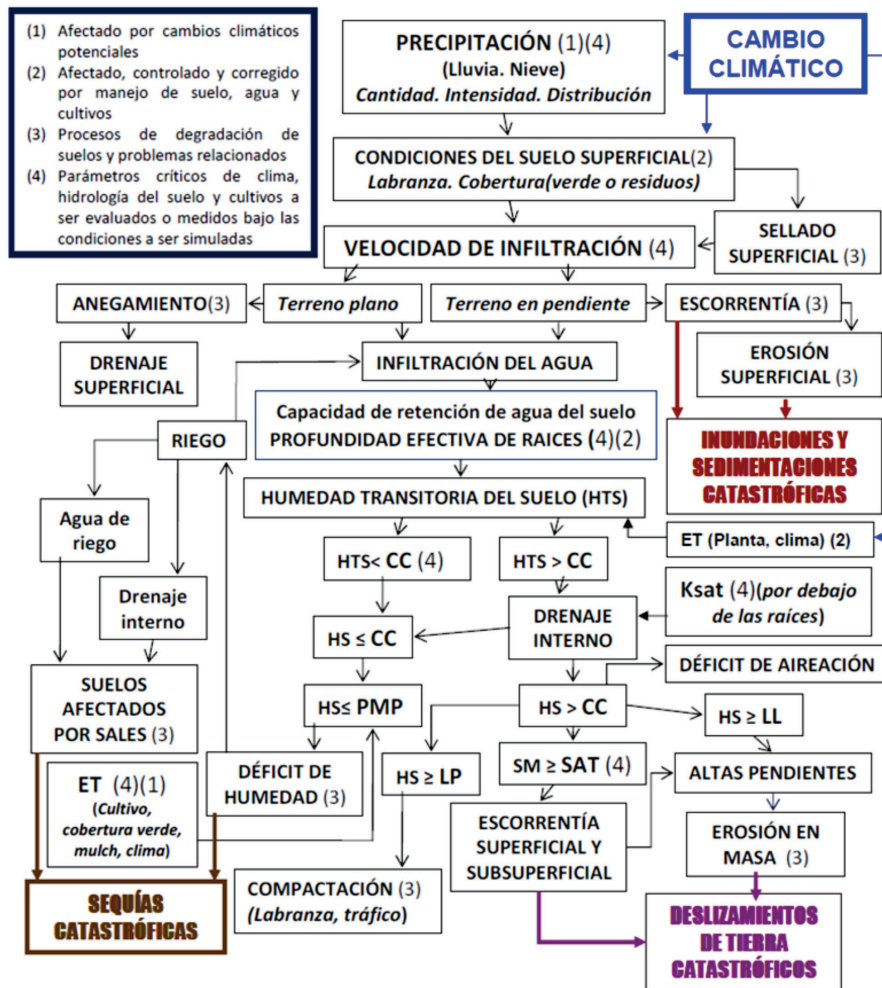


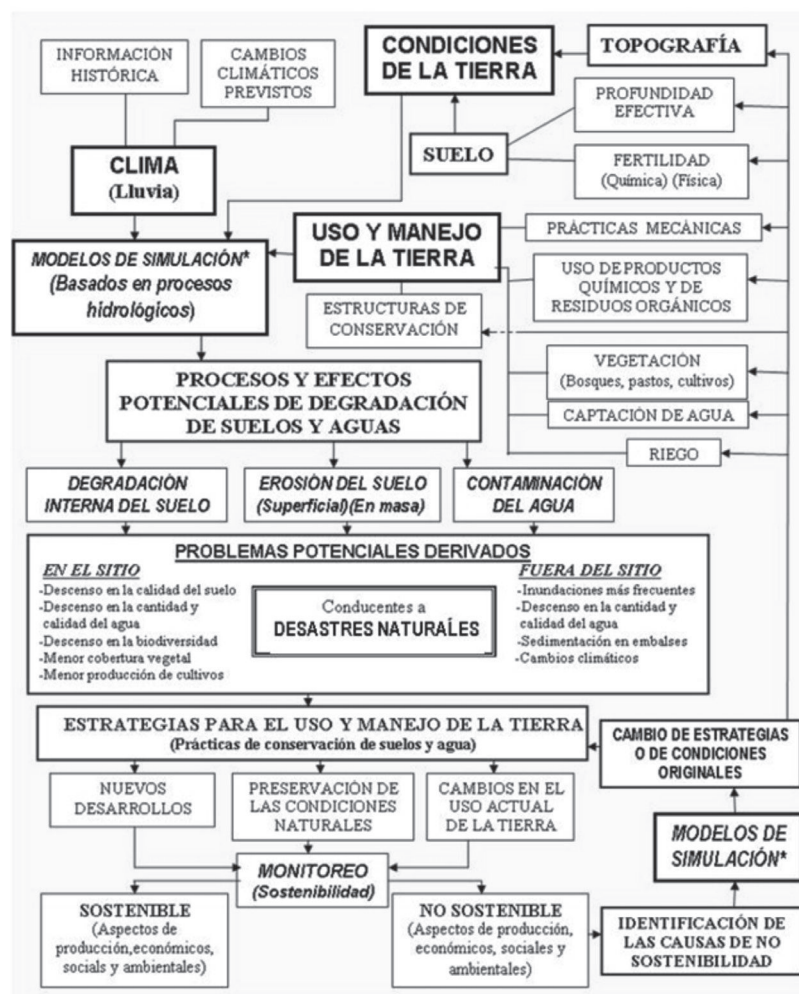
Figura 3. Diagrama de flujo simplificado de un modelo de simulación (SOMORE), basado en procesos hidrológicos, para predecir el balance de agua en el suelo, el régimen de humedad del suelo, los procesos de degradación de suelos, y los posibles desastres naturales derivados de ellos, bajo diferentes escenarios de clima, cambios de clima, suelo y manejo de suelos y agua (Adaptado de Pla, 1997a, 2006) (HS: Humedad de campo; CC: Capacidad de marchitez permanente; SAT: Saturación; LP: Límite plástico; LL: Límite líquido; ET: Evapo- transpiración)

El diagrama de flujo de la figura 3, el cual sirvió de base para el desarrollo del modelo de simulación SOMORE (Pla, 1994; 1997a), ya validado bajo muy diferentes condiciones (Pla, 1994; 1998; Pla *et al.*, 2005), el cual simula la evolución del balance diario de agua en el perfil del suelo, requiriendo como entrada información de suelos y de clima fácilmente obtenible. Puede usarse para predecir el régimen de humedad del suelo, incluyendo anegamiento, pérdidas de agua de lluvia por escorrentía superficial, y drenaje superficial e interno, bajo diferentes condiciones de suelo, topografía, clima, vegetación, cultivos y manejo. Las predicciones pueden utilizarse para identificar los procesos de degradación más probables, y para la selección de las mejores alternativas, con mayores probabilidades de éxito, de prácticas de conservación de suelos y agua para cada combinación de suelos, clima y topografía. Los datos de lluvia, variables cada año, con un periodo particular de retorno, pueden ser utilizados para simular el comportamiento de una condición particular o sistema de manejo en años diferentes, y basado en los efectos previstos, seleccionar o diseñar, con una base probabilística, los mejores sistemas de manejo de suelos y agua para controlar los procesos de degradación y mitigar o hacer menos probables los desastres naturales. La preselección de ciertos periodos de retorno es importante, porque éstos determinarán en gran parte los requerimientos de prácticas de manejo y estructuras de conservación en relación a costos y beneficios, para diferentes niveles de riesgo y probabilidades de error.

Los resultados de los modelos de simulación basados en procesos hidrológicos, conjuntamente con información obtenida en monitoreo directo en el campo, permiten hacer predicciones de los procesos potenciales de degradación de suelos y recursos hídricos bajo condiciones cambiantes de

clima, cultivos, manejo y situaciones sociales y económicas. Cuando se integran con sistemas de información geográfica (GIS), el modelaje y el monitoreo pueden proveer la base para la planificación del uso y manejo sostenible de suelos y aguas. Las consideraciones finales a nivel estratégico sobre uso de los suelos, recursos hídricos y cambios estructurales deben tomar en cuenta no solamente la información física y predicción de los procesos particulares, sino también una evaluación de cómo dicho uso y manejo pueden estar afectados tanto por los procesos en agro- ecosistemas específicos como por los efectos de políticas, manejo y condiciones socio- económicas (Ver: Figura 4).

Figura 4. Aspectos a considerar y pasos a seguir en la evaluación de problemas potenciales de degradación de suelos y aguas y de "desastres naturales", para la planificación adecuada del uso y manejo de la tierra. (Adaptado de Pla, 1997; 2006)
(* Modelos basados en procesos hidrológicos)



4. PROBLEMAS DE DEGRADACIÓN DE TIERRAS EN ZONAS DE LADERA DE AMÉRICA LATINA

Los problemas de degradación de tierras ocurren en todo el mundo, pero generalmente son peores, resultando en muchos casos en "desastres naturales", en países en desarrollo de regiones tropicales y subtropicales, incluyendo América Latina, debido a las características predominantes de suelos y clima, y a las presiones crecientes derivadas del crecimiento de la población, y de la falta de recursos técnicos y económicos. La mayor parte de la producción agrícola en zonas de ladera de América Latina está aún basada en cultivos de secano, creciendo en áreas con una alta variabilidad y erraticidad en las lluvias, y donde el agua es el principal factor individual del cual depende la producción de cultivos, y es el principal factor responsable de la degradación de tierras y "desastres naturales" asociados (Pla, 1994).

Los procesos de degradación de suelos en las zonas de ladera de América Latina con más efectos directos en la producción de cultivos son los de erosión hídrica. Aunque la susceptibilidad de los suelos en esas zonas a la erosión hídrica no suelen ser mayores que en otras regiones y climas del mundo, el poder erosivo de las lluvias, asociados en muchos casos a los fenómenos del "Niño" y de la "Niña", especialmente en zonas tropicales y subtropicales, es generalmente mucho mayor. Aparte de la erosión superficial en zonas con pendientes ligeras a moderadas, se presentan problemas de deslizamientos y movimientos en masa en general en pendientes más pronunciadas (Pla, 1992; 1993; 1996). Una determinada pérdida de suelo por erosión generalmente causa una mayor pérdida de producción de cultivos en zonas tropicales por sequías (Ver: Figura 1), debido a suelos con propiedades desfavorables (físicas o químicas) a poca profundidad en el perfil que restringen el desarrollo radicular, y debido a los mayores requerimientos de agua para los cultivos. Aparte de los efectos negativos sobre la productividad y riesgos de producción de cultivos, los procesos de degradación de suelos y tierras pueden contribuir directa o indirectamente a la degradación de cuencas hidrográficas, afectando negativamente la producción de energía hidroeléctrica y la suplencia de agua para la población y para riego en las partes más bajas de la cuenca. También, derivadas de procesos acelerados de degradación de tierras por erosión, se presentan en muchos casos problemas de inundaciones y deslizamientos de tierra con carácter catastrófico. Todo lo anterior se agrava con la irregularidad y el carácter de las lluvias (más intensas, y mayores o menores de lo normal) asociadas a las frecuentes fenómenos del "El Niño" y de "La Niña", y a huracanes que podrían acentuarse más con los previstos futuros cambios climáticos derivados del incremento en la atmósfera de gases con efecto invernadero. Sin embargo, es necesario aclarar en relación a los fenómenos "El Niño" y "La Niña", y a los huracanes, que se han presentado desde hace miles de años con carácter más o menos regular o intenso, que actualmente no hay razones basadas en criterios científicos para atribuirlos o relacionarlos con los cambios climáticos por efecto del incremento de gases con efecto invernadero en la atmósfera. Este argumento ha tratado de utilizarse intencionalmente para justificar la falta de medidas preventivas para los cada vez más frecuentes "desastres naturales" derivados de dichos fenómenos.



En América Latina, y especialmente en las subregiones Andina y Centro- americana, es común que una considerable extensión de sus tierras presenten pendientes muy pronunciadas, en las cuales la mayor limitación física para su uso agrícola es la severa erosión del suelo. Al mismo tiempo, como resultado del rápido crecimiento de la población en las últimas décadas, la presión para un uso más continuo e intenso de las tierras ya cultivadas, o para la extensión de cultivos a nuevas tierras, se ha incrementado. En algunos casos, estas presiones han sido para satisfacer las necesidades crecientes de la población, pero en otras, especialmente en los últimos 20 a 30 años, las presiones se han debido también a las necesidades de generar nuevos ingresos a través de la exportación de ciertos productos agrícolas o ganaderos. Como respuesta a dichas presiones, se ha intensificado más allá de su capacidad el uso de dichas tierras, con deforestaciones aceleradas, sobre- pastoreo y agricultura con cultivos y prácticas de manejo no adecuadas, lo cual conduce generalmente a fuertes pérdida de agua por escorrentía, a erosión de suelos, a deslizamientos de tierra, etc. Estas prácticas, muchas veces, han sustituido cultivos, prácticas y sistemas tradicionales que, además de controlar o reducir la erosión, permitían una producción más sostenida, aunque generalmente con rendimientos unitarios más bajos. Con ello, los problemas de deterioro masivo por erosión de las tierras de ladera se han acentuado en las últimas 4 o 5 décadas, provocando además fuertes daños adicionales a bienes y personas en áreas más bajas y planas de las cuencas, aguas debajo de las tierras erosionadas, relacionados con problemas de sedimentaciones en campos de cultivo y reservorios de agua, inundaciones, deslizamientos de tierra, etc. (CEPAL- PNUMA, 2000). Todo ello ha tenido y tiene cada vez más repercusiones socio- económicas y ambientales en la mayoría de los países de las zonas Andina y Centro- americana.

Se puede concluir que la degradación de tierras agrícolas, principalmente por erosión hídrica, en las tierras de ladera en América Latina, igual que en otras regiones similares del mundo, son primariamente el resultado de un uso y manejo de dichas tierras en formas e intensidades incompatibles con su capacidad, debido en parte a ignorancia, pero más frecuentemente debido a presiones económicas, sociales y políticas que obligan al agricultor a usar la tierra en la forma en que lo hace. Desde un punto de vista estrictamente físico, la erosión del suelo es una combinación de la erosividad de las lluvias, de la erosionabilidad del suelo y de la topografía. Dicha combinación lleva a pronosticar grandes peligros de pérdidas de suelo por erosión en gran parte de las tierras



de ladera de América Latina, y en especial de las sub- regiones Andina y Centro- americana. Se ha publicado y especulado mucho sobre acerca de la magnitud de los problemas regionales de erosión de suelos, llevando a apreciaciones, según el tipo de evaluación realizado, que hacen oscilar entre 100 y 1000 Mg/km²año la producción promedio de sedimentos en tierras de las regiones Andina y Centro- americana. La realidad es que siguen siendo muy escasos los datos cuantitativos y confiables sobre la verdadera magnitud del problema. La mayor parte de la información disponible se basa en reconocimientos generales a pequeñas escalas, o en resultados de experimentos aislados sin continuidad en el tiempo y sin representación geográfica, y peor aún, en extrapolaciones basadas en resultados obtenidos utilizando modelos empíricos desarrollados en regiones agroecológicas muy diferentes. Esta información, aunque tiene alguna utilidad para llamar la atención y alertar sobre la gravedad del problema, es de muy poco valor para desarrollar e implementar estrategias para prevenir o controlar la erosión.

5. MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN SUPERFICIAL Y EN MASA

El control de los procesos de erosión de los suelos, y de los efectos colaterales sobre “desastres naturales”, depende de un uso apropiado de las tierras y de una adecuada planificación de su manejo. Para ello, un prerrequisito indispensable es una adecuada identificación y evaluación de los procesos de erosión, y de las relaciones causa- efecto de los diferentes problemas que se derivan de ellos. Los procesos de erosión, causados por las interacciones del suelo, lluvia, pendiente, vegetación y manejo, generalmente son causa, y a su vez, son consecuencia, de cambios desfavorables en el régimen de humedad del suelo, y en las posibilidades de actividad y desarrollo radicular. Por lo tanto, para predecir los procesos y efectos de la erosión del suelo, resulta muy importante la evaluación de los cambios en el balance de agua del suelo causados por diferentes sistemas y prácticas de manejo de suelos y cultivos, bajo determinadas condiciones climáticas.

Los procesos de *erosión superficial* están asociados a eventos de lluvia de gran intensidad, y a la alta separabilidad de las partículas del suelo superficial y reducción en la infiltración, lo cual es, a su vez, inducido por la degradación de la estructura del suelo y por la pobre cobertura provista en periodos críticos por la vegetación o residuos vegetales. Bajo estas condiciones que son frecuentemente generadas por prácticas inadecuadas de manejo de suelos y cultivos, las partículas del suelo superficial son separadas por el impacto de las gotas de lluvia o por el agua de escorrentía, y son transportadas pendiente abajo en suspensión en el agua no infiltrada que escurre más o menos uniformemente distribuida sobre la superficie del suelo o concentrada en surcos y cárcavas de diferentes dimensiones.

Además de la erosión superficial, más común en pendientes suaves a moderadas, en las tierras de altas pendientes de las regiones Andina y Centro- americana de América Latina son también frecuentes los *movimientos en masa* y los *procesos de erosión por deslizamientos* (Pla, 1992; 1993; 1996). Mientras que en los procesos de erosión superficial las partículas de suelo separadas por la lluvia son transportadas por el agua que fluye en superficie (escorrentía superficial), los movimientos en masa son movimientos gravitacionales descendentes del material del suelo junto con el agua sin la intervención o ayuda del agua en movimiento. En ambos procesos, la lluvia, las propiedades del suelo, la topografía y la vegetación son los principales factores influyentes, pero dependiendo de sus características e interacciones, se generan diferentes procesos de erosión. La pendiente es uno de los factores críticos que determina el predominio de uno u otro proceso de erosión, pero el gradiente limitante depende de las propiedades del suelo, de las características de la lluvia, de la cobertura vegetal y del uso y manejo de la tierra. Según puede observarse en la figura 5, las probabilidades de deslizamientos de tierras se incrementan a partir de pendientes del 15-30%, porque a esas pendientes se incrementa la relación entre el componente de la fuerza de deslizamiento en el sentido de la pendiente del plano potencial de deslizamiento (F_p) y la fuerza en sentido vertical (F_v) o peso del suelo húmedo en la consistencia en que se hace fluido.

La erosión por movimientos en masa o deslizamientos generalmente afecta tierras con una excepcional resistencia a procesos de erosión superficial, las cuales poseen suelos con estructura muy estable y excelentes propiedades hidráulicas (Pla, 1992; 1996). En algunos casos, la erosión

en masa se produce en las paredes de las cárcavas desarrolladas inicialmente por procesos de erosión superficial. Los movimientos en masa se inician generalmente durante eventos lluviosos concentrados y continuos, y están asociados con periodos húmedos prolongados como resultado de lluvias antecedentes persistentes, en suelos con velocidades de infiltración superiores a las posibilidades de percolación por drenaje interno, lo cual causa saturaciones periódicas del suelo superficial (Sidle y Swanston, 1982). Este proceso de erosión es inducido por cambios significativos en el peso y consistencia (baja cohesión entre partículas y micro- agregados) del suelo superficial por encima de capas que restrinjan el drenaje interno. Estas capas pueden ser de origen pedogenético (horizontes argílicos, nátricos, etc.), contactos líticos, o capas compactadas resultantes de operaciones inadecuadas de labranza.

En suelos pertenecientes a los órdenes Ultisoles y Andosoles, muy comunes en zonas montañosas de las regiones Andina y Centro- americana, con micro- agregados muy estables en el suelo superficial hasta diferentes profundidades, es frecuente que dicha capa de suelo pierda la cohesión entre micro- agregados y adquiera una consistencia fluida al alcanzar condiciones de humedad cercanas a saturación (límite líquido). En muchos Andosoles, el suelo puede mantenerse por encima del límite líquido hasta por muchas horas después de alcanzar saturación, condición en la cual es mínima la cohesión y la fuerza de fricción interna entre los micro- agregados. Además muchos de esos Andosoles tienen una alta capacidad de retención de agua, alcanzando en saturación hasta tres veces la masa de suelo seco (F_p), lo que se traduce en una mayor fuerza de deslizamiento en el sentido de la pendiente (Ver: Figura 5). Esto explica por qué los deslizamientos de tierra en Andosoles pueden presentarse a pendientes menores (20% o menos) que en otros suelos. El agua en el suelo superficial saturado o cercano a saturación está bajo un gradiente hidráulico positivo en el sentido de la pendiente, lo cual depende de la continua suplencia de agua y del grado de la pendiente, que sirve además de lubricante para la capa subyacente, lo cual facilita el deslizamiento del material de suelo superficial sobrecargado con agua. Sin embargo, los cambios en peso y consistencia del suelo superficial no pueden por si solos causar deslizamientos de tierra, pero favorecen la susceptibilidad a ese proceso de erosión cuando se presentan factores que pueden iniciar dicho proceso como son pequeños sismos, remoción de soporte pendiente abajo (cortes para carreteras u otros fines) o lateralmente (cárcavas, grietas). En algunos casos, las causas indirectas de los deslizamientos de tierra pueden ser trabajos o prácticas de conservación (terrazas, camellones, etc.) para controlar o reducir las pérdidas de agua por escorrentía y de suelo por erosión superficial, y que al concentrar la infiltración del agua de escorrentía en algunas partes del terreno proveen condiciones favorables para deslizamientos locales, especialmente si existen capas a poca profundidad que restrinjan la percolación profunda.

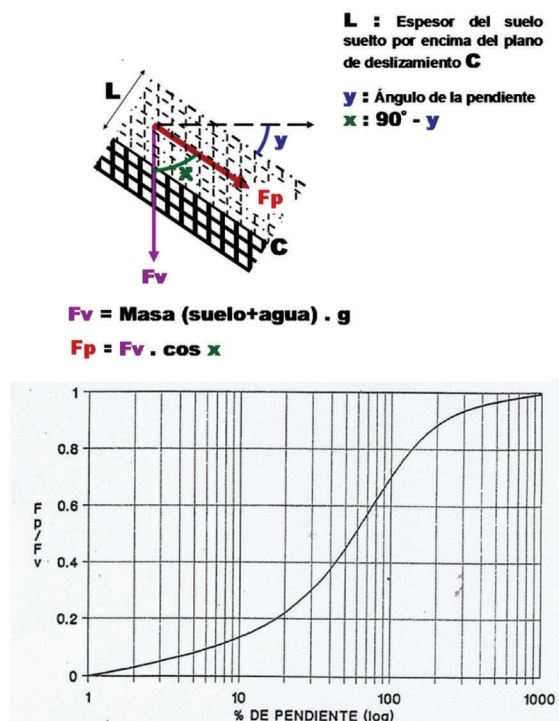
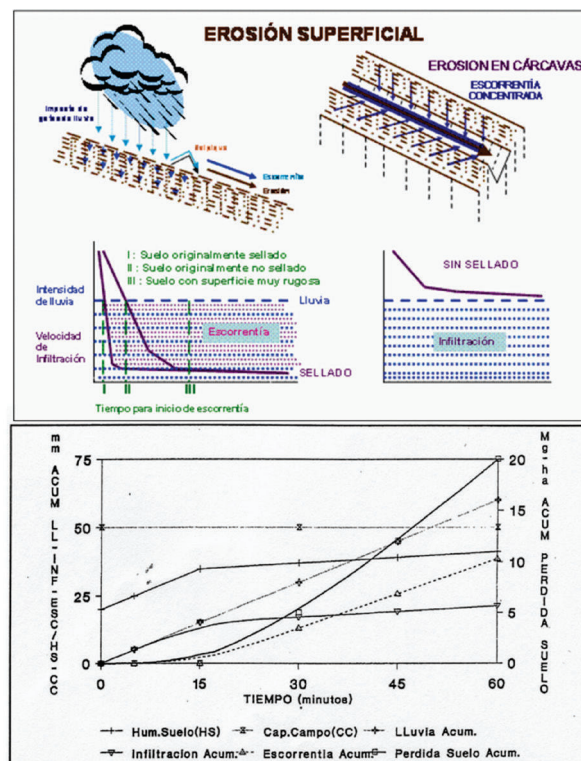


Figura 5. Relaciones entre la pendiente y la fracción F_p/F_v (relación entre la fuerza que impulsa el deslizamiento de tierra en el sentido de la pendiente (F_p) y la fuerza en sentido vertical (F_v) o peso del suelo húmedo en la consistencia en que se hace fluido). A mayores valores de F_p/F_v se incrementan las posibilidades de deslizamientos.

En áreas con bosques naturales, las posibilidades de deslizamientos de tierra son generalmente mucho menores que en áreas deforestadas con cultivos limpios, y menores que en terrenos con pastos, en especial con sobrepastoreo. Los bosques pueden tener diferentes efectos estabilizadores, pero el principal se deriva del reforzamiento mecánico a través de las raíces profundas de los árboles, las cuales al estar ancladas en el substrato estable, estabilizan a su vez la capa de suelo superficial, mientras que las raíces mas superficiales proveen una red que estabiliza lateralmente dicho suelo (Sidle, 1991; Watson *et al.*, 1999). Las áreas con pastos naturales cuyos sistemas radicales, aunque bien desarrollados, son generalmente poco profundos, y especialmente si están sobre- pastoreados, suelen ser tan susceptibles a los deslizamientos como los campos laboreados en forma continua para cultivos anuales. Ello, a pesar de que las velocidades de infiltración del agua de lluvia en dichas tierras con pastos pueden ser varias veces menores a las que se mantienen bajo bosque natural. El cambio de sistemas de cultivo perennes como el café, desde uno bajo sombra donde se mantiene parte del bosque natural, hasta otro completamente expuesto, especialmente en terrenos de muy altas pendientes, también contribuye a incrementar en muchos casos los procesos de erosión por deslizamientos. En climas con alta evapo- transpiración, la remoción o el cambio de vegetación puede provocar un cambio en el balance de agua en el suelo favoreciendo la inestabilidad de los terrenos en pendiente y la generación de deslizamientos de tierra (Sidle *et al.*, 1985).

Las figuras 6 y 7 muestran gráficamente los procesos hidrológicos más frecuentemente involucrados en los procesos de erosión superficial y erosión en masa, así como los cambios potenciales de naturaleza hidrológica en el suelo superficial que conducen a procesos de erosión superficial o en masa (deslizamientos) utilizando lluvias simuladas en suelos colocados en bandejas de erosión (Pla, 1992; 1993; 1996). La figura 6 muestra el caso de un suelo Alfisol franco- arenoso, en un pendiente moderada de 6%, el cual cuando está seco, desnudo y recientemente laboreado, al recibir el impacto de las gotas de lluvia de una tormenta relativamente intensa (60 mm en una hora, con un periodo de retorno de dos años) sufre un proceso rápido de sellado superficial, con una drástica reducción en la velocidad de infiltración, lo cual genera una fuerte escorrentía a los 10 a 15 minutos de iniciada la lluvia. Esta baja velocidad de infiltración no permite que el contenido de humedad del suelo superficial (0- 20 cm.), donde se desarrollan gran parte de las raíces de cultivos como el sorgo y el maíz, alcance la capacidad de campo después de la caída de 60 mm de lluvia simulada. Las pérdidas de suelo por erosión son graduales, y siguen en este caso la misma tendencia de la escorrentía superficial, alcanzando valores del equivalente de 20 Mg/ha al final de la tormenta.

Figura 6. Proceso simulado de erosión superficial y sus bases hidrológicas (Suelo: Alfisol franco- arenoso; Pendiente: 6%; Cobertura: Desnudo; Humedad inicial: Seco; Tormenta simulada: 60 mm/una hora (PR: 2 años)



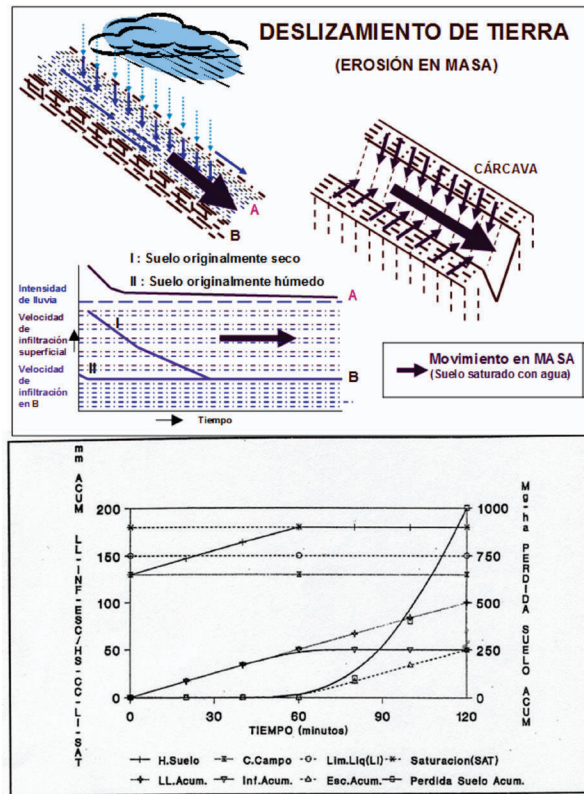


Figura 7. Proceso simulado de erosión en masa y sus bases hidrológicas (Suelo: Ultisol franco- arcilloso; Pendiente: 50%; Cobertura: Pastos ; Humedad inicial: Capacidad de campo; Tormenta simulada: 100mm/2horas (PR: 10 años)

La figura 7 muestra el caso de erosión en masa de un Ultisol franco- arcilloso, con pendiente muy pronunciada (50%), con un suelo superficial con micro- agregados muy estables al impacto de las gotas de lluvia, y con la presencia de un horizonte argílico, limitante del drenaje interno del perfil, a 30 cm. de profundidad. Las velocidades de infiltración potenciales, mayores que la intensidad promedio de la lluvia (50 mm/hora) durante la lluvia simulada de dos horas (periodo de retorno de 10 años), son también mucho mayores que la conductividad hidráulica saturada de la capa de suelo (horizonte argílico) subyacente a 30 cm. de profundidad. Bajo esas condiciones, y comenzando con un suelo a capacidad de campo, la consistencia fluida (límite líquido) y la saturación del suelo superficial (0- 30 cm.) se alcanzan después de 20 y 60 minutos respectivamente. Después de la saturación, la infiltración se reduce (al estar todos los poros llenos con agua), pudiéndose generar en ese momento escorrentía tanto superficial como sub-superficial. Las pérdidas o el desplazamiento de suelo por erosión bajo esas condiciones pueden ocurrir como movimientos en masa concentrados, alcanzando valores en este caso del orden de 1000 Mg/ha o más. Por lo tanto, los procesos de erosión por deslizamientos, o movimientos en masa en general, aunque puedan ocurrir con menor frecuencia que la erosión superficial, conducen a pérdidas o desplazamiento de suelo mucho mayores en promedio, y en forma más concentrada, con posibilidades de efectos catastróficos en zonas fuera del sitio donde ocurren los movimientos masivos de suelo.

De todo lo anterior se puede concluir que los programas y prácticas de conservación de suelos en zonas de ladera de las regiones Andina y Centro- americana de América Latina deberían en general dirigirse a mejorar el manejo del agua, tanto para prevenir inundaciones y erosión superficial y en masa, como para garantizar una producción agrícola mas segura y sostenida. Esta es la base para prevenir y para reducir los "desastres naturales" derivados de dichos procesos, y para atenuar sus efectos. Todo ello se logra con un uso y manejo adecuados de las tierras, y con una ubicación adecuada de los desarrollos urbanos, industriales, etc. y de infraestructuras, incluyendo obras físicas de conservación y protección, basados en un conocimiento apropiado de los recursos naturales suelo y clima en cada sitio.

Para el control de la erosión hídrica en tierras de ladera se han desarrollado y utilizado una gran variedad de técnicas y prácticas que van desde el simple cultivo en contorno, hasta sistemas agroforestales, y sistemas de manejo y obras de ingeniería que requieren de conocimientos especializados y grandes inversiones para su implementación y mantenimiento. Cuando el problema potencial es la escorrentía y erosión superficial, los sistemas y prácticas de conservación buscan generalmente promover que la mayor parte del agua de lluvia infiltre y se almacén "in situ", y que no infiltre, se almacene o drene superficialmente en forma controlada sin provocar erosión ni grandes crecidas. Sin embargo, para prevenir los deslizamientos y movimientos en masa en general, el objetivo debe ser en algunos casos promover la escorrentía y reducir la infiltración del agua de lluvia, con sistemas de drenaje superficial, o cortar y eliminar el exceso de agua en el suelo superficial y el flujo sub-superficial de dichos excesos, con sistemas apropiados de drenaje que recojan, desvíen y conduzcan el agua excedente a desagües adecuados. Esto debe complementarse con el mantenimiento, o establecimiento si aún no existen, de especies vegetales apropiadas para estabilizar el terreno a través del sistema radicular (solución permanente) y con la construcción de estructuras para impedir los movimientos (solución temporal). De lo anterior se deduce que las prácticas y estructuras mecánicas deben ser consideradas como medidas complementarias de las prácticas agronómicas o forestales para la conservación de tierras arables, y deben aplicarse sólo cuando las condiciones físicas (pendiente; propiedades físicas del suelo; cantidad, distribución e intensidad de las lluvias) sean tales que un buen manejo agronómico o forestal resulte insuficiente para prevenir la erosión y controlar el agua. En cualquier caso, para precisar las alternativas más apropiadas para controlar los diferentes tipos de erosión y sus efectos, se requieren estudios e investigaciones que lleven a un mejor conocimiento de los recursos tierra y clima, incluyendo en el caso del clima su variabilidad a corto y largo plazo, y de sus interacciones bajo diferentes grados y tipos de pendientes, y diferentes sistemas de uso y manejo. Es necesario tener en cuenta, lo cual se olvida frecuentemente, que no hay soluciones universales aplicables a todas las situaciones, ya que ellas dependerán de la combinación suelo, clima, pendiente y factor humano.

En muchas ocasiones, los trabajos y prácticas de manejo y conservación de conservación de suelos y agua, aún siendo seleccionados en base a los principios ya señalados, no llevan a la solución definitiva del problema. Ello ocurre cuando los factores que conducen a la erosión de suelos en tierras de ladera tienen sus raíces, o son determinados por problemas políticos, económicos o sociales. A veces las mejores soluciones para el uso y manejo apropiado de las tierras no se basan en mejores prácticas agronómicas y forestales o en mejores estructuras físicas, sino que pasan por resolver problemas de tenencia de las tierras, de precios y mercados para los productos agrícolas o forestales, mejora de las vías de comunicación, etc. Para estos casos, es preferible buscar soluciones que, aunque no resuelvan completamente y definitivamente los problemas, tengan al menos la posibilidad de ser aplicadas y con ello, reducir la intensidad de los procesos de erosión y de sus efectos, mientras se alcancen mejores condiciones sociales y económicas que permitan aplicar soluciones definitivas. En el pasado, algunas medidas tradicionales de conservación de suelos, como construcción de terrazas de banco en algunas de las áreas de las regiones Andina y Centro- americana, fueron efectivas para eliminar o reducir los peligros de erosión y para mantener y mejorar los rendimientos. Sin embargo, prácticamente ninguno de esos sistemas de uso y manejo de la tierra ha sido capaz de soportar los recientes y fuertes incrementos de la población y de cambios sociales y económicos. Tratar de repetir actualmente dichos sistemas de manejo resulta frecuentemente demasiado costoso para su construcción y mantenimiento, y por ello, frecuentemente los pocos programas emprendidos en ese sentido, generalmente con apoyo de organismos internacionales, no se han mantenido efectivos con el tiempo. Por ello, la prevención de "desastres naturales", lo cual debería incluirse en los planes de desarrollo de los diferentes países, debe tener un enfoque integral que abarque aspectos económicos y sociales, pero con una base científica fundamentalmente hidrológica que incluya las interacciones de los factores clima, suelos y tierras, bajo las condiciones particulares de cada sitio.

BIBLIOGRAFÍA

- CEPAL- PNUMA, 2000. Panorama de impactos ambientales de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe. UNEP/LAC-IGWG XII/TD:2. 50p
- Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R. and Mearns, L. O., 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. Science 289(5487): 2068- 2074.



- FAO, 2008. Climate Change, Water and Food Security. Technical background document from the expert consultation. FAO. Rome
- Ferrer, M., Estrela, T., Sánchez del Corral, A. y García, E., 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma* 123 (3-4): 257- 277
- Fischer, G., Shah, M. and van Velthuisen, H., 2002. Climate Change and Agricultural Vulnerability. IIASA. Vienna
- Nacci, S., 2008. Puesta a punto de metodologías sencillas para la evaluación de procesos físicos en el suelo en condiciones mediterráneas. 112 pp. Universitat de Lleida. Lleida (España)
- Nacci, S. e Pla, I., 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP.Serie B. #17. Maracay (Venezuela). 40 p.
- Nacci, S., e Pla, I., 1993. Técnicas y equipos simplificados para evaluar propiedades físicas importantes para el manejo de suelos en los trópicos. Memorias XI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (Villegas y Ponce de León, Ed.) SLCS- INICA. La Habana (Cuba) .Vol. 1: 199- 217
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J. and Lin, H. S., 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131, pp. 308- 316.
- Pla, I., 1969a. Metodología de laboratorio recomendada para el diagnóstico de salinidad y alcalinidad en suelos, aguas y plantas. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay (Venezuela)
- Pla, I., 1969b. Variantes y utilidades de la mesa de tensión en el estudio de las relaciones suelo- agua. *Rev. Fac. Agron.* 5 (1): 57- 75. Maracay (Venezuela).
- Pla, I., 1981. Simuladores de lluvia para el estudio de relaciones suelo- agua bajo agricultura de secano en los trópicos. *Rev. Fac. Agron.* XII (1-2): 81- 93. Maracay (Venezuela)
- Pla, I., 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Publ. Rev. Fac. Agron. Alcance* #32. Maracay (Venezuela). 90 p.
- Pla, I., 1986. A routine laboratory index to predict the effects of soil sealing on soil and water conservation. En "Assesment of Soil Surface Sealing and Crusting". (F.Callebout et al., ed). 154- 162. State Univ. of Ghent. Gante (Bélgica) (ISBN 90-9001289-3)
- Pla, I., 1990. Methodological problems to evaluate soil physical degradation. En "Trans. 14th Int. Congress of Soil Sci. Soc". I:95- 100.Kyoto (Japón)
- Pla, I., 1992. La Erodabilidad de los Andisoles en Latino América. *Suelos Ecuatoriales* 22(1): 33- 43. Sta Fe de Bogotá (Colombia)
- Pla, I., 1993. Erosión de suelos de ladera del trópico Andino y Centro- americano. En: (F. Munevar et al., ed.) *Manejo Integrado de Recursos Naturales en Ecosistemas Tropicales para una Agricultura Sostenible*. 21- 36. ICA. Sta Fe de Bogotá (Colombia)
- Pla, I., 1994. Soil degradation and climate-induced risks of crop production in the tropics. *Trans. 15th ISSS Congress*. 1: 163- 188. ISSS. Acapulco (México)
- Pla, I., 1996a. Propiedades físicas del suelo: Relaciones con la productividad y procesos de degradación. *Métodos de evaluación y modelaje. Suelos con Limitaciones Físicas*. Ed: R. López & F. Delgado. CIDIAT. Mérida. 19- 51
- Pla, I., 1996b. Degradación de suelos en zonas de ladera de América Latina. En (F. Bertsch y C. Monreal, ed.): *El Uso Sostenible del Suelo en Zonas de Ladera: El Papel Esencial de los Sistemas de Labranza Conservacionista*. 28- 49. FAO- MAG. San Jose (Costa Rica)
- Pla, I., 1997a. A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. In I. Pla, (Editor), *Soil Erosion Processes on Steep Lands*. Special Issue of *Soil Technology*. Elsevier. Amsterdam, 11(1): 17- 30.
- Pla, I., 1997b. Evaluación de los procesos de salinización en suelos bajo riego. *Edafología. Edición especial 50 Aniversario*. 241- 267. SECS (España)



- Pla, I., 1998. Modeling hydrological processes for guiding soil and water conservation practices. En: (A. Rodríguez et al., ed.) *The Soil as a Strategic Resource: Degradation Processes and Conservation Measures*. 395- 412. Geoforma Ed. Logroño (España)
- Pla, I., 2002a. Hydrological approach to soil and water conservation. In: J. L. Rubio et al. Ed., *Man and Soil at the Third Millenium*. Geoforma Ed. Logroño (Spain). I: 65- 87.
- Pla, I., 2002b. Modelling for planning soil and water conservation. A critical review. *Trans. 17 WCSS. "Soil Science: Confronting New Realities in the 21st Century"*. 2123- 1 - 2123- 11. Bangkok (Tailandia)
- Pla, I., 2010. Sustainable Water Management under Climate Change. *Advances in Geo- Ecology* 41. (M. Zlatić, Ed.). Catena Verlag GMBH, Reiskirchen, Germany
- Sidele, R. C., 1991. A conceptual model of changes in root cohesion in response to vegetation management. *Journal of Environmental Quality*. 20 (1): 43- 52
- Sidele, R. C. y Swanston, D. N., 1982. Analysis of a small debris slide in coastal Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*. 19: 167- 174
- Streck, 1994. Modelling processes in the soil as a tool for understanding and management in soil and water conservation. En (L.S. Bhushan et al. ed.) *Soil and Water Conservation. Challenges and Opportunities*. Proc. 8th ISCO Conf. Vol 1: 535- 551. New Delhi (India)
- USDA- SCS, 1972. *National Engineering Handbook. Hydrology Section 4. Chapters 4- 10*. Washington, D. C. (USA)
- Watson, A., Phylips, C. y Marden, M., 1999. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. *Plant and Soil*, 2217, 39- 47
- Wösten, J., Lilly, A., Nemes, A. y Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils . *Geoderma* 90 (3, 4): 169- 185
- Wösten, J., Pachepsky, Y. y Rawls, W., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251, 123- 150.

