



EVALUACION Y PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL CENTRO OESTE DE ARGENTINA

Alberto I. J. Vich y Pedro Marsonet

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET) Av. Ruiz Leal s/n Parque
Gral. San Martín, 5500 Mendoza. 54-261-4287029
E-mail: aijvich@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN: La erosión hídrica es un fenómeno complejo y su magnitud es poco conocida en Argentina, especialmente en áreas silvestres. Las mediciones se realizaron al oeste de la ciudad de Mendoza, e localizada a los 32°52'50" S y 68°52'00" O. Se examina la aplicación y adecuación de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*), como herramienta de predicción, empleándosela en la predicción de pérdidas de suelos de eventos individuales, porque las tormentas de carácter erosivos son muy poco frecuentes. Luego, se discuten los resultados de la modelización del proceso de erosión hídrica, empleando distintos modelos aplicado a parcelas y subcuencas. Para ello se ha desarrollado un modelo de simulación del balance de aguas y producción de sedimentos en una cuenca, denominado MBAPS y aplicado otros, tales como el CREAMS (*Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) versión WEPP 97.1 y ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*), cuyos primeros resultados han resultado promisorios. También se presentan los resultados de la degradación específica en las cuenca del río Mendoza, a partir del establecimiento de la relación funcional entre caudal líquido y sólido en suspensión.

Palabras Claves: erosión hídrica, degradación específica, modelos de erosión, zona árida.

ABSTRACT: The water erosion is a complex phenomenon and its magnitude is little known in Argentina, especially in the wild areas. The measurements were taken to the west of Mendoza city and localized at 32° 52'50" S and 68° 52'00". The work examines the application and adequacy of the USLE (*Universal Soil Loss Equation*) as predicting tool, using to predict individual events of soil loss, as the storms of erosive character are not frequent. This is followed by the discussion of the results of modeling the water erosion, using different models applied to plots and watersheds. For this we have developed a simulation model of water balance and sediment production in a watershed, named MBAPS and applied other models, such as CREAMS (*Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) versions WEPP 97.1 and ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*), which first results are promising. Starting from the establishment of the functional relation between liquid and suspension solid flow we present the results of specific sediment yield in the basin of the Mendoza river.

Keywords: water erosion, specific sediment yield, modeling of water erosion, arid zone.

INTRODUCCIÓN

Alberto I. J. Vich y Pedro Marsonet

Evaluación y Predicción de la Erosión Hídrica y Producción de Sedimentos en el Centro Oeste de Argentina

Los recursos naturales han sido y son el soporte fundamental del desarrollo económico y social. La relación entre la diversidad natural y sus habitantes, ha generado manifestaciones sociales y culturales propias; pero en contrapartida, ésta diversidad también puede representar un factor limitante a determinados usos e incluso constituirse, por una explotación inapropiada, en el origen del deterioro de la base natural y de sustento de las sociedades locales y también en el aumento de su vulnerabilidad. A lo largo de nuestra historia abundan ejemplos de inadecuaciones entre los sistemas productivos y las características ecológicas, climáticas y geomorfológicas.

Los procesos de expansión territorial de las actividades humanas, así como las asimetrías regionales, generan problemas de fragmentación del entorno natural y diferentes conflictos de intereses. A modo de ejemplo, se tiene el crecimiento urbano que expande la frontera entre las ciudades y el medio natural circundante, incide en la ocupación de tierras con aptitud agrícola, produciendo en muchos casos, la contaminación y decapitación de los suelos, la contaminación de los acuíferos y cursos superficiales y la modificación de la dinámica del paisaje natural en el área periurbana. También, conlleva la ocupación de tierras marginales que incrementa la vulnerabilidad de la ciudad con un aumento considerable del riesgo de desastre por inundaciones, aluviones, procesos de remoción en masa, etc.

Numerosos poblados y áreas de cultivo del oeste y centro del país se encuentran sujetos a severos riesgos por aluviones generados por intensas tormentas estivales que precipitan sobre cuencas de relieve acentuado, escasa vegetación y que se encuentran sujetas a fuertes procesos antrópicos. En síntesis, los procesos de urbanización, como es el caso del piedemonte al oeste del *Gran Mendoza* y la fuerte presión antrópica sobre un ecosistema frágil, desencadenan una serie de procesos, que comienza con la alteración de las funciones de regulación de las aguas aluvionales y culminan con la degradación del medio, prácticamente de manera irreversible y pone en serio riesgo de catástrofe a un gran asentamiento.

En la actualidad, el conocimiento de la dinámica de los procesos erosivos de origen hídrico y la estimación de la pérdida de suelos y la producción de sedimentos en distintas áreas naturales, revisten una necesidad cada vez más creciente. Estas estimaciones no solo contribuyen a un mejor entendimiento del fenómeno en sí, sino que permite evaluar las prácticas de control de erosión más adecuadas a cada zona y seleccionar aquellas que presenten mayor eficiencia. Evidentemente, las prácticas más eficientes serán aquellas que mantengan un adecuado nivel de productividad del suelo y al mismo tiempo prevengan la degradación de los suelos y el ambiente y los efectos negativos aguas abajo.

Por otra parte, la erosión hídrica es un fenómeno complejo y su magnitud es poco conocida en Argentina, especialmente en áreas silvestres de las que prácticamente no existen observaciones cuantitativas sistemáticas. En la región, las mediciones se realizaron al oeste de la ciudad de *Mendoza*, en la *Cuenca Aluvional Piloto* localizada a los 32°52'50" de latitud sur y 68°52'00" de longitud oeste, donde se instrumentaron varias subcuencas y conjuntos de parcelas, a fin de estudiar los procesos de escurrimiento y generación de sedimentos en cuencas pedemontanas.

El objeto del presente trabajo, es presentar un análisis de los datos colectados desde 1982. Posteriormente, se examina la aplicación y adecuación de la USLE (*Universal Soil Loss*

Equation), como herramienta de predicción, empleándose en la predicción de pérdidas de suelos de eventos individuales, porque las tormentas de carácter erosivos son muy poco frecuentes. Luego, se discuten los resultados de la modelización del proceso de erosión hídrica, empleando distintos modelos aplicados a parcelas y pequeñas cuencas. Para ello se ha desarrollado un modelo de simulación del balance de aguas y producción de sedimentos en una cuenca, denominado MBAPS y aplicados otros tales como, el CREAMS (*Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) versión WEPP 97.1 y ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*), cuyos primeros resultados han resultado promisorios. Además, se realiza la evaluación de la degradación específica en la cuenca del río Mendoza, a partir del establecimiento de la relación funcional entre caudal líquido y sólido en suspensión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del área de estudio

Las mediciones de erosión hídrica se realizaron en parcelas, localizadas en la *Cuenca Aluvional Piloto* del *Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales* (IANIGLA), al oeste de la ciudad de *Mendoza*, en los 32°52'50" de latitud sur y 68°52'00" de longitud oeste. El clima es árido templado desértico, con temperatura media anual es de 16.1 °C (serie 1941-60). La precipitación media anual es de 198.0 mm (serie 1900-79). El régimen de precipitaciones muestra una evidente diferencia entre el periodo invernal, de abril a septiembre y el estival, de octubre a marzo. La lluvia de verano es principalmente de carácter convectivo, con precipitaciones de corta duración y gran intensidad. En el periodo invernal las lluvias son débiles. La serie presenta fluctuaciones significativas en el periodo estival, con alternancia de periodos húmedos y secos (Compagnucci y Boninsegna, 1979).

La degradación específica fue evaluada en la cuenca del río *Mendoza*. Tiene sus nacientes en *Los Andes*, sobre un frente cordillerano de 90 km de extensión, en cuyos extremos se ubican los picos *Aconcagua* (6962 m) al norte y *Tupungato* (6800 m) al sur. El río confluye, junto con el *San Juan*, en el sistema lagunar de *Guanacache*, que en años hidrológicos ricos las lagunas desbordan y los excedentes son evacuados por el río *Desaguadero*. Posee una superficie aproximada de 18 484 km², con punto de cierre en la confluencia con el río *San Juan*. Sus límites son: al sur, la divisoria de aguas de la cuenca del río *Tunuyan*, al oeste la cordillera; al norte, la cuenca del río *San Juan*; y al este, la llanura desértica de la travesía mendocina. En ella, se ubican los principales núcleos urbanos y cultivos de la provincia.

Unidad experimental de medición

Las parcelas se asientan sobre la *Fm. Mogotes (Terciario Superior)*, que constituye un conjunto espeso de rocas sedimentarias, con estratificación grosera (Chena 1971). Los suelos -entisoles y aridisoles- muestran perfiles sin diferenciación de horizontes, presencia de material originario y cantidad variables de carbonatos en el subsuelo y dominancia de procesos de erosión de origen hídrico. Poseen exposición sur y este y pendiente variable y su superficie se encuentra libre de vegetación. La medida de erosión se realiza a partir de la determinación de la concentración de sedimentos de volúmenes parciales de agua turbia y material depositado en el fondo del captador. Presentan un alto contenido de partículas

mayores de 2.0 mm en perfil y superficie, lo que atenúa sensiblemente el efecto del impacto de la gota de lluvia. El contenido de partículas de tamaño arcilla es prácticamente inexistente, siendo su permeabilidad moderada (30.0 a 35.0 mm.h⁻¹) y de estructura granular media a gruesa. Los porcentajes de materia orgánica son altos, debido a la presencia de abundantes raicillas, propias de un área clausurada desde hace más de 15 años. En la actualidad, dichas parcelas no se encuentran en operación.

También, se disponen de un conjunto de tres parcelas de 10 x 3 m sobre una estepa arbustiva. Una de ellas, se encuentra con suelo descubierto, con cobertura vegetal de 41.8 % (36.3 % de arbustos, 4.1 % gramíneas y 1.4 % cactus) y del 60 % (marcado predominio de especies arbustivas 49 %, gramíneas 3.1% y el resto, otras). Además, se instrumentaron pequeñas cuencas, que cuentan con dispositivo de aforos volumétrico de escurrimiento y sedimentos con una superficie. Las características de geométricas y de suelos de las distintas unidades de medición se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1.- Geometría y características granulométrica de las unidades experimentales de medición

unidad	long. [m]	área [m ²]	pend. [%]	cob. vegetal [%]	fracción > 2 mm [%]	fracción < 2 mm			MO [%]
						arena [%]	limo [%]	arcilla [%]	
LV-2	2	2	33.6	0.0	42.7	54.5	45.0	0.5	1.73
LV-4	4	4	40.8	0.0	40.2	55.0	44.6	0.4	1.78
LV-8	8	8	41.0	0.0	45.3	66.5	33.0	0.5	1.16
LP-2	2	2	33.5	0.0	63.8	60.0	39.5	0.5	0.96
LP-4	4	4	37.3	0.0	47.0	54.0	45.0	1.0	1.70
LP-8	8	8	40.6	0.0	48.0	65.0	34.6	0.4	1.08
CAP1	10	30	19.6	0.0	35.0	71.2	21.1	7.7	0.90
CAP2	10	30	16.7	41.8	38.5	69.2	22.3	8.5	0.95
CAP3	10	30	14.6	60.0	34.0	69.0	21.9	9.1	1.03
Jarillal	57 ^(*)	1385	32.0	75.0	42.7	71.8	26.9	1.3	1.56
Garabato	126 ^(*)	3952	31.94	65.0	52.9	72.6	25.8	1.6	1.28

NOTA: ^(*) Longitud del cauce principal

En la cuenca del torrente *Maure*, localizada en la zona pedemontana, a los 32° 52' de latitud sur y 68° 52' de longitud oeste, aproximadamente, al oeste del centro urbano del departamento de *Godoy Cruz (Mendoza)*, se seleccionaron 3 pequeñas cuencas, en las cuales en el año 1992 se realizó una intervención intensiva, con la construcción de numerosas trampas de agua.

Las cuencas poseen una pendiente media del orden de 4.3 %; en ellas se observan dos niveles de piedemonte. Un nivel superior, de aspecto mesetiforme con superficies planas, muy disectado, cuya cubierta superficial está constituido por materiales de detritos mal rodados, clastos y guijarros, y en profundidad, se encuentran parcialmente cementados por material calcáreo. El segundo nivel esta formado por depósitos detríticos heterogéneos, mal rodados, con matriz fina escasa. Los cauces conforman una red de tipo paralela a subparalela; son generalmente angostos y perfil en V.

La vegetación presente es un matorral abierto, con un marcado predominio de plantas arbustivas, entre las que se destacan *Larrea cuneifolia* (jarilla), *Lycium tenuispinosum* (llaullin), *Acantholippia seriphioides* (tomillo), *Condalia microphylla* (piquillin.), *Gochnartia*

glutinosa (jarillilla), *Tricomaria usillo* (usillo), y entre las gramíneas *Pappophorum caespitosum* (pasto amargo) y *Stipa eriostachya* (coirón).

Posteriormente a la construcción de las obras, se realizó el relevamiento planialtimétrico de las cuencas, para definir las características topográficas del sitio (superficie, longitud de cauce, desnivel, etc.) y determinación de la capacidad de almacenamiento de las trampas en el verano de 1993. Luego, se midió la acumulación de sedimentos para cuantificar la colmatación paulatina de los vasos y evaluar su funcionamiento y eficiencia. En la **Tabla 2**, se muestran las características geométricas de las trampas empleadas en la medición.

Tabla 2. -Características geométricas de las trampas de agua

nombre cuenca	área [ha]	no trampas	nombre trampa	superficie aporte [m ²]	dist. entre trampas [m]	pendiente cauce [%]
1	4.0	6	1	5 443	^(*) 77.8	7.9
			2	7 721	110.3	6.0
			3	6 266	89.5	6.0
			4	6 645	94.9	7.0
			5	4 968	71.0	5.0
			6	6 899	98.6	4.0
2	3.7	11	1	4 579	^(*) 65.4	2.0
			2	4 607	65.8	5.0
			3	4 775	68.2	5.0
			4	2 781	39.7	6.5
			10	2 500	35.7	5.5
			11	4 831	69.0	3.0
7	7.7	16	1	3 487	^(*) 9.8	4.0
			2	4 080	58.3	10.9
			3	4 996	71.4	15
			4	7 232	103.3	6.5
			5	6 058	86.5	4.5
			6	6 602	94.3	4.1
			7	8 383	119.8	6.5
			8	5 415	77.4	5.8

NOTA: ^(*) Distancia medida de la divisoria de agua a la trampa.

Estimación de la degradación específica en la cuenca del río Mendoza

La cuenca bajo estudio, se encuentra prácticamente localizada en el sector andino. El río *Mendoza*, se inicia en la confluencia de los ríos *Vacas*, *Cuevas* y *Tupungato* en la localidad de *Punta de Vacas* en la *Cordillera Principal* o *del Límite*. Hasta su desembocadura, el río no posee afluentes importantes, excepto el *A° Uspallata* localizado en el faldeo occidental del *Cordón del Plata*, sistema orográfico perteneciente a la *Cordillera Frontal*. Sus aguas provienen en su casi totalidad de la fusión nívica y de los glaciares existentes en su cuenca.

El río *Vacas*, recibe el aporte de numerosos arroyos que tienen sus nacientes en el glaciar de *Los Polacos* sobre la pared este del *Co. Aconcagua* y de otros, con nacientes en la

cordillera del *Tigre*. En la parte superior de la cuenca del *Cuevas* se encuentran una serie de ventisqueros y recibe el aporte del río *Horcones* que se origina en el glaciar de nombre homónimo, ubicado sobre la pared sur del Aconcagua. Las nacientes del río *Tupungato*, se localizan en los glaciares del sector norte del cerro del mismo nombre; posee un importante tributario, el río *Plomo* que nace en un importante grupo de ventisqueros denominados *Plomo y Juncal*.

Las características de las estaciones de aforo de los principales ríos que conforman la red hidrográfica se muestran en la **Tabla 3**. (EVARSA, 1997). En ellos se realizan aforos líquidos de manera sistemática y aforos de sólidos en suspensión, esporádicamente. El número de determinaciones de concentración media, expresado en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, es variable y del orden de 1088, 1080 y 2013 para los ríos *Vacas*, *Cuevas* y *Tupungato* medidos en el paraje de *Punta de Vacas*, respectivamente. En el río *Mendoza*, la estación de aforos se localiza en *Guido* y el número de observaciones es de 5056.

Tabla 3. – Estaciones de aforos

RIO	ESTACION	AREA APORTE	ALTURA	COORDENADAS	
		[km ²]	[msnm]	latitud	longitud
Vacas	Punta de Vacas	3050	2450	32° 61'	69° 46'
Cuevas	Punta de Vacas	680	2430	32° 51'	69° 46'
Tupungato	Punta de Vacas	1800	2430	32° 51'	69° 46'
Mendoza	Guido	8180	1550	32° 51'	69° 16'

La metodología, consistió en ajustar una función potencial a los datos de transporte de material en suspensión y caudal diario, empleando análisis de regresión no lineal implementado en el paquete estadístico INFOSTAT. Con estas curvas y los valores de descarga diarios se calcularon los transportes medios mensuales y anuales totales.

Aplicación y desarrollo de métodos de predicción de erosión hídrica

La predicción de erosión se realiza a partir del ajuste de ecuaciones empíricas, como la *Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo* (USLE) y modelos. La estimación de la respuesta de una cuenca, como consecuencia de un evento, basado en la propagación del exceso de áreas elementales y homogéneas, puede ser obtenido por medio de un modelo de parámetros distribuidos. Bajo este marco, se ha desarrollado un modelo de simulación, denominado MBAPS (*Modelo del Balance de Aguas y Producción de Sedimentos*). Teniendo en cuenta el auge de los modelos de erosión y la escasa experiencia en el país se comienza a incursionar en la aplicación y evaluación de los modelos CREAMS), versión WEPP 97.1 (*Chemicals, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems*) y ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*).

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE)

La USLE es un método para predecir la pérdida de suelo anual para cualquier combinación de suelo, topografía, clima, cobertura y prácticas de manejo. El método se fundamenta en la capacidad que poseen las lluvias para provocar erosión (Wischmeier y Smith, 1978). Se trata de un procedimiento de carácter universal, ya que posee la flexibilidad de poder emplearlo en cualquier región, adaptando los parámetros a las condiciones locales, sin que

ello presuponga una modificación de los aspectos básicos del método. La ecuación es de la forma:

$$PS = 2240 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [1]$$

Donde: **PS** pérdida de suelo en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, si se trata de un evento kg ha^{-1} ; **R**, factor de erosividad de lluvia; **K**, factor de erodabilidad de suelos; **LS**, factor topográfico; **C**, factor de cobertura y **P**, factor prácticas de cultivo.

El principal factor es el factor de erosividad; que mide la potencialidad de la lluvia para provocar erosión. Su acción es incrementada en función de las características de relieve (longitud e inclinación de la pendiente, factor **LS**); y regulada por las propiedades del suelo (susceptibilidad a la erosión, factor **K**); tipo y cobertura vegetal presente (factor **C**) y las prácticas culturales que se realicen (factor **P**). Los factores **C** y **P** son variables a lo largo del año; por ello es conveniente su evaluación estacional o mensual. La ecuación constituye una excelente herramienta -una vez determinado el rango de variación de los parámetros- para identificar las áreas de mayor riesgo de erosión a escala regional. En general, la USLE se emplea para predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente en un campo con condiciones específicas para uso de la tierra y servir como guía en la selección de prácticas de conservación para suelo. En este caso particular, se la ha empleado en la predicción de pérdidas de suelos de eventos individuales, porque las tormentas de carácter erosivas son muy poco frecuentes en el año (Vich, *et al* 1998).

La capacidad potencial de las lluvias para producir erosión, fue estimada a partir de la determinación del factor de erosividad **R**, que es considerado como uno de los mejores estimadores de erosión potencial y es función del producto entre la intensidad de lluvia máxima en 30 min y su energía cinética. La correlación entre las pérdidas de suelos observadas en las parcelas y el estimador, no fue satisfactoria ya que se obtuvieron coeficientes de correlación bajos, que no explican las variaciones en las pérdidas de suelo en función de las lluvias. Por tal razón, se propusieron distintas formas del factor de erosividad, combinando la intensidad de lluvia y el escurrimiento. Las modificaciones propuestas son:

$$PS = 2240 K \cdot [\alpha \cdot R + (1 - \alpha) \cdot Q] \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [2]$$

$$PS = 2240 \cdot K \cdot (I30 \cdot Q)^\beta \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [3]$$

Donde: α , coeficiente ($0.0 < \alpha < 1.0$) que representa la importancia relativa de la energía de la precipitación en comparación con la energía del escurrimiento para producir erosión; β , exponente. El resto de los factores se evaluó con la metodología original, incluyendo en el factor cobertura el efecto protector de los fragmentos de rocas presentes en el suelo y superficie

La susceptibilidad del suelo a la erosión fue evaluada a partir de la determinación del factor **K** de la USLE. El mismo, se estimó con los valores acumulados para la serie 1982-93 según el procedimiento desarrollado por Romkens (1985) para parcelas no estandarizadas y empleando el nomograma de Wischmeier y Mannering (1969). Los valores de erodabilidad difieren substancialmente de un método a otro, debido a la presencia de

fragmentos gruesos en superficie que reduce la erosión hídrica (McCormack *et al* 1984; Simanton *et al* 1984). El material grueso hace que la rugosidad superficial sea mayor, provocando una disminución de la velocidad de escurrimiento e incremento de la infiltración. El factor **K**, calculado a partir del nomograma, incluye únicamente las partículas menores de 2.0 mm, que constituyen la fracción erodible del suelo, no los fragmentos gruesos, que poseen una gran variación en superficie y perfil. Su presencia, generalmente es debido resultados de procesos de erosión ocurridos en el pasado y en otros sitios

Modelo MBAPS

El modelo **MBAPS** (Vich, 1985, 1988, 2000) es determinístico, de parámetros distribuidos y para un evento. Incluye los subprocesos de; intercepción de la lluvia por la vegetación, almacenamiento en microdepresiones, infiltración, disgregación por impacto de la gota de lluvia y acción del flujo superficial, transporte de los sedimentos por el escurrimiento y propagación del exceso de agua y materiales en laderas y cauce.. La cuenca es segmentada en celdas regulares, donde se evalúan los distintos subprocesos, asumiendo homogeneidad en sus características geofísicas. Luego, el exceso (líquido y sólido) se propaga de una celda a otra, según un ordenamiento preestablecido.

El modelo está estructurado sobre la base de dos módulos. El primero, realiza el ordenamiento de las celdas, determina la fracción de descarga de las celdas en las adyacentes y crea el archivo de datos definitivo a emplear. El segundo, realiza la evaluación de los distintos subprocesos y la propagación hasta la celda definida como salida.

El área de drenaje es segmentada en celdas cuadradas, con dos triángulos estructurando cada segmento o unidad; de esta manera, el relieve de la cuenca es representado por un conjunto de triángulos planos, ligados entre sí, esta simplificación de la superficie de la cuenca, por medio de triángulos, permite calcular la cota de cualquier punto interno a ellos, por interpolación lineal. Como paso previo, es necesario corregir algunos “errores” en las elevaciones, que básicamente provienen de la asignación de cotas a cada nodo de la retícula, ya sea que esta se realice manualmente o automáticamente. Para ello, se realiza un proceso de “suavización”, que consiste en suprimir o acentuar ciertos rasgos de la superficie para su mejor interpretación. Este procedimiento, se ejecuta sobre la base del desarrollado por Ribeiro Salles (1983), que radica en reasignar una nueva cota a cada nodo, basándose en el promedio de las elevaciones medias de los triángulos que conforman las celdas adyacentes, a cada uno de ellos.

La fracción de descarga del exceso (líquido o sólido) de cada celda en las adyacentes, se calcula en función de la dirección preferencial de flujo **DPF**, que se define por el ángulo que forma con el eje positivo de las abscisas. En cada triángulo de los dos que componen una celda, se determinan 6 direcciones posibles en las que puede desplazarse el exceso, asumiendo que este se encuentra concentrado en el centro de gravedad y su magnitud es equivalente al 50 % del total que genera la celda. Siguiendo el criterio de gradiente máximo, se selecciona una dirección preferencial de flujo; de esta manera, cada celda tendrá dos vectores de igual magnitud. La resultante de la suma vectorial de las direcciones preferenciales de los triángulos, representa la Dirección Principal de Flujo. La celda aportará a sus vecinas, una proporción equivalente a la magnitud de las componentes del vector resultante.

Posteriormente, se realiza un ordenamiento de las celdas con el objeto de establecer prioridades en la propagación de los excesos a través de la cuenca. Para este ordenamiento se considera si la celda recibe aportes laterales o no, y si estos son conocidos. La búsqueda se realiza por filas, identificándose en primer lugar, las celdas que no reciben descargas de las adyacentes y se le asigna un número de orden. Al avanzar en la fila, se analiza para cada celda si las vecinas descargan en ella. En caso afirmativo, se verifica si su aporte es conocido, es decir, si tiene un número de orden asignado; de ser así, a la celda analizada se le establece un número de orden. De lo contrario, se continúa con las celdas restantes hasta completar todas las filas. El ordenamiento de todas las celdas que conforman la cuenca, se realiza sobre la base de un proceso iterativo, donde cada iteración, constituye un barrido completo de la retícula.

Para cada celda y paso de tiempo del modelo, se evalúa la lámina interceptada por la vegetación y se estima la lluvia que realmente alcanza la superficie. La lluvia efectiva, durante el evento, posee intensidad variable y en algunos momentos, puede superar la capacidad de infiltración. Ello, genera un exceso de agua, que se acumula en el microrelieve de la superficie del terreno, hasta completarlo, a partir del cual, se inicia el escurrimiento. Es factible establecer un balance en el segmento como:

$$P(t) = F(t) + A(t) + R(t) \quad [4]$$

Donde: **t**, tiempo medido desde el inicio de la lluvia; **P(t)** precipitación acumulada; **A(t)** lámina acumulada almacenada en el microrelieve superficial; **R(t)**, escurrimiento acumulado. El modelo de infiltración usado es el de Green y Ampt (1911), modificado por Mein y Larson (1971, 1973), Chu (1978), Moore *et al* (1981) y Junes (1985). Sus características más importantes son: aplicable a un segmento de cuenca donde las propiedades de suelo, relieve y vegetación son homogéneas; predice la infiltración para lluvias con intensidad variable; funciona bajo condiciones de encharcamiento o sin ella. La ecuación de infiltración, según Mein y Larson (1973) para superficie encharcada es:

$$f_p = K \left(1 + \frac{S(HS - HI)}{F} \right) \quad [5]$$

Donde: **HS** humedad a saturación natural; **HI** contenido inicial de humedad de suelo; **K** conductividad hidráulica saturada; **S** tensión de succión en el frente de humedecimiento; **F** infiltración acumulada al tiempo **t**; **f_p** velocidad de infiltración con superficie encharcada.

La diferenciación de las etapas de encharcamiento o no, se realiza en base a la variable almacenamiento en microdepresiones. Este aspecto es muy importante, porque la infiltración alcanza su valor máximo, cuando la superficie no se encuentra encharcada y además, es independiente de la variación temporal de la lluvia. Bajo condiciones de encharcamiento, la velocidad de infiltración, es equivalente a la intensidad de precipitación; ambos casos, pueden presentarse alternativamente durante la tormenta. Matemáticamente se expresa como:

$$A(t) = 0 \quad t \leq t_p \quad F = F_u \quad [6]$$

$$A(t) > 0 \quad t \geq t_p \quad F = F_p \quad [7]$$

Donde: t_p tiempo de inicio del encharcamiento; F_u infiltración acumulada sin encharcamiento; F_p infiltración acumulada con superficie encharcada.

La relación entre el almacenamiento de superficie $A(t)$ y el exceso de precipitación se expresa por medio de las siguientes ecuaciones. Existe una lámina D que puede ser retenida en el microrelieve y hasta no ser satisfecha, no existe escurrimiento; en consecuencia $A(t)$ está limitada por:

$$0 \leq A(t) \leq D \quad [8]$$

La ecuación [4], en función del tiempo, se expresa como:

$$I = f + \frac{dA(t)}{dt} + r \quad [9]$$

Donde: I intensidad de la lluvia; f velocidad de infiltración; r tasa de escurrimiento. De las ecuaciones [8] y [9], se desprende que r es:

$$r = I - f_p \quad \text{para } A = D \quad \text{y} \quad I > f_p \quad [10]$$

$$r = 0 \quad \text{para } A < D \quad \text{o} \quad I \leq f_p \quad [11]$$

El cálculo de la infiltración para las distintas condiciones de superficie y el balance hídrico en la celda se resuelve por el método desarrollado por Chu (1978).

El flujo generado por la celda es resuelto sobre la base del principio de onda cinemática. En concordancia a los planteamientos de Woolhiser y Liggett (1967) y asumiendo que se trata de un flujo turbulento, la descarga por unidad de ancho q de la celda se expresa como:

$$q = \alpha h^m = \frac{1}{n} S_o^{0.5} h^{5/3} \quad [12]$$

Donde: n coeficiente de rugosidad de Manning; S_o pendiente de la DPF de la celda, h tirante medio en la celda. La ecuación [12], constituye una buena aproximación del caudal generado por el segmento (Beasley *et al*, 1980). El tirante medio a la salida de la celda transformada, es una función del exceso de agua y del tiempo. La descarga total de la celda modificada de ancho w es:

$$Q = w q = w \left(\frac{1}{n} S_o^{0.5} h^{5/3} \right) \quad [13]$$

El monto de material removido en una celda, es el resultado de los subprocesos de disgregación por impacto de la gota de lluvia W_s y disgregación por flujo superficial W_r . La tasa de disgregación total E_r es la suma de los dos subprocesos. Las ecuaciones de

disgregación por lluvia y flujo usadas en el modelo, son las propuestas por Park *et al* (1981) y Khaleel *et al* (1979, *cit.* Park *et al* 1981), respectivamente.

$$W_s = 0.182 K_r K_h C_m \left[296 (\sin \theta)^{0.79} + 0.56 \right] \left[(1 - PCV) I^{ex} + PCV I_e^{ex} \right] \quad [14]$$

Donde: K_r factor de erodabilidad de suelos, equivalente al factor K de USLE; K_h factor de corrección por profundidad de la lámina de escurrimiento; C_m factor que atenúa el proceso de disgregación debido a la presencia de mantillo en la superficie o materia orgánica incorporada al suelo; θ inclinación de la pendiente; PCV porcentaje de cobertura vegetal; I intensidad de la lluvia; ex exponente que depende del contenido de arcilla presente en el suelo; I_e intensidad de la precipitación efectiva; C_n factor de cobertura, equivalente al factor C de la USLE.

La tasa de disgregación por flujo, es función del esfuerzo de corte, es definida como:

$$W_f = 11.02 K_f C_f \tau^{e2} \quad [15]$$

$$\tau = \gamma h S \quad [16]$$

Donde: K_f factor de erodabilidad de suelo por acción del escurrimiento, que puede ser aproximado por el factor K de la USLE; C_f factor que combina el efecto protector de la vegetación, mantillo y residuos orgánicos incorporados al suelo; τ esfuerzo de corte en el fondo del surco; γ peso específico del líquido; h profundidad de la lámina de escurrimiento; S pendiente; $e2$ exponente. Por lo tanto, la tasa de disgregación total en la celda es:

$$E_r = W_s + W_f \quad [17]$$

La producción de sedimentos de la celda se encuentra limitada por el monto del material disgregado en las celdas mas el proveniente de las celdas adyacentes, o por la capacidad de transporte del flujo generado por la celda. En consecuencia, estas dos restricciones se pueden se pueden expresar como:

$$0 \leq G_i \leq TF_i \quad [18]$$

$$G(t)_i \leq (TF(t-1)_i - G(t-1)_i) + E_r(t)_i + \sum_{j=1}^4 G(t)_j \cdot TRAN_j \quad [19]$$

Donde: $TF(t)$ capacidad de transporte o arrastre del flujo en la celda a un tiempo t de iniciada la lluvia; $G(t)$ descarga sólida de la celda al tiempo t ; $TRAN$, proporción de descarga de las celdas adyacentes, la suma de las fracciones de las 4 celdas adyacentes es 1.0; i subíndice que indica la i -ésima celda bajo análisis; j subíndice relativo a las celdas adyacentes a la i -ésima. Como se podrá deducir, en la ecuación [19], el primer término del miembro de la derecha, es el material depositado en la celda, en el paso de tiempo anterior del modelo, y se encuentra disponible para su remoción en el paso de tiempo actual.

Para el cálculo de la capacidad de transporte del flujo generado en la celda, se emplea la ecuación de Yalin (1963), modificada y adaptada por Foster y Meyer (1972) para predecir el transporte de una mezcla de tamaños de partículas. La elección de esta ecuación se debe a su facilidad de uso en procesos digitales, requiere información únicamente de parámetros hidráulicos y proveen estimaciones confiables de la carga de sedimentos en una celda (Alonso *et al*, 1981). La adaptación de la fórmula de Yalin para predecir el transporte de una mezcla de partículas realizada por Foster y Meyer (1972), queda como:

$$TF_i = TFA_i S_g \rho_w d_i V^* \quad [20]$$

Donde el subíndice *i* denota el tamaño del grano; V^* velocidad de corte; ρ_w densidad del fluido; d diámetro de la partícula; S_g gravedad específica; TFA capacidad de transporte adimensional.

Davis (1978), desarrolla un sencillo algoritmo para el cálculo de la capacidad de transporte de cada tamaño de partículas que conforma la mezcla suelo y la redistribución de excedente de capacidad en otras clases. Este procedimiento es el que emplea el modelo para definir la capacidad de transporte de una mezcla de clases de partículas de suelo, que se asume será equivalente en el material removido.

Modelos ANSWERS y CREAMS

En el trabajo, se ha empleado la versión modificada del modelo ANSWERS (Bouraoui y Dillaha, 1996); se trata de un modelo de parámetros distribuidos y continuo. Representa los siguientes procesos: cuando se inicia la lluvia, parte es interceptada por la vegetación; la lluvia efectiva puede infiltrarse según el modelo de Green y Ampt (1911). Cuando la capacidad de infiltración se sobrepasa, o si el espesor de suelo se encuentra saturado, el agua se acumula en microdepressiones del terreno; cuando este almacenamiento se satura, se inicia el escurrimiento.

Esta agua se transfiere a la red hidrográfica y se traslada a la salida de la cuenca, según el método de Bras (1990). También, el agua en exceso de la capacidad de campo puede transferirse a la capa freática. Cuando no llueve, el agua se puede evaporar según el modelo de Richie (1972), que distingue la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación. El módulo de transporte de sedimentos incluye el arrastre de partículas disgregadas por acción del impacto de la gota de lluvia y por el flujo, en función de la capacidad de transporte del escurrimiento superficial (Beasley *et al.*, 1980).

El modelo CREAMS (Knisel, 1980), constituye la base del WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (Nearing, *et al*, 1989), y se ha empleado la versión WEPP 97.1. Es determinístico, de simulación continua ó de eventos puntuales. Estima básicamente la disgregación y deposición de suelo a lo largo de una ladera y la pérdida de suelo total neta al final de la misma. Presenta nueve componentes conceptuales: generación de clima, procesos de viento, irrigación, hidrología, suelo, planta, descomposición de residuos, hidráulica de flujo, y erosión.

RESULTADOS

Pérdidas de suelo observadas

Durante el período 1982-95 ocurrieron 36 episodios lluviosos que generaron escurrimiento y en consecuencia, erosión hídrica. Las lluvias consideradas erosivas, únicamente se

presentaron en el período octubre-abril, correspondiendo la mayor concentración de ellas, al verano. Las precipitaciones consideradas erosivas poseen un umbral de intensidad máxima en 30 minutos de 15.0 mm.h^{-1} . Por debajo de este valor, independientemente de la cantidad de lluvia caída, no se registra escurrimiento. De los 36 eventos ocurridos, únicamente el 28 % posee un monto de lluvia mayor de 30.0 mm. Por otra parte, el 56 % de los eventos posee un rango de intensidad máxima en 30 minutos entre 15.0 y 30.0 mm.h^{-1} .

Los períodos 1985-86, 1986-87 y 1988-89 fueron años secos, sin que se registrara ninguna precipitación de carácter erosivo. Los períodos 1983-84 y 1989-90 son los años más ricos, con un elevado número de días con lluvias erosivas. El período 1984-85 fue ligeramente húmedo, pero sin ocurrir ninguna precipitación de gran intensidad. El período 1986-87 no cuenta con observaciones debido a daños por vandalismo, al igual que el 1992-93 donde los valores anuales de pérdida de suelo fueron menores a las ocurridas, ya que algunas observaciones se perdieron debido a daños en la infraestructura de medición. Los valores anuales de pérdidas de suelo se muestran en la **Tabla 4**.

Se disponen de 206 observaciones de pérdidas de suelo (**PS**), medidas en las parcelas. El 34 % de ellas, corresponden a $\text{PS} < 1000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$ el 27 % es $1000.0 < \text{PS} < 2000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$; y el 39 % es mayor de $2000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$ por evento. Pese a las diferencias en pendiente y longitud que poseen las parcelas, las medias de las pérdidas de suelo no muestran diferencias significativas. Es posible que las diferencias obedezcan a aspectos tales como su exposición, variación local de las lluvias, etc. más que a diferencias constructivas (Vich *et al* 1998).

Tabla 4. - Pérdidas de suelo observadas, en kg.ha^{-1}

AÑO	LV-2	LV-4	LV-8	LP-2	LP-4	LP-8
1982-83	12 800.0	12 520.0	10 480.0	9 750.0	14 680.0	15 650.0
1983-84	24 860.0	22 280.0	26 800.0	25 050.0	26 900.0	35 340.0
1984-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1985-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986-87	2 210.0	1 670.0	S/D	1 650.0	S/D	S/D
1987-88	5 530.0	3 690.0	4 430.0	3 220.0	3 750.0	2 630.0
1988-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989-90	14 209.1	13 588.9	16 761.7	8 952.9	11 472.3	17 968.4
1990-91	1 800.7	1 383.2	6 871.9	559.1	373.1	3 155.6
1991-92	3 594.7	5 331.1	11 028.4	4 730.9	1 016.7	4 532.8
1992-93	1 685.4	1 425.1	1 590.9	1 677.7	1 283.6	S/D

La medición de los sedimentos depositados en las trampas de agua se efectuó durante Septiembre y Noviembre de 1995 y 1997, encontrándose en algunos casos depósitos de sedimentos de hasta 30 cm de espesor. El volumen de sedimentos depositados en cada trampa, durante el período 1993-95, fue del orden de 1.0 a 7.0 m^3 , mientras que en el período 1995-97, fue entre 0.14 y 9.58 m^3 . En la **cuenca 1**, la cantidad de materiales medidos en primer lugar, representó el 46 % al 87 % de los sedimentos totales; en la **cuenca 2**, entre el 69 % y el 93 %, y en la **cuenca 7**, entre el 51 % y el 96 %. Es importante destacar, que durante la construcción de las obras, gran cantidad de suelo es removido y desprovisto de vegetación, pese a que se trata de alterar lo menos posible las condiciones naturales de la zona del cauce y

vaso de acumulación. Además, estas obras fueron terminadas durante la temporada estival, que representa el periodo lluvioso de la región. En estas condiciones, las precipitaciones producen un volumen considerable de sedimentos, que a medida que los sitios perturbados se estabilicen gradualmente y la vegetación natural se recupera, las tasas de erosión disminuyen.

También, se ha podido observar que la vegetación en todos los sitios se ha recuperado considerablemente, ya que en todos los casos, excepto en una, la acumulación del sedimento en el primer período (1993-95) superó al segundo período (1995-97). Las diferencias de cobertura y su recuperación, podrían llegar a explicar la variabilidad en las observaciones y disminución de la degradación. En la **Tabla 5**, se muestra la pérdida de capacidad de los vasos de acumulación y los valores de degradación específica, calculados para cada trampa. En cada subcuenca, se determinaron los valores de densidad aparente promedio, que resultaron de 1985.0, 1945.0 y 1980.0 kg.m⁻³, para las cuencas **1**, **2** y **7**, respectivamente. Dicha información permitió el cálculo la degradación específica (Mariani 1998)

Además, se han evaluado las: características físico-química de los sedimentos y recuperación de la vegetación nativa. Se extrajeron muestras superficiales del suelo en 4 sitios diferentes: en ladera, en cauce no afectados por el paso de la maquinaria; en el vaso de acumulación; y en la zona de ingreso o cola de aferramiento y se realizaron las siguientes determinaciones: granulometría, determinación de nitrógeno (método de *Kjeldahl*), fósforo (método Sulfomolibdico), potasio (método *Pratt*) y materia orgánica (método *Walkley-Black*).

Tabla 5. - Sedimentos en trampas de agua

cuenca	trampa	superficie de aporte [m ²]	capacidad trampa [m ³]	producción de sedimentos				degradación específica [kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹]
				1995 [m ³]	1997 [m ³]	1992/95 [m ³]	1995/97 [m ³]	
1	1	5 443	189.6	2.45	3.98	2.45	1.53	2 900
	2	7 721	296.6	2.92	4.09	2.92	1.17	2 100
	3	6 266	370.9	1.79	2.04	1.79	0.25	1 290
	4	6 645	739.5	4.99	6.82	4.99	1.83	4 190
	5	4 968	413.9	4.82	5.66	4.82	0.84	4 520
	6	6 899	243.4	2.45	5.26	2.45	2.81	3 020
2	1	4 579	527.9	4.33	5.10	4.33	0.77	4 330
	2	4 607	383.9	1.89	2.72	1.89	0.84	2 300
	3	4 775	314.0	0.92	2.44	0.92	1.52	1 980
	4	2 781	109.5	2.36	2.54	2.36	0.18	3 550
	10	2 500	144.1	2.45	3.26	2.45	0.80	5 070
	11	4 831	274.3	2.32	3.50	2.32	1.18	2 820
7	1	3 487	328.1	1.60	3.13	1.60	1.54	3 560
	2	4 080	309.9	1.67	2.09	1.67	0.42	2 020
	3	4 996	311.1	3.89	4.03	3.89	0.14	3 190
	4	7 232	1222.0	6.98	9.92	6.98	2.94	5 430
	5	6 058	847.7	2.85	12.42	2.85	9.58	8 120

	6	6 602	364.0	5.56	10.80	5.56	5.24	6 480
	7	8 383	912.1	5.36	7.88	5.36	2.52	3 720
	8	5 415	450.5	5.17	5.39	5.17	0.22	3 940

Estos análisis permitirán establecer las diferencias en los contenidos de nutrientes y textura del suelo entre los distintos sitios en el tiempo. Los cambios en cuanto a textura se evalúa a través del diámetro mediano ϕ_m . Los cauces presentan un marcado predominio de arena muy gruesa y hasta grava ($> 2.0 \text{ mm}$), con porcentajes que varían entre 52 al 76 %; en las laderas, las arenas gruesas varían entre 40 y 60 %. En la cola del aterramiento se observan porcentajes de entre 27 y 52 % de arena gruesa a fina, mientras que en los vasos de acumulación la fracción dominante es la arena media a fina ($0.5 - 0.125 \text{ mm}$) variando entre 25 y 50 % en casi todos los casos. Los porcentaje de limo y arcilla hallados en las muestras de ladera, cauces y cola de aterramiento, presentan valores inferiores al 1 %, mientras que en el vaso puede llegar al 6 %.

En cuanto a los nutrientes presentes, se observa una marcada diferencia entre los contenidos de **N** y materia orgánica (**M.O.**) encontrados en los vasos de acumulación (valores mayores a 2000 ppm y 3 % respectivamente, con respecto a los sitios de muestreo de ladera, cauce y cola de aterramiento), Los vasos de acumulación presentan alto nivel de **N**, mientras que los cauces, laderas y cola los niveles son pobres a medios. Los contenidos de **P** son bajos, con valores entre 7 y 9 ppm. en cauces, ladera y cola de aterramiento y valores entre 8 y 11 ppm en los vasos. Los contenidos de **K** variaron sensiblemente de un período a otro, entre 900 y 1300 ppm. Como puede deducir, el escurrimiento superficial arrastran los materiales y nutrientes ladera abajo hasta alcanzar el vaso de la trampa de agua, donde son retenidos; originando paulatinamente depósitos de materiales más finos y con mayores contenidos de **N**, **P**, **K** y **M.O.** El material depositado, con mayores contenidos de humedad que los sitios aledaños, presenta mejores condiciones para el desarrollo de la vegetación natural que el resto de la cuenca. La **Tabla 6**, muestra las características granulométrica y contenido de macronutrientes, medidos en distintos sitios, en algunas trampas de agua.

Tabla 6. - Características físico-químicas de los sedimentos depositados en distintos sitios de las trampas de agua

cuenca	trampa	sitio	ϕ_m [mm]		N [ppm]		P [ppm]		K [ppm]		M.O. [%]	
			1995	1997	1995	1997	1995	1997	1995	1997	1995	1997
1	1	Cauce	2.000	2.000	1 162	748	7.14	7.52	1 004	976	1.91	1.97
		Ladera	2.000	2.000	946	700	7.62	7.78	978	1 072	0.56	1.89
		Cola	2.000	0.500	726	700	7.24	7.43	961	1 036	0.71	2.06
		Vaso	0.200	0.125	2 314	3 024	9.32	9.76	1 072	1 314	2.1	3.58
3	3	Cauce	2.000	2.000	982	716	8.11	7.70	1 176	1 140	1.78	1.64
		Ladera	1.000	2.000	916	840	7.03	8.11	973	1 041	1.47	1.76
		Cola	2.000	1.500	826	448	7.12	7.08	914	976	0.61	1.41
		Vaso	0.500	0.200	2 463	2 044	9.03	9.54	1 306	1 253	3.18	1.94
2	4	Cauce	2.000	2.000	1 314	801	9.03	8.06	1 074	1 036	2.81	2.01
		ladera	0.500	2.000	936	532	7.13	7.18	1 008	1 045	1.51	1.53
		cola	1.000	2.000	616	1 120	7.08	8.25	854	1 106	0.67	3.07
		vaso	0.180	0.250	4 480	2 156	8.48	10.41	1 236	1 472	4.63	2.88
10	10	cauce	2.000	2.000	1 178	686	8.02	7.45	991	1 089	2.01	2.11
		ladera	1.000	0.500	921	756	7.09	8.06	1 044	1 007	1.38	1.10

		cola	2.000	1.000	781	1 344	7.25	8.51	972	1 132	0.89	2.41
		vaso	0.170	0.300	2 320	2 380	7.19	8.19	1 084	1 093	2.96	1.86
7	4	cauce	2.000	2.000	1 182	448	7.28	7.12	1 165	1 074	1.78	1.23
		ladera	2.000	1.500	1 186	784	7.31	7.21	987	976	1.43	1.41
		cola	1.000	1.000	876	476	7.15	7.14	958	949	0.96	1.62
		vaso	0.190	0.300	2 073	2 570	8.12	8.19	1 084	1 093	2.16	1.86
	6	cauce	2.000	2.000	1 064	532	7.13	6.39	967	1 012	1.89	1.42
		ladera	0.500	1.000	917	784	7.08	6.98	981	968	1.47	1.58
		cola	0.500	1.000	726	840	7.18	7.62	1 004	1 078	0.93	2.17
		vaso	0.500	0.250	2 748	2 576	9.07	9.18	1 185	1 225	3.41	3.46

La degradación específica en la cuenca del río Mendoza

Los ríos de la cuenca del *Mendoza*, poseen un régimen fluvial simple de alimentación sólida. Los tributarios, presentan distintos subtipos de regimenes, por ejemplo: al *Vacas* y *Cuevas* le corresponde el subtipo nivo-glaciario que presenta una secuencia de caudales mensuales máximos en diciembre, enero, febrero y noviembre; en el *Tupungato* la secuencia de caudales máximos decrecientes es enero, febrero y diciembre, que se clasifica como subtipo glaciario clásico; esta cuenca presenta la mayor superficie englazada. En consecuencia, el régimen del *Mendoza* que resulta de la combinación de los regímenes de los tributarios muestra una secuencia de caudales mensuales máximos decrecientes en enero, diciembre y febrero, denominándose glaciario mitigado con la salvedad que los caudales de diciembre y febrero son muy parecidos y a veces se alternan en función de la longitud de las series analizadas.

El río *Mendoza*, en *Guido* presenta un caudal anual medio de $44,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, con medias anuales máximas de $100,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en verano, frente a $21,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en invierno. Su cuenca, posee un 3,7 % de su superficie con hielo descubierto (glaciares y cuerpos de hielos mayor de $0,02 \text{ km}^2$) y un 4,16 % con hielo cubierto (cuerpos de hielo cubiertos por detritos). Por el río *Tupungato* circula un con un caudal medio anual de $22,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ presenta 170 km^2 de hielo descubierto, mientras que $158,5 \text{ km}^2$ son superficies con hielo cubierto, lo que determina que un 16,56 % del área englazada, localizada principalmente en la zona del *Plomo*. La cuenca del *Vacas*, presenta el más alto porcentaje de hielo descubierto de las cuencas en estudio (8,65 %). Esto se debe a que se alimenta de glaciares ubicados en la ladera sur de las montañas, por lo que no sufren fuertes descongelamientos interanuales y además, presenta el menor porcentaje de hielo cubierto, con solo un 3,83 %. Sus caudales, posee un valor medio anual de $4,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, con elevada irregularidad estacional. La cuenca del *Cuevas*, a diferencia del río *Vacas*, esta sometido a una mayor insolación, lo que ha determinado que presente un muy bajo porcentaje de hielo descubierto, con 2,99 %, frente a un elevado valor de hielo cubierto que llega al 7,38% de la superficie total de la cuenca; su valor medio anual es de $6,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Corte y Espizua, 1981).

Para cada estación de aforos se han determinado los valores promedio, extremos y algunos estadísticos, para el caudal anual, máximo, mínimo (ver **Tabla 7**) (Vich *et al*, 2005).

Las curvas de transporte para material en suspensión en función del caudal medio diario, ajuste de tipo potencial, habitual en este tipo de relaciones presentaron con muy buenos coeficientes de determinación. Ellas son:



$$\text{Vacas:} \quad Q_s = 0.50216 \quad Q_d^{1.46624} \quad [21]$$

$$\text{Cuevas:} \quad Q_s = 0.527452 \quad Q_d^{1.67190} \quad [22]$$

$$\text{Tupungato:} \quad Q_s = 0.29977 \quad Q_d^{1.50894} \quad [23]$$

$$\text{Mendoza:} \quad Q_s = 0.15353 \quad Q_d^{1.78344} \quad [24]$$

Donde: Q_s , caudal sólido en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Q_d caudal medio diario en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Posteriormente se calculan los valores de caudal sólido diario para toda la serie y los correspondientes acumulados mensual y anual; luego se realizó la determinación la degradación específica anual de cada cuenca. La **Tabla 8**, presenta los valores anuales promedio de producción de sedimentos, degradación específica y la superficie relativa englazada en cada cuenca.

La cuenca del *Tupungato*, presenta la mayor degradación específica, como así también, los mayores porcentajes de superficie cubierta por hielo. El millón y medio de toneladas de materiales que salen por dicha cuenca cada año, representan más del 40 % de los sedimentos transportados en suspensión, que circulan por la estación Guido. Por otro lado, la degradación específica en la cuenca del río *Cuevas* duplica a la de la cuenca del río *Vacas*. En general, para condiciones climáticas y fisiográficas similares, como es el caso de las cuencas de los ríos *Tupungato*, *Cuevas* y *Vacas*, las cuencas con mayor área englazada producen más sedimentos.

Las cuencas de los ríos *Vacas*, *Cuevas* y *Tupungato*, conforman la cuenca alta del río *Mendoza*, para poder compararlas, con sólo 3050 km^2 de superficie genera, en promedio, 1.888.496 toneladas de sedimentos por año. Por otro lado, la cuenca del *Mendoza* entre *Punta de Vacas* y *Guido* posee una superficie de 5130 km^2 y por su punto de cierre pasan 3.557.802,78 toneladas por año, dentro de las cuales se incluyen las producidas por la cuenca alta. La diferencia entre ambas, corresponde a la cuenca media del *Mendoza*, con una degradación media de $402 \text{ tn}\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$. En esta zona, poseen mayor importancia relativa las lluvias estivales, que precipitan sobre un relieve muy abrupto con fuerte presión antrópica. En la cuenca alta, presenta abundantes precipitaciones sólidas de carácter invernal.

Tabla 7. - Caudales mensuales, en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Principales características estadísticas

	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Río: Vacas				Estación: Punta de Vacas				Periodo:1949-50 al 2001-02				
N	49	50	51	51	49	50	51	51	51	51	51	49
Med.	1.99	2.15	2.43	3.80	6.39	8.48	7.98	6.69	4.88	3.09	2.42	2.09
s	0.90	1.04	0.93	1.89	5.13	6.91	4.68	3.18	1.83	1.08	0.84	0.90
CV	45.21	48.46	38.42	49.76	80.28	81.49	58.62	47.52	37.42	34.84	34.78	43.20
max.	6.25	8.13	6.97	8.66	36.51	29.62	27.30	20.58	11.07	7.62	5.09	6.43
min.	0.80	1.07	1.41	1.40	1.75	2.14	2.76	2.82	2.49	1.87	1.34	1.24
Río: Cuevas				Estación: Punta de Vacas				Periodo:1955-56 al 2001-02				
N	45	46	47	47	46	47	47	47	47	47	47	45
Med.	3.22	3.20	3.57	5.22	8.74	13.59	13.15	10.01	7.24	4.93	4.04	3.47

s	0.81	0.75	0.71	1.81	3.56	9.06	8.98	6.02	3.89	1.87	1.31	1.03
CV	25.31	23.39	19.86	34.70	40.72	66.65	68.33	60.16	53.79	37.88	32.51	29.68
max.	5.16	4.70	5.31	10.11	16.43	49.55	50.04	34.84	19.77	10.88	7.20	5.60
min.	1.77	1.73	2.11	2.14	2.75	2.83	3.85	4.06	2.92	2.13	1.85	1.61
Río: Tupungato			Estación: Punta de Vacas					Periodo:1949-50 al 2001-02				
N	48	48	49	50	49	51	50	49	50	50	50	49
Med.	8.56	8.50	9.29	12.42	21.96	42.74	56.89	46.86	30.53	16.34	11.68	9.58
s	2.55	2.74	2.66	3.87	8.95	18.34	25.23	19.26	11.11	5.21	2.81	2.59
CV	29.75	32.21	28.61	31.12	40.76	42.90	44.35	41.11	36.39	31.91	24.08	27.00
max.	18.37	21.83	20.82	24.34	62.79	92.11	152.4	127.5	62.39	36.66	20.43	20.53
min.	5.37	5.33	5.06	5.24	8.85	14.48	20.90	24.89	16.82	10.06	7.99	5.98
Río: Mendoza			Estación: Guido					Periodo:1956-57 al 2001-02				
N	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
Med.	20.41	20.18	21.75	28.08	46.48	84.04	99.65	80.72	54.17	33.81	26.66	22.66
s	5.82	5.34	5.49	9.13	20.70	45.49	45.69	31.02	18.87	11.13	8.18	6.70
CV	28.53	26.45	25.24	32.50	44.54	54.13	45.86	38.43	34.83	32.91	30.68	29.58
max.	36.23	35.45	35.49	51.93	139.9	225.8	265.9	198.3	105.7	68.46	46.77	43.04
min.	11.89	11.47	13.44	13.37	19.38	23.29	34.55	37.23	27.16	17.90	15.45	12.71

Tabla 8. - Sedimentos en suspensión, degradación específica y porcentaje de superficie con hielo, por cuenca.

cuenca	Sedimentos [tn.año ⁻¹]	Degradación específica [tn.año ⁻¹ .km ⁻²]	Hielo descubierto [%]	Hielo cubierto [%]
Cuevas	217.117	319,29	2,99	7,38
Vacas	176.266	143,86	8,65	3,83
Tupungato	1.495.112	830,62	8,58	7,98
SUBTOTAL	1.888.496			
Guido	3.557.802	434,94	3,70	4,16

Ajuste y validación de los distintos modelos

Ajuste y validación de la USLE

El ajuste de la USLE original y propuestas, se realizó por optimización, con datos individuales y anuales. Se observa un mejor comportamiento de los modelos con datos anuales. Se emplearon únicamente los datos de pérdidas de suelo que poseían registro de escurrimiento, al solo efecto de poder comparar los distintos modelos. Por definición, el factor **K** se calcula sobre la base de partículas de suelo menores de 2.0 mm; por lo tanto, se ignora la influencia del contenido de fragmentos gruesos, ya que el contenido de fragmentos gruesos en superficie o en el perfil del suelo posee una gran variabilidad, sobre todo en suelos de origen aluvial. Es mas adecuado analizar su efecto como un elemento protector del suelo, como un subfactor integrado en el factor **C**; este no difiere substancialmente de un modelo a otro para una parcela específica. El subfactor cobertura de gravas, **C_f** presenta valores similares para los tres modelos en las distintas parcelas, excepto en las mas cortas. Es importante destacar la influencia de la acción del escurrimiento en el factor de erosividad modificado, donde el coeficiente α es cercano a 0.5, excepto en las mas cortas. También se pone de manifiesto en los valores que toma el exponente β , mostrando valores próximos entre sí para las parcelas de 4 y 8 m. y considerablemente mas bajos en las parcelas cortas. Las diferencias se pueden explicar a partir de que en parcelas pequeñas, las variaciones del

microrelieve poseen gran influencia sobre el escurrimiento superficial y en consecuencia en los subprocesos de disgregación y transporte.

Se realizó un análisis de sensibilidad con el objeto de verificar la bondad de los modelos y analizar el comportamiento de K , C_f , α y β . Los parámetros fueron sistemáticamente variados y el cambio en el ECR entre observado y simulado fue analizado. De este análisis, se desprende que los parámetros de las ecuaciones poseen un amplio rango de variación para un valor similar de error. La selección definitiva se realizó sobre la base de adoptar los parámetros que mejor estiman la media del total de datos. Los valores de los parámetros se muestran en la **Tabla 9**. La recta de regresión entre las pérdidas de suelo observadas y calculadas, para los registros no usados en el ajuste, poseen coeficientes de correlación de 0.74, 0.78 y 0.82 para cada modelo. El *modelo 1* y *2* subestiman casi siempre y el *modelo 3*, sobrestima para valores de $PS < 1100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y solamente en un 30 % de los casos existe una estimación razonable de pérdidas de suelo de eventos individuales. La aplicabilidad de la USLE.

Las modificaciones propuestas para predecir pérdidas de suelo de eventos individuales, no es satisfactoria. La mayor parte de las predicciones muestra un carácter aleatorio, ya que las variaciones en las pérdidas de suelo no se explican totalmente en función de la variación en las características de precipitación y escurrimiento (Vich *et al* 1998)

Tabla 9. - Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE). Parámetros de la ecuación original y modelos propuestos

Parámetros	Parcelas						
	LV-2	LV-4	LV-8	LP-2	LP-4	LP-8	total
No observaciones	23	22	25	22	23	22	137
PS media [$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$]	1722.6	1724.5	2285.3	1313.2	1455.5	1999.2	1759.4
R [$\text{kgm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$]	13.3	12.5	12.9	13.1	10.9	13.4	12.7
Q [mm]	10.3	7.3	6.2	6.8	4.9	5.6	6.9
Modelo 1:							
K	0.36	0.27	0.33	0.28	0.36	0.28	0.33
C_f	0.07	0.05	0.03	0.07	0.04	0.03	0.03
ECR [%]	50.80	36.50	28.90	48.70	46.40	70.50	48.10
Modelo 2:							
K	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.27	0.33
C_f	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
α	0.72	0.41	0.42	0.57	0.67	0.16	0.42
ECR [%]	56.40	37.60	31.70	53.50	55.30	58.40	47.60
Modelo 3:							
K	0.36	0.33	0.33	0.35	0.27	0.28	0.27
C_f	0.15	0.04	0.03	0.14	0.05	0.04	0.05
β	0.28	0.43	0.48	0.24	0.44	0.43	0.44
ECR [%]	47.30	34.70	28.70	43.70	47.50	56.60	43.10

Modelos de erosión: MBAPS, ANSWERS y CREAMS

Se efectuó una calibración preliminar por optimización de distintas funciones objetivos, para la componente de escorrentía y únicamente en la parcela con suelo desnudo para la componente erosión. Luego el modelo fue validado con los parámetros óptimos obtenidos

en el paso anterior, para todos los eventos, calculándose la eficiencia **E** y el error cuadrático medio **RMSE**.

Los valores de escurrimiento y pérdida de suelo, presentan una gran variabilidad. El aumento de vegetación juega un papel muy importante en la disminución de la escorrentía, pero cuando esta pasa del 42 al 60% la diferencia no es tan apreciable, aunque en lluvias poco intensas, dicha diferencia es notable.

En general, los valores de los parámetros ajustados en el modelo **MBAPS**, se encuentran dentro de un orden razonable; el modelo es muy sensible al contenido inicial de humedad en el suelo. La respuesta del modelo frente a cambios en la cobertura resultó coherente con su hipótesis, que un aumento en la cubierta vegetal, debería producir un menor escurrimiento y por extensión, una menor erosión. El modelo presentó **E** y **RMSE** aceptables. La **Tabla 10** muestra los valores observados y simulados de escurrimiento en las distintas parcelas para cada uno de los eventos analizados; además, se muestran las pérdidas de suelo observadas y simuladas en la parcela con suelo desnudo.

Tabla 10. - Volumen de escurrimiento y pérdidas de suelos observados y calculados. Aplicación del *Modelo del Balance de Aguas y Producción de Sedimentos (MBAPS)*

Fecha evento	CAP1				CAP2		CAP3	
	Q [litro]		PS [gr]		Q [litro]		Q [litro]	
	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.	Obs.	Cal.
15-03-92	139	428	6232	7236	247	241	93	326
07-01-93	309	309	2235	4206	188	142	235	199
05-02-93	194	127	1342	1358	94	40	140	85
04-03-93	338	355	3127	3215	166	147	245	206
05-03-93	355	302	1305	2282	162	62	284	111
19-04-93	57	101	211	1019	8	0	62	21
05-11-93	95	97	567	796	28	0	78	23
25-02-94	723	208	1778	2755	238	51	243	97
20-01-95	1110	988	13308	19858	523	771	787	852
03-03-97	1077	987	3252	13150	830	687	747	807
Media	440	390	3336	5587	248	214	291	273
B		120		2252		84		90
E		0.63		0.63		0.82		0.85
RMSE		195		3852		115		111

Los resultados del modelo ANSWERS (Braud *et al*, 2000) de la simulación del volumen de sedimentos fueron aceptables, con eficiencias altas; presentó regulares resultados en las cuencas pequeñas. El modelo es coherente con la intuición de que la cuenca que tiene la mayor pendiente y menor cobertura, debería producir el mayor escurrimiento. Variando el porcentaje de cobertura, se comprobó que el modelo era sensible a este parámetro, obteniéndose los mejores resultados con la cobertura medida. La **Tabla 11** muestra los estadísticos calculados referentes a escurrimiento y pérdidas de suelo. Los valores promedio de pérdidas de suelo, para las muestras de validación son: 1451.7, 9379.1 y 187.6 kg ha⁻¹, para las parcelas **CAP1**, **CAP2** y **CAP3** respectivamente. La desviación estándar es: 2286.1, 572.1 y 314.0 kg.ha⁻¹, respectivamente. El modelo ha presentado resultados poco satisfactorios en las tres cuencas pequeñas. Por lo tanto, se necesita un número mayor de eventos importantes, para tener estadísticos más confiables para juzgar la bondad del modelo, de manera mas completa. Los valores promedio de la lámina de

escurrimiento en las distintas cuencas, para las muestras de validación son 0.46 y 0.30 mm para *Jarillal* y *Garabato*, respectivamente. La desviación estándar es: 0.59 y 0.39 mm, respectivamente.

Tabla 11. - Eficiencia y Error cuadrático promedio calculados para el escurrimiento y pérdidas de suelo

unidad	Q (mm)		PS (kg ha ⁻¹)	
	E	RMSE	E	RMSE
CAP 1	0.87	3.74	0.87	793.4
CAP 2	0.87	3.51	0.79	250.1
CAP 3	0.59	3.2	0.81	129.4

La aplicación del modelo **CREAMS**, muestra que la regresión entre los valores observados y calculados revela que el modelo simula mejor el escurrimiento que la pérdida de suelo, con una tendencia a subestimar en eventos importantes. También, muestra que un aumento en la conductividad hidráulica produce una disminución en los escurrimientos, siendo la pérdida de suelo poco sensible a este cambio. La **Tabla 12** muestra los valores de escurrimiento y pérdida de suelo, medidos en las parcelas de erosión y los calculados a partir del modelo (Mariani *et al* 2000).

Tabla 12. - Aplicación del modelo CREAMS, versión WEPP 97.1

parcela	fecha	lluvia [mm]	escurrimiento [mm]		pérdida suelo [kg.m ²]	
			obs	calc	obs	calc.
CAP 1	15-03-92	20.0	4.63	4.54	0.207	0.275
	07-01-93	21.0	10.30	10.54	0.070	0.067
	04-03-93	28.0	11.27	9.00	0.104	0.101
	25-02-94	28.0	23.40	18.11	0.590	0.514
	20-01-95	40.0	36.98	30.18	0.795	0.255
	03-01-96	26.0	22.05	16.22	0.570	0.409
LV-8	02-03-97	59.0	22.05	32.07	0.108	0.156
	15-03-92	20.0	4.75	4.15	0.232	0.253
	07-01-93	21.0	7.00	7.50	0.099	0.077
	04-03-93	28.0	5.37	5.31	0.015	0.016
LP-8	20-01-95	40.0	27.60	25.90	1.650	0.309
	15-03-92	20.0	2.00	2.09	0.025	0.022
	07-01-93	21.0	2.75	2.84	0.048	0.042
	04-03-93	28.0	2.50	2.37	0.017	0.019
	20-01-95	40.0	22.25	23.82	1.180	0.300

En síntesis, el desarrollo de un modelo de erosión como el MBAPS y su ajuste en zonas áridas, constituye una experiencia inédita a nivel país. No solo por el hecho de disponer de una herramienta propia, sino que en su construcción, se logra sintetizar, integrar y comprender un proceso complejo, como el de erosión hídrica. Los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos a parcelas, en una primera etapa, es satisfactoria, con coeficientes de eficiencia aceptables. La aplicación de modelos de simulación de erosión como el ANSWERS o CREAMS, aún se encuentra en etapa de ajuste. Su aplicación en zonas áridas y semiáridas de relieve acentuado constituye una experiencia inédita a nivel país, y solamente se han realizado con algunas aplicaciones preliminares en la región pampeana. El principal inconveniente al utilizar este tipo de modelos radica en la falta de información básica, esencial para que el modelo simule adecuadamente un proceso complejo como es el de la erosión hídrica. El estudio que aquí se ha realizado es un primer

paso en el uso de una herramienta tecnológica considerada por los especialistas como de avanzada. Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede decir que la aplicación de los modelos en parcelas de erosión es promisoría. Las regresiones entre los valores observados y simulados de escurrimiento superficial y pérdida de suelo son alentadoras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el período 1982-95 ocurrieron 36 episodios lluviosos que generaron escurrimiento y en consecuencia, erosión hídrica. Las lluvias consideradas erosivas, únicamente se presentaron en el período octubre-abril, estas poseen un umbral de intensidad máxima en 30 minutos de 15.0 mm.h^{-1} . De los 36 eventos, el 28 % posee un monto de lluvia mayor de 30 mm y el 56 % de los eventos posee un rango de intensidad máxima en 30 minutos entre 15.0 y 30.0 mm.h^{-1} .

Los períodos 1985-86, 1986-87 y 1988-89 fueron años secos. Los períodos 1983-84 y 1989-90 son los años más ricos, con un elevado número de días con lluvias erosivas. El período 1984-85 fue ligeramente húmedo, pero sin ocurrir ninguna precipitación de gran intensidad. El 34 % de las pérdidas de suelo **PS** corresponden a $\text{PS} < 1000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$; el 27 % es $1000.0 < \text{PS} < 2000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$; y el 39 % es mayor de $2000.0 \text{ kg.ha}^{-1}$ por evento.

La medición de los sedimentos depositados en las trampas de agua se efectuó durante Septiembre y Noviembre de 1995 y 1997, encontrándose en algunos casos depósitos de sedimentos de hasta 30 cm de espesor. El volumen de sedimentos depositados en cada trampa, durante el período 1993-95, fue del orden de 1.0 a 7.0 m^3 y en el período 1995-97, fue entre 0.14 y 9.58 m^3 . Es importante destacar, que durante la construcción de las obras, gran cantidad de suelo es removido y eliminado parcialmente la cobertura vegetal. Además, estas obras fueron terminadas durante la temporada estival, que representa el periodo lluvioso de la región. En estas condiciones, las precipitaciones producen un volumen considerable de sedimentos, que a medida que los sitios perturbados se estabilicen gradualmente y la vegetación natural se recupera, las tasas de erosión disminuyen. Se ha podido observar que la vegetación en todos los sitios se ha recuperado considerablemente, ya que en todos los casos, excepto en una, la acumulación del sedimento en el primer período (1993-95) superó al segundo período (1995-97). Las diferencias de cobertura y su recuperación, podrían llegar a explicar la variabilidad en las observaciones y disminución de la degradación

El índice **EI30** (factor **R**) no es suficiente para explicar las variaciones en las pérdidas de suelo de eventos individuales que se producen en el área pedemontana. Dichas variaciones se explican ligeramente mejor al reemplazar el factor de erosividad por el producto **QI30**. La ecuación adoptada para el cálculo del factor **R**, arrojó excelentes resultados. Por otra parte, los valores de escurrimientos generalmente no se encuentran disponible, por lo que es necesario recurrir a otros modelos de simulación para su estimación. Por definición, el factor **K** se calcula sobre la base de partículas de suelo menores de 2.0 mm ; por lo tanto, ignora la influencia del contenido de fragmentos gruesos. Es mas adecuado analizar su efecto como un elemento protector del suelo, como un subfactor integrado en el factor **C**. El contenido de fragmentos gruesos en superficie o en el perfil del suelo, posee una gran variabilidad, sobre todo en suelos de origen aluvial.

Las cuencas de los ríos *Vacas*, *Cuevas* y *Tupungato*, conforman la cuenca alta del río *Mendoza*, para poder compararlas, con sólo 3050 km² de superficie genera, en promedio, 1.888.496 toneladas de sedimentos por año, siendo la cuenca del *Tupungato* la que presenta mayor degradación específica. Por otro lado, la cuenca del *Mendoza* entre *Punta de Vacas* y *Guido* posee una superficie de 5130 km² con una degradación media de 402 tn.año⁻¹.km⁻². En esta zona, poseen mayor importancia relativa la lluvias estivales, que precipitan sobre un relieve muy abrupto con fuerte presión antrópica. En la cuenca alta, presenta abundantes precipitaciones sólidas de carácter invernal.

La aplicabilidad de la USLE o las modificaciones propuestas para predecir pérdidas de suelo de eventos individuales, no es satisfactoria. La mayor parte de las predicciones muestra un carácter aleatorio, ya que las variaciones en las pérdidas de suelo no se explican totalmente en función de la variación en las características de precipitación y escurrimiento.

El desarrollo de un modelo de erosión y su ajuste en zonas áridas, constituye una experiencia inédita a nivel país. No solo por el hecho de disponer de una herramienta propia, sino que en su construcción, se logra sintetizar, integrar y comprender un proceso complejo, como el de erosión hídrica. Los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos a parcelas, en una primera etapa, son satisfactorios, con coeficientes de eficiencia aceptables.

La aplicación de modelos de simulación de erosión como el ANSWERS o CREAMS, aún se encuentra en etapa de ajuste. Su aplicación en zonas áridas y semiáridas de relieve acentuado constituye una experiencia inédita a nivel país. Sobre la base de los resultados obtenidos, se puede decir que la aplicación de los modelos en parcelas de erosión es promisoria. Las regresiones entre los valores observados y simulados de escurrimiento superficial y pérdida de suelo son alentadoras.

En general, para juzgar completamente los modelos, se necesitaría completar las observaciones con eventos de altos valores de escurrimiento. En su aplicación en cuencas, se necesitarían medidas de la variabilidad espacial de la lluvia a pequeña escala, ya que se comprobó que ella tiene un importante impacto sobre los resultados de los modelos, y este fenómeno podría explicar algunas deficiencias.

Agradecimientos. El presente trabajo se desarrolló en el marco de los proyectos: PIP No. 2886 “Análisis y calibración de modelos en procesos hidrológicos: infiltración y erosión hídrica” y PICT No. 14513 “Amenazas naturales de origen hídrico en el centro oeste de Argentina, Caso de Estudio: Gran Mendoza, ciudad de San Juan y sus alrededores”, financiados por el CONICET y la ANPCyT, respectivamente..

LISTA DE SÍMBOLOS

- α : coeficiente que representa la importancia relativa de la energía de la precipitación.
- β : exponente.
- τ : esfuerzo de corte en el fondo del surco.
- γ : peso específico del líquido
- θ : inclinación de la pendiente.



- ρ_w : densidad del líquido.
- ϕ_m : diámetro mediano.
- A(t)**: lámina acumulada almacenada en el microrelieve superficial al tiempo t .
- DPF**: dirección principal de flujo de la celda.
- C**: factor de cobertura.
- C_f**: subfactor de cobertura por fragmentos de rocas o clastos.
- C_r**: factor que combina el efecto protector de la vegetación, mantillo y residuos orgánicos incorporados al suelo.
- C_m**: factor que atenúa el proceso de disgregación debido a la presencia de mantillo en la superficie o materia orgánica incorporada al suelo.
- C_n**: factor de cobertura, equivalente al factor **C** de la **USLE**.
- d**: diámetro de la partícula.
- D**: lámina máxima de almacenamiento en micodepresiones.
- E**: coeficiente de eficiencia.
- E_r**: tasa de disgregación total.
- e₂**: exponente.
- ex**: exponente que depende del contenido de arcilla presente en el suelo.
- F**: velocidad de infiltración.
- F(t)**: infiltración acumulada al tiempo t .
- F_p**: infiltración acumulada con superficie encharcada.
- F_u**: infiltración acumulada sin encharcamiento.
- f_p**: velocidad de infiltración con superficie encharcada
- h**: tirante medio en la celda.
- HS**: humedad a saturación natural.
- HI**: contenido inicial de humedad de suelo.
- I**: intensidad de la lluvia.
- I_e**: intensidad de la precipitación efectiva.
- K**: factor de erodabilidad de suelos.
- K_f**: factor de erodabilidad de suelo por acción del escurrimiento, que puede ser aproximado por el factor **K** de la **USLE**
- K_h**: factor de corrección por profundidad de la lámina de escurrimiento.
- K_r**: factor de erodabilidad de suelos, equivalente al factor **K** de **USLE**.
- K_s**: conductividad hidráulica saturada.
- LS**: factor topográfico.
- MO**: contenido de materia orgánica.
- N**: contenido de nitrógeno.
- n**: coeficiente de rugosidad de Manning.
- P**: contenido de fósforo.
- P**: factor prácticas de cultivo



- PCV:** porcentaje de cobertura vegetal.
- PS:** pérdida de suelo en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, si se trata de un evento $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.
- P(t):** precipitación acumulada al tiempo t .
- Qd:** caudal medio diario, en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.
- Qs:** caudal sólido en suspensión, en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- QI30:** producto del volumen de escurrimiento y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos.
- R:** factor de erosividad de lluvia.
- r:** tasa de escurrimiento.
- RMSE:** error cuadrático medio.
- R(t):** escurrimiento acumulado al tiempo t .
- S:** tensión de succión en el frente de humedecimiento.
- Sg:** densidad específica.
- S_o:** pendiente de la **DPF** de la celda.
- t:** tiempo medido desde el inicio de la lluvia.
- TFA:** capacidad de transporte adimensional.
- TF(t):** capacidad de transporte o arrastre del flujo en la celda a un tiempo t de iniciada la lluvia; **G(t)** descarga sólida de la celda al tiempo t .
- t_p:** tiempo de inicio del encharcamiento.
- TRAN:** proporción de descarga de las celdas adyacentes, la suma de las fracciones de las 4 celdas adyacentes es 1.0.
- V*:** velocidad de corte.
- w:** ancho de la celda modificada
- W_g:** tasa de disgregación por impacto de la gota de lluvia.
- W_f:** tasa de disgregación por flujo superficial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, C.V.; Neibling, W.R. y Foster, C.R.** (1981). "Estimating sediment transport capacity in watershed modeling". *Transaction. of the ASAE*, Vol. 24, N° 5, pp. 1211-1220.
- Beasley, D.B., Huggins, F. Y Monke, E.J.** (1980). "ANSWERS: a model for watershed planning". *Transaction. of the ASAE*, Vol. 23, N° 4, pp. 938-944.
- Bouraoui, F. and Dillaha, T.A.** (1996). "ANSWERS 2000: runoff and sediment transport model", *J. Environ. Enginee.*, Vol. 122, pp. 493-502.
- Bras, R.L.** (1990). *Hydrology: an introduction to hydrological sciences*. Addison-Westley Publishing Company, Addison-Westley series in Civil engineering."
- Braud, Isabelle; Vich, Alberto I.J.; Pedrani, Armando.** (2000) Observación y Modelización de la Erosión en una Cuenca del Piedemonte Mendocino". *XVIII Congreso Nacional del Agua*. Rio Hondo, Santiago del Estero.

- Braud, I; A.I.J. Vich, J. Zuluaga, L. Fornero, A. Pedrani.** (2001) "Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modeling". *Journal of Hydrology* 254(2001): 124-144.
- Chena, O.** (1971). *Estudio integral de Defensa Aluvional del Papagayos. Informe al gobierno argentino sobre la contención de aluviones.* FAO - SRH - Gob. de la provincia de Mendoza.
- Chu, T.S.** (1978) "Infiltration during an unsteady rain". *Water Resources Res.* Vol. 14, N° 4, pp. 451-466.
- Compagnucci, R. y Boninsegna, J.** (1979). *Informe de las primeras experiencias de ajuste de defensas, Temporada granicera 1978-79.* Programa Nacional de lucha antigranizo. CNIE. pp. 19-39.
- Corte, A.y Espizua, L.;** *Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza.* CONICET, IANIGLA, 1981.
- Davis, S.S.** (1978). *Deposition of nonuniform sediment by overland flow on concave slope.* Tesis de Maestría en Ciencias. Purdue University. West Lafayette, Indiana.
- EVARSA.** (1997). *Estadística Hidrológica 1997.* Subsecretaría de Recursos Hídricos. Argentina.
- Foster, G.R. y Meyer, L.D.** (1972). "Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. An erosion equation derived from basic principles". *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources,* USDA-ARS-S-40, pp. 190-206.
- Green, W.H. and Ampt, G.A.** (1911). "Studies on soil physics". *J. Agric. Sci.,* Vol. 4, pp. 1-24.
- Junes, D.A.** (1985). *Modelo de simulación para la predicción de escurrimientos superficiales.* Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico.
- Knisel, W.G.** (1980) *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems.* USDA-SEA Conservation Research Paper No 26. p. 378
- Mariani, Adriana.** (1998). *La erosión hídrica y medidas de control en el piedemonte mendocino.* Tesis. INTA. UNCu. INA. Mendoza.
- Mariani, Adriana; Vich, Alberto I.J.; Nave, Marcela.** (2000). "Primeras Estimaciones de Erosión Hídrica a Partir del Empleo del Modelo WEPP". *XVIII Congreso Nacional del Agua.* Rio Hondo, Santiago del Estero.

McCormack, D.; Young, K. y Darby, G. (1984). "Rock fragments and the K factor of the USLE". *Erosion and productivity of soils containing rock fragments*. SSSA Special Publications N° 13:73-81.

Mein, R.G. y Larson, C.L. (1971) *Modeling of the infiltration component of the rainfall runoff process*. Bull N°43, Water Resources Research Center, Mineapolis.

Mein, R.G. y Larson, C.L. (1973). "Modeling infiltration during steady rain". *Water Resources Res.* Vol. 9, N° 2, pp. 1284-1288.

Nearing, M.A.; Foster, G.R.; Lane, L.J.; Finkner, S.C. (1989). "A process-based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project technology". *Transaction of the ASAE* 32, p. 1587-1593.

Park, S.W.; Mitchell, J.K. y Bubenzer, G.D. (1982). "Splash erosion modeling: physical analyses". *Transaction. of the ASAE*, Vol. 25, N° 2, pp. 357-361.

Richie, J.T. (1972). "A model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover". *Water Resour. Res.*, Vol. 8, N° 5, pp.1204-1213.

Ribeiro Salles, J (1983). *Desarrollo de un sistema gráfico-computacional interactivo para el análisis topográfico del drenaje superficial*. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgradudao, Chapingo, Mexico.

Romkens, M. (1985). "The soil erodibility factor: A perspective". *Soil Erosion and Conservation*. SCSA. pp 445-461.

Simanton, J.; Rawitz, E. y Shirley, E. (1984). "Effects of rock fragments on erosion of semiarid rangeland soils". *Erosion and productivity of soils containing rock fragments*. SSSA Special Publications N° 13:65-72.

Vich, A. (1985). *Modelo de simulación del balance de aguas y producción de sedimentos a nivel de parcela*. Tesis. Colegio de Postgraduados. México.

Vich, A. (1988). "Modelo de simulación del balance de agua y producción de sedimentos en una cuenca". *Hydrological aspects of Mendoza, Argentine. Satellite images and numerical modeling*. 1988, pp 69-101. Publicación Especial del Institute for Land and Water Management Research. Wageningen, Holanda.

Vich, Alberto I.J.; Mariani, Adriana; Pedrani, Armando. (1998). "Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado". *XVII Congreso Nacional del Agua. II Simposio de los Recursos Hídricos del Conosur*. Santa Fe. 1998

Vich, Alberto I. J. (2000). "Desarrollo de un Modelo de Simulación de la Producción de Sedimentos en Cuencas". *XVIII Congreso Nacional del Agua*. Rio Hondo, Santiago del Estero.



Vich, A.; Braud, I; Mariani, A. (2002). “Estudios de erosión en ambientes áridos de relieve acentuado. Ajuste y desarrollo de métodos de predicción”. *XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn.

Vich, Alberto; Lopez, Patricia y Villega, Laura. (2005). “Detección de tendencias en el regimen hídrico de los principales ríos de la provincia de Mendoza”. *XXI Congreso Nacional del Agua*. Mendoza.

Wischmeier, W. y Mannering, J. (1969). “Relation of soil properties to its erodibility”. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:131-137.

Wischmeier, W. y Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA - SEA. Agriculture Handbook N° 537.

Woolhiser, D. A. y Liggett, J.A. (1967). “Unsteady onedimensional flow over a plane the rising hydrograph”. *Water Resources Res*, Vol. 3, n° 3, pp. 15-17.

Yalin, Y.S. (1963) “An expression for bed-load transportation”. *J. Hydraulic Div. Proc. ASCE*. Vol. 89, n° HY3, pp. 221-250.