

Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins

Jacinto Artigas, José Luis López y José Rafael Córdova

Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
Apdo. Postal 47725, Caracas 1041-A, Venezuela. E-mail: jlartigas@imf.ing.ucv.ve,
jlopez@imf.ing.ucv.ve, jcordova@usb.ve

Abstract

The determination of the sediment yield in mountain basins is an important task in water resources management, and also in the design of hydraulic works. The estimates of sediment yield are usually obtained by considering mainly the suspended sediment, neglecting or assigning a proportion to the material that is transported as bed load. The paper's objective is the development of a methodology to estimate the total sediment yield (suspended and bed loads) in mountain streams. Watershed laminar erosion is computed by using the MUSLE model, in order to estimate suspended sediment load. Bed load is calculated by applying the equations of Schoklitsh and Meyer-Peter/Müller. These models are applied using extraordinary events hydrographs, associated with storms of 10, 25, 50 100 and 500 years of return period, in order to obtain a functional relationship between the sediment yield due to laminar erosion and bed load. This relationship allows the estimation of monthly and annual series of total sediment yield, by using a continuous rainfall-runoff model. The methodology is applied on several watersheds located on the Southern slope of El Ávila National Park, in Caracas, Venezuela.

Key words: Sediment yield, suspend load, bed load.

Metodología para estimar el acarreo total de sedimentos en cuencas montañosas

Resumen

La determinación de los aportes anuales de sedimentos en cuencas montañosas, es de suma importancia para el manejo de los recursos hídricos, así como para el diseño de obras hidráulicas. Los estimados de la producción de sedimentos se basan usualmente en considerar primordialmente los aportes de material fino (sedimentos suspendidos) despreciando, o asignándoles un porcentaje a los aportes de material grueso que son transportado como carga de fondo. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología para estimar la producción total de sedimentos (arrastre suspendido y arrastre de fondo) en cuencas de montaña. Se calculan por separado la erosión laminar en las laderas empleando el modelo MUSLE para el acarreo en suspensión, y las ecuaciones de Schoklitsh y Meyer-Peter/Müller para el acarreo de fondo. Se aplican estos modelos a los hidrogramas de eventos extraordinarios de 10, 25, 50 100 y 500 años de periodo de retorno, para así obtener una relación funcional entre la producción de sedimentos por erosión laminar y la producción por arrastre de fondo, que permite mediante un modelo continuo lluvia-escorrentía estimar la producción media mensual y anual de sedimentos. La metodología se ilustra con una aplicación a las cuencas de la vertiente sur del Parque Nacional El Ávila en Caracas, Venezuela.

Palabras clave: Producción de sedimentos, carga suspendida, transporte de fondo.

Introducción

Planteamiento del problema

Los sedimentos transportados por un curso de agua constituyen la erosión laminar de sus laderas y la de sus tributarios, los movimientos de masa, como también el material que la corriente levanta de su propio cauce; generalmente estos sedimentos son clasificados de acuerdo al proceso de transporte dominante, al material de origen y a sus dimensiones.

La cuantificación de sedimentos principalmente se realiza considerando la clasificación relacionada con los procesos de transporte. Los sólidos suspendidos se determinan utilizando aforadores normalizados de precisión satisfactoria para estudios hidrométricos; no obstante, existen muchas dificultades físicas para medir los sedimentos de fondo. Todo lo cual se traduce en ausencia de data y registros sistemáticos, que a su vez limita el estudio de su comportamiento y el desarrollo de modelos para estimar producción y arrastre de sedimentos de fondo. La situación descrita impone el uso de artificios; en este sentido, normalmente sólo se miden o estiman los sedimentos en suspensión y se les adjudica a los sedimentos de fondo un porcentaje de los suspendidos establecidos.

Convencionalmente, la práctica de asumir estas proporciones resulta confiable y de bajo riesgo en cuencas grandes de poca pendiente y ríos de llanura, donde generalmente los fenómenos originarios de los aportes y las fuerzas que gobiernan el transporte de los sólidos de fondo se presentan con resultados relativamente exigüos. Sin embargo, en cuencas pequeñas de elevadas pendientes o en ríos torrenciales, existen condiciones favorables para el aporte significativo de sólidos a los cursos de aguas y su posterior movimiento como sólidos de fondo; en estas circunstancias la subestimación de tales sedimentos puede ser muy arriesgada considerando el uso y manejo del recurso agua y la infraestructura asociada.

Para minimizar el riesgo de estas prácticas hay que ahondar en el conocimiento de las relaciones entre los factores involucrados en la producción y el transporte de sedimentos, así como de la proporción real entre los suspendidos y los

de fondo. Aunque la investigación en esta materia no establece aún relaciones definitivas, evidentemente, es una función entre la cuenca como productora de sedimentos y el río, como conductor de los mismos.

Objetivos

El presente trabajo versa sobre la estimación de la producción de sedimentos en las cuencas de montaña de la vertiente Sur del Cerro El Ávila desde Catuche hasta Caurimare (Figura 1 y Tabla 1.). La evaluación de las condiciones físico-naturales del ámbito y de los resultados sobre los sólidos producidos (suspendidos o de fondo) permitirán establecer: a) las relaciones existentes entre la cuenca y la producción de sedimentos totales, y finalmente, b) la correspondencia entre el arrastre de suspensión y de fondo.

Adicionalmente, las observaciones y conclusiones resultantes ofrecerán elementos sustentados que permitirán el desarrollo de un proceso metodológico para estimar la producción de sólidos en cuencas de montaña partiendo de las características de la cuenca, y las relaciones proporcionales entre los sólidos suspendidos y de fondo.

Referencias históricas

La estimación de sedimentos tiene dos enfoques metodológicos sobre los cuales se han instrumentado modelos matemáticos. Un grupo de estas metodologías de estimación son modelos determinísticos, es decir, emplean algoritmos de cálculo que dan un resultado único. Los empíricos aglutinan procesos y se estructuran sobre resultados medidos (derivados vía regresión); los físicos se basan en ecuaciones teóricas o conceptuales que representan de manera simplificada los fenómenos ocurridos.

El otro grupo de metodologías utiliza modelos estocásticos, ya que incluyen una o varias componentes probabilísticas en el algoritmo de cálculo.

Si bien como se verá más adelante, el desarrollo de las herramientas computacionales propiciaron el ensamblaje de modelos de distintas disciplinas, cuyos módulos pueden ser determinísticos empíricos, determinísticos físicos y/o modelos estocásticos, se presentan a continua-

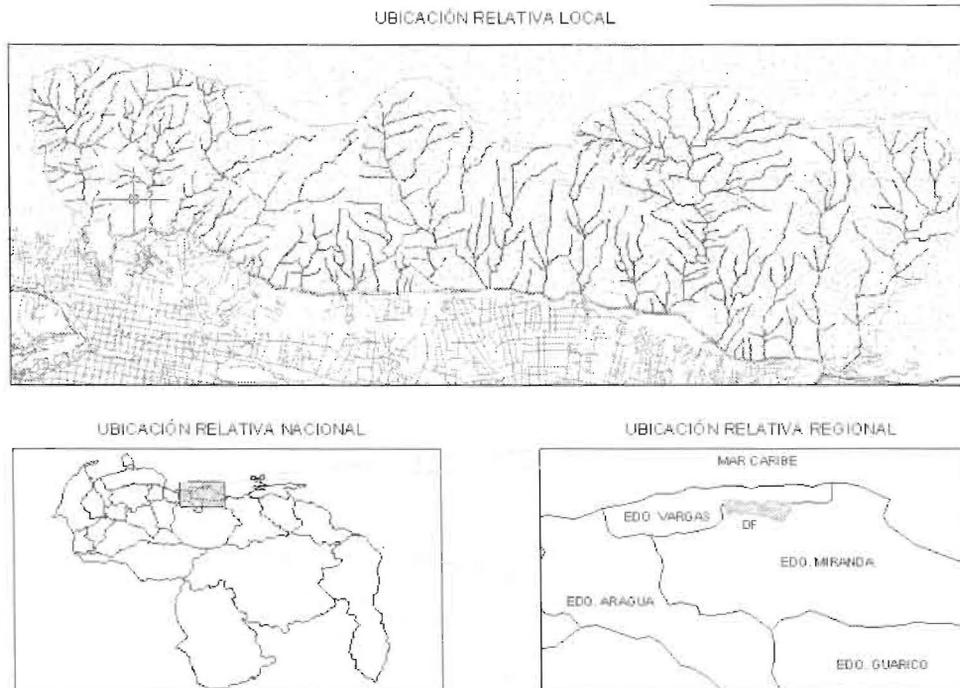


Figura 1. Mapa de ubicación de las cuencas.

Tabla 1
Características fisiográficas más importantes de las cuencas en estudio

Cuencas	Área Total (ha)	Pendiente laderas (m/m)	Pend. Canal principal (m/m)	Longitud Canal princ. (km)	Máxima Elev. en la cuenca (msnm)
Anaúco	345,3	0,574	0,294	3,73	1.943
Beatas	36,1	0,582	0,436	1,14	1.525
Camburi	207,1	0,699	0,358	3,32	2.210
Canoas	53,0	0,634	0,371	1,32	1.590
Catuche	438,3	0,568	0,171	5,43	1.912
Caurimare	665,8	0,675	0,267	6,24	2.740
Chacaíto	622,2	0,755	0,244	4,84	2.488
Chapellín-Ávila	115,3	0,677	0,264	2,61	1.980
Cotiza	370,7	0,603	0,227	3,72	1.943
Galindo	386,8	0,617	0,335	4,80	2.620
Gamboá	307,8	0,592	0,298	3,76	2.153
Guño	59,6	0,822	0,459	1,21	1.757
Maripérez	70,6	0,666	0,371	1,59	1.757
Pajarito	130,7	0,744	0,514	2,21	2.640
Pasaquire	100,9	0,733	0,383	2,27	1.940
Quintero	272,6	0,751	0,418	3,41	2.640
Sebucán	191,3	0,840	0,551	2,86	2.640
Tenerías	139,6	0,734	0,459	1,97	2.260
Tócome	945,8	0,713	0,234	5,61	2.640

ción clasificados de acuerdo al enfoque del modelo de transporte de sedimentos que lo integra.

Sedimentos en suspensión

a) Modelos determinísticos empíricos

Se basan en la reproducción de funciones de entrada, considerándose de causa y efecto. Las referencias iniciales de éstos se inician con Walter H. Wischmeier y Smith los cuales desarrollaron en 1965 [1], la expresión matemática empírica más difundida para estimar las pérdidas de suelo, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Siguió posteriormente, tal como se menciona en [2], los trabajos de Ostand y Foster (1975), Hjelmfelt et al (1975), Smith (1976), Shirley y Lane (1978), y Alonso et al (1978). En 1977, Williams y Berndt [3], dan origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE), incrementando la precisión predictiva y posibilitando su aplicación en eventos individuales. En la década de los ochenta se realizó una revisión de la USLE, la cual dio origen a la formulación de la MUSLE [2].

De esta manera los modelos desarrollados posteriormente en realidad son perfecciones del trabajo de los autores mencionados, así como su aplicación mediante lenguajes de computación, permitiendo el manejo de gran cantidad de información en cortos lapsos. Así, en 1984 Williams et al. [4] crearon el modelo EPIC "Erosion Productivity Impact calculator", luego en 1985, basado en la ecuación de la MUSLE desarrollaron el modelo SWRRB "Simulator of Water Resources in Rural Basins" [5]. El cual sería posteriormente modificado por Arnold para considerar la calidad del agua, cuyas siglas son SWRRB-WQ; luego este evolucionó en el modelo denominado SWAT al cual, se le han desarrollado interfaces para el empleo de herramientas GIS.

b) Modelos determinísticos físicos

Los esfuerzos para desarrollar aproximaciones físicas tal como se menciona en [2], originaron una relación conceptual conocida como el modelo de Meyer (Meyer y Wischmeier, 1969) y posteriormente el modelo Foster-Meyer-Onstad (FMO) (Foster et al., 1977a, b). El modelo de FMO se usó como la relación básica para el modelo CREMS (Knisel, 1980). Una modificación del FMO conocido como SLOSS, estructurado por

Wilson y sus colaboradores, lo utilizaron los mismos autores (1982, 1986) en el modelo SEDIMOT II.

De los modelos destaca el CREAMS "Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems" [7], también basado en la ecuación FMO.

En 1986, un trabajo conjunto de la Agencia Research Service, la Soil Conservation Service, Forest Service, y el Bureau of Land Management; resultó en un modelo de simulación denominado WEPP "Water Erosion Prediction Project" el cual simula la distribución espacial y temporal de la pérdida de suelo. El Departamento de Agricultura de USA (USDA) desarrolló el GLEAMS "Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems" [8], el cual simula el impacto de los cultivos sobre el medio ambiente.

c) Modelos estocásticos

Williams (1975) [9] fundamentó el desarrollo de los llamados modelos estocásticos, al obtener la distribución de probabilidades de producción de sedimentos; otra contribución fue la distribución de probabilidades de la producción anual de sedimento de Mills et al. (1981) [10].

En el ámbito venezolano, como contribuciones puntuales posteriores, Córdova, Rodríguez-Iturbe y Bravo de Guenni (1983) [11] obtienen analíticamente el primer y segundo momento de la distribución de probabilidades de la producción de sedimentos a nivel de eventos y a nivel anual, basándose en las características de las cuencas y las tormentas.

Sedimentos de fondo

La mayoría de las ecuaciones desarrolladas para el cálculo del acarreo de fondo fueron clasificadas por U.S. Geological Survey [6], en dos grupos: a) las que calculan descarga de material de fondo, y b) las que calculan el material de fondo más la fracción de material de fondo en suspensión. De este trabajo se toman las referencias cronológicas que se describen a continuación.

a) Modelos determinísticos

Las primeras referencias datan de la década de los años treinta con los trabajos de Schoklitsch (1934) y Shields (1936), tal como se reporta en [6]. El segundo autor dedujo una de las

ecuaciones más empleadas aún para predecir las condiciones críticas en las cuales ocurre el movimiento incipiente de las partículas del lecho, el diagrama de Shield, el cual permite estipular el esfuerzo cortante mínimo o crítico para que una partícula de un diámetro determinado se empiece a mover. En el año 1947, Kalinske [6] desarrolló una ecuación en función de la velocidad promedio, peso y número de las partículas. Mientras que en la misma década Meyer-Peter and Müller (1948) [6] desarrollaron una fórmula empírica para descarga de material de fondo en canales naturales.

Laureen (1958) [6], desarrolló una ecuación que se basa en relaciones empíricas que consideran la rugosidad relativa, el esfuerzo cortante crítico así como la velocidad de corte y de caída. Al año siguiente, Rottner (1959) [6] desarrolló una ecuación dimensionalmente homogénea en términos de parámetros de flujo sobre consideraciones dimensionales y coeficientes empíricos.

Colby (1964) [6] presentó un método gráfico para determinar la descarga de arena y de material de lecho. Otros importantes investigadores en esta materia son, mencionados en orden cronológico de publicación de sus trabajos: Englund and Hansen en 1967, Ackers y White en 1973, Yang, Smart y Lauggi, L.C. Van Rijn, Moore y Burch, [6].

b) Modelos estocásticos

En 1942, Einstein [6] desarrolló una relación que expresa estadísticamente el inicio y fin del movimiento de la partícula recurriendo a la teoría de probabilidad. Sobre este enfoque, Toffaleti (1968) expone un trabajo que se basa en los conceptos de Einstein modificado [6].

Cabe mencionar como parte de la investigación nacional, el trabajo realizado por López y Falcón [12], el cual versa sobre los cambios en la distribución granulométrica del lecho de cauces de montaña, basado en la ecuación modificada de Schoklitsch para cauces de pendientes altas.

Relaciones entre sedimentos suspendidos y sedimentos de fondo

Como se hace referencia en [13], la idea de asumir los sólidos de fondo como porcentajes muy definidos de los determinados en suspensión, son el resultado de experiencias sucesivas,

entre sus pioneros se encuentran Hayward (1980), Lauffer y Sommer (1982) y Kjeldsen (1983). Por su parte, Strand y Pemberton (1987) presentaron un procedimiento para estimar la carga de fondo como fracción de la carga en suspensión en función de la concentración de la carga en suspensión, material del lecho y textura del material suspendido. En los trabajos recientes destacan los de Simons y Senturk [14], los cuales enfatizan las dificultades para cuantificar y predecir los arrastres suspendidos, los arrastres de fondo, y la relación existente entre ellos.

Todo el panorama expuesto ratifica que el transporte del sedimento en suspensión y del sedimento de fondo ha sido ampliamente estudiado, sin denotar aún una tendencia firme sobre alguna de las líneas propuestas. No obstante, las afirmaciones de Simons y Senturk apuntalan una vez más las razones que justifican el presente trabajo.

Metodología

El trabajo se desarrolla según la secuencia metodológica que se explica a continuación:

1. Caracterizar las cuencas en términos físico-naturales, hidrológicos e hidráulicos, mediante la interpretación de la información básica (ortofotomapas, planimetría, altimetría, registros climáticos y muestreo de campo) e información de estudios anteriores [15-17].
2. Estimar para tormentas de 10, 25, 50, 100 y 500 años de período de retorno:
 - 2.1. La producción de sedimentos por erosión laminar empleando el modelo MUSLE para las 19 cuencas.
 - 2.2. La producción de sedimentos por acarreo de fondo en el canal aplicando las ecuaciones Schoklitsch y Meyer-Peter/Müller, en seis (6) cuencas piloto.
 - 2.3. Análisis de correlación de los resultados de 2.1 y 2.2, para establecer la función de correspondencia.
3. Estimar la producción de sedimento ordinaria por acarreo de fondo en el canal de las restantes trece (13) cuencas con base a la funciones de correspondencia determinadas en 2.2.3.

Resultados

Aplicación del modelo MUSLE

Este modelo se ha instrumentado para estimar la producción de sedimentos debido a la erosión laminar, por ser uno de los modelos que se ha probado [18] y aplicado con muy buenos resultados en cuencas en Venezuela. En la Tabla 2, se presentan los resultados de producción de sedimentos.

Aplicación de los modelos Schoklitsch y Meyer-Peter/Müller

Para estimar el acarreo de sedimentos de fondo se instrumentaron las ecuaciones de Schoklitsch [19] y Meyer-Peter/Müller [20] modificadas para cauces de pendientes altas. Los resulta-

dos obtenidos se muestran en la Tabla 3, donde se presentan las cantidades totales de acarreo de sedimentos correspondiente a cada evento y a cada cuenca.

Análisis de correlación de la producción de sedimento en suspensión y de fondo

Obtenidos los resultados de las ecuaciones de Schoklitsch y Meyer-Peter/Müller, se cotejaron estos con los obtenidos con el modelo MUSLE, para así, buscar una correlación de ambos resultados, es decir, entre la producción de sedimentos en suspensión y de acarreo de fondo de las cuencas. Se estableció una función del tipo exponencial $Y = aX^b$, como la de mejor ajuste para la cuantificar la proporción de sedimentos de acarreo de fondo con respecto al de suspensión

Tabla 2
Producción de sedimentos en suspensión (miles de ton)

Cuenca	TR (años)				
	10	25	50	100	500
Anaúco	2,6	3,9	4,4	5,7	8,0
Beatas	0,5	0,7	0,7	0,9	1,1
Camburí	5,2	7,8	8,7	10,7	14,2
Canoas	1,3	2,0	2,2	2,7	3,4
Catuche	7,4	12,3	14,0	18,8	26,0
Caurimare	5,2	6,9	7,6	9,2	12,7
Chacaíto	5,6	9,4	10,7	13,8	19,2
Chapellín-Ávila	1,5	2,3	2,6	3,3	4,5
Cotiza	3,1	5,0	5,7	7,6	10,4
Galindo	5,3	7,0	7,6	8,9	11,5
Gamboá	3,6	5,2	5,9	7,5	10,3
Guño	1,3	2,0	2,2	2,8	3,7
Maripérez	1,6	2,2	2,5	3,1	4,1
Pajaritos	3,3	4,9	5,4	6,8	9,1
Pasaquire	1,4	2,1	2,3	2,8	3,8
Quintero	3,5	5,1	5,8	7,3	10,4
Sebucán	3,8	5,8	6,5	8,2	11,6
Tenería	3,0	4,5	5,0	6,1	8,3
Tócome	8,1	12,9	14,6	18,9	26,9

Tabla 3
Producción potencial de sedimentos por acarreo de fondo en cuencas piloto* (miles de ton)

Sub-cuenca	Pendiente (m/m)		Long Tramo (m)	Ecuación	TR (años)				
	Sección	Tramo ⁽¹⁾			10	25	50	100	500
Anauco	0,13	0,19	150	Schoklitsch	14,52	22,14	27,98	34,75	50,98
				Meyer-Peter-Müller	9,30	13,09	15,77	19,08	25,19
Camburí	0,10	0,10	218	Schoklitsch	15,40	22,45	27,43	32,67	44,38
				Meyer-Peter-Müller	15,03	20,27	23,42	26,83	34,82
Chacaíto	0,06	0,06	150	Schoklitsch	6,29	9,09	11,23	13,73	19,58
				Meyer-Peter-Müller	10,25	13,52	15,69	18,19	23,64
Galindo	0,03	0,07	240	Schoklitsch	0,71	0,92	1,07	1,26	1,66
				Meyer-Peter-Müller	1,25	1,53	1,70	1,94	2,44
Tenería	0,07	0,12	150	Schoklitsch	5,30	7,90	9,91	12,12	17,35
				Meyer-Peter-Müller	5,45	7,54	8,92	10,53	13,90
Tócome	0,19	0,20	250	Schoklitsch	83,40	120,24	146,99	176,03	230,51
				Meyer-Peter-Müller	74,31	100,02	116,07	134,17	169,37

* Si el lecho puede suplir dicho volumen. ⁽¹⁾Pendiente ponderada en el tramo estudiado.

(Q_f/Q_s), en función de la pendiente de fondo (S_o). En las Figuras 2 y 3, se muestran las curvas obtenidas que definen la relación entre la producción de sedimento en suspensión (Q_s) y el acarreo de fondo (Q_f) empleando las ecuaciones de Schoklitsch y Meyer-Peter/Müller.

Estimación de la producción ordinaria de sedimentos

Se calculó la producción ordinaria de sedimentos (promedio mensual y anual) tanto de suspensión como acarreo de fondo, en las 19 cuencas, para esto se combinó con un modelo lluvia-escorrentía [21] y [22] acoplado al modelo MUSLE. El modelo de escorrentía fue calibrado en seis de las cuencas. Se utilizó un registro compuesto de precipitación de 12 años, de las estaciones Hotel Humboldt, La Salle y Caurimare. Los módulos por unidad de área calculados para la producción de sedimentos en suspensión así como el acarreo de fondo por las relaciones obtenidas para las ecuaciones de Schoklitsch y Meyer-Peter/Müller, se muestran en las Tablas 4, 5 y 6 respectivamente.

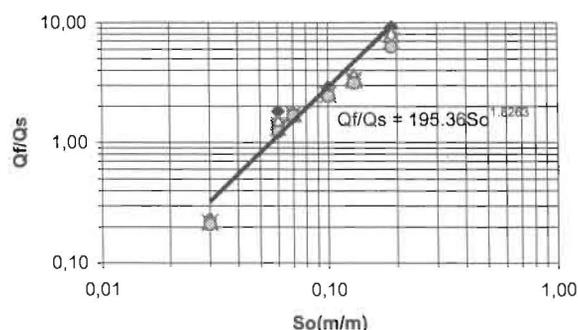


Figura 2. Variación de la relación de transporte (Q_f/Q_s) con la pendiente del lecho (S_o), usando la ecuación de Meyer-Peter/Müller.

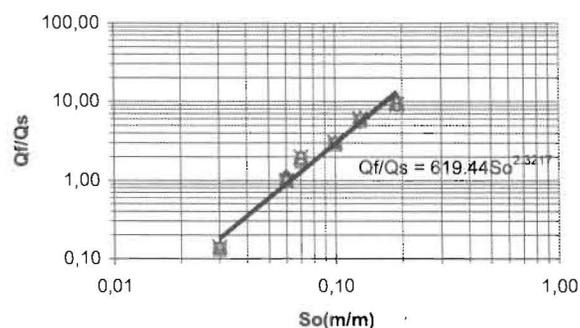


Figura 3. Variación de la relación de transporte (Q_f/Q_s) con la pendiente del lecho (S_o), usando la ecuación de Schoklitsch.

Tabla 4
Producción media mensual y anual de sedimento en suspensión (ton/km²)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Anauco	0	0	62	1	14	50	37	146	56	38	64	11	479
Beatas	0	0	69	2	26	79	55	168	115	92	97	26	729
Camburi	1	0	105	2	28	153	171	350	302	186	196	92	1,586
Canoas	0	0	173	2	44	158	114	416	186	133	192	37	1,455
Catuche	0	0	143	1	32	122	87	351	131	90	152	24	1,133
Caurimare	0	0	56	0	6	65	41	185	66	55	71	18	563
Chacaíto	0	0	46	0	7	61	40	143	80	64	66	24	531
Chapellín	0	0	87	2	32	94	69	208	138	108	117	31	886
Cotiza	0	0	63	1	15	57	39	155	64	46	70	12	522
Galindo	0	0	89	0	10	112	75	287	135	110	123	41	982
Gamboa	0	0	84	1	20	66	51	195	74	49	83	14	637
Guño	0	0	49	0	7	88	101	223	187	116	120	63	954
Maripérez	0	0	82	0	2	127	136	333	212	176	160	89	1,317
Pajaritos	1	0	116	2	32	141	154	323	245	153	173	76	1,416
Pasaquire	0	0	67	0	11	83	79	204	121	88	98	42	793
Quintero	0	0	66	0	12	84	75	198	123	89	95	41	783
Sebucán	0	0	114	1	23	141	119	331	203	146	161	63	1,302
Tenería	1	0	150	3	48	186	208	418	348	215	238	101	1,916
Tócome	0	0	45	0	6	56	42	141	72	56	65	24	507

Análisis de Resultados

Los resultados en las Figuras 2 y 3, reflejan como los valores de arrastre de fondo que estima la ecuación de Meyer-Peter/Müller, para pendientes inferiores a 0.07 m/m, son superiores a los calculados con la ecuación de Schoklitsch, pero esta relación se invierte para valores de pendiente superiores a 0.07 m/m, donde la ecuación de Schoklitsch predice mayores valores de arrastre de fondo y, a medida que se aumenta la pendiente, la diferencia entre los resultados de ambas ecuaciones también tiende a ser mayor.

La correlación de los valores de arrastre en suspensión y arrastre de fondo muestran que existe una clara afinidad entre ambos compo-

nentes del arrastre total y esta relación depende de la pendiente local del canal.

En general, en estas cuencas se presentan pendientes del orden del 20% en su parte alta hasta 5% en sus desembocaduras hacia la ciudad de Caracas. Por lo tanto, dado que los resultados mostrados en las Figuras 2 y 3, definen las relaciones, entre la carga suspendida y la de fondo (Q_S/Q_f), como una función de la pendiente, estas figuras permiten la estimación de dicha relación en cualquier posición del cauce principal.

Adicionalmente, en dichas figuras se observa que la relación (Q_S/Q_f) tiende a ser igual a la unidad, para pendientes del canal cercanas al 6%, es decir, para pendientes superiores a este valor el arrastre de fondo supera el arrastre en suspensión, no obstante, el arrastre de fondo

Tabla 5
Producción de sedimentos por acarreo de fondo – relación de Schoklitsch (ton/km²)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Anauco	0	0	338	3	78	273	203	794	304	205	346	58	2,602
Beatas	1	0	202	5	77	232	163	496	339	272	285	76	2,148
Camburi	3	0	311	5	83	452	506	1,034	892	549	578	271	4,684
Canoas	0	0	1,312	15	331	1,198	862	3,149	1,411	1,011	1,452	276	11,017
Catuche	0	0	110	1	24	94	67	270	101	69	117	19	872
Caurimare	0	0	54	0	6	63	40	181	65	53	69	17	548
Chacaíto	0	0	42	0	6	55	36	129	72	58	59	22	479
Chapellín	0	0	1,134	25	423	1,233	905	2,725	1,810	1,416	1,539	410	11,620
Cotiza	0	0	117	1	28	106	74	289	119	86	130	23	973
Galindo	0	0	16	0	2	20	14	52	24	20	22	7	177
Gamboa	0	0	113	1	27	89	69	263	100	66	112	19	859
Guño	0	0	319	1	43	569	651	1,441	1,209	750	771	407	6,161
Maripérez	0	0	8	0	0	12	13	32	20	17	15	8	125
Pajaritos	1	0	145	2	39	177	192	403	306	191	216	94	1,766
Pasaquire	0	0	174	1	28	214	203	525	312	226	254	108	2,045
Quintero	0	0	291	2	54	370	331	878	546	393	422	179	3,466
Sebucán	0	0	743	6	149	914	772	2,152	1,320	949	1,042	410	8,457
Tenería	1	0	150	3	48	186	208	418	348	215	238	101	1,916
Tócome	0	0	587	2	81	733	552	1,842	943	732	851	320	6,643

está sujeto al volumen de material aluvial disponible para el transporte, en los lechos de sus cauces; por lo tanto, estos valores corresponden a un acarreo de fondo potencial.

En cuanto a la producción de sedimentos finos (transportados como carga suspendida), en estas cuencas, se puede decir que es relativamente moderada considerando que las condiciones topográficas son muy abruptas y los suelos disponen de poco material cohesivo. Hay que hacer notar que las tasas medias anuales de producción de sedimentos en cuencas montañosas del país están en el orden de entre 1000 y 2000 ton/km²/año. Los módulos de producción de sedimentos por unidad de área de las cuencas tienden a ser mayores a medida que sus superficies tienden a ser más pequeñas, debido a que las

cuencas con mayor extensión tienden a minimizar los efectos de áreas donde la cobertura vegetal ha sido degradada.

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para estimar la producción total de sedimentos (arrastre suspendido y arrastre de fondo) en cuencas de montaña mediante una relación funcional entre la producción de sedimentos por erosión laminar y la producción por arrastre de fondo, que acoplada a un modelo continuo lluvia-escorrentía permita estimar la producción mensual y anual de sedimentos. Esta metodología permite evaluar la afinidad entre la porción transportada en suspensión y la porción transportada por arrastre de fondo de los sedi-

Tabla 6
Producción de sedimentos por acarreo de fondo – relación de Meyer-Peter/Müller (ton/km²)

Subcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Anaúco	0	0	293	2	68	236	176	688	263	178	300	50	2,254
Beatas	1	0	200	5	76	229	161	490	335	268	282	75	2,122
Camburi	3	0	307	5	82	446	500	1,020	881	542	571	268	4,625
Canoas	0	0	1,059	12	267	967	696	2,542	1,139	816	1,172	223	8,893
Catuche	0	0	144	1	32	123	88	355	132	91	153	24	1,143
Caurimare	0	0	68	0	7	79	50	226	81	67	86	22	686
Chacaíto	0	0	53	0	8	70	46	164	92	73	75	27	608
Chapellín	0	0	814	18	304	885	650	1,957	1,299	1,016	1,105	294	8,342
Cotiza	0	0	127	1	31	115	80	315	129	93	142	25	1,058
Galindo	0	0	29	0	3	36	24	93	44	36	40	13	318
Gamboá	0	0	132	1	32	104	81	307	116	77	131	22	1,003
Guño	0	0	266	1	36	475	544	1,204	1,010	627	644	340	5,147
Maripérez	0	0	16	0	0	25	27	65	41	35	31	17	257
Pajaritos	1	0	171	3	47	209	228	477	363	226	257	112	2,094
Pasaquire	0	0	177	1	28	218	207	533	317	230	258	109	2,078
Quintero	0	0	264	2	49	335	300	795	495	356	382	162	3,140
Sebucán	0	0	620	5	124	762	644	1,795	1,101	792	870	342	7,055
Tenería	1	0	176	4	57	219	245	493	410	253	280	119	2,257
Tócome	0	0	422	1	58	526	396	1,323	677	526	611	230	4,770

mentos producidos por cuencas de montañas, mediante la integración de modelos que estiman la erosión laminar y el arrastre de material del lecho. La metodología se ha aplicado a las cuencas de la vertiente sur del Parque Nacional El Ávila en Caracas, Venezuela.

En el caso de las estimaciones del arrastre de fondo, la misma corresponde a un acarreo potencial, para cada subcuenca, dado que dicho arrastre está sujeto a la disponibilidad del material aluvial en los lechos de sus cauces, en especial en aquellas cuencas de alta pendiente donde los lechos tienden a ser rocosos.

Las curvas de (Q_s/Q_f) versus (S_o) obtenidas en este estudio, sirven de referencia para expresar el arrastre de fondo potencial, conocida la producción del sedimento en suspensión. Estas

curvas, presentadas en las Figuras 1 y 2, expresan la relación entre arrastre en suspensión y arrastre de fondo, como una función de la pendiente a lo largo del canal principal de una cuenca de montaña. En ausencia de datos, ellas pudieran utilizarse para obtener una primera aproximación a la producción total de sedimentos en cuencas montañosas de características similares a las de la Serranía del Ávila.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de una investigación que ha sido financiada por el FONACIT, Venezuela, a través del Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Se agradece también los comentarios hechos por los revisores anónimos por ayudaron a mejorar la calidad del artículo.

Referencias Bibliográficas

1. Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. U.S. Dep. Agric. Handb. 82, (1965) 49 pp.
2. Morris, G. L. y Fan, J. "Reservoir Sediment Handbook", McGraw-Hill, 1998
3. Williams, J.R y Berndt, H. D., "Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology", Trans. ASAE 10(6), (1977) 1100-1104.
4. Williams, J.R, Jones C.A. y Dyke, P.T., "A Modeling Approach to Determining The Relationship between Erosion and Soil Productivity". Trans. ASAE 27, (1984) 129-144.
5. Williams, J.R, Nicks, A., y Arnold, J.G., "Simulator for Water Resources in Rural Basins", Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 111, No 6, (1985).
6. Stevens, H. Jr, "Summary and Use of Selected Fluvial Sediment-Discharge Formulas", USGS, (1989).
7. Knisel, W.G., ed. CREAMS. "A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems". Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, SEA (1981).
8. Leonard, R.A., Knisel, W.G. and D.A. Still. "GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems." Transactions of the ASAE 30(5), (1987) 1403-18.
9. Williams, J.R., "Sediment-yield prediction with the Universal equation using runoff energy factor", Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. ARS-S-40. USDA-Agricultural Research Service, (1975) 244-252.
10. Mills, W. C., Thomas, A. W., y Langdale, G. W. "Erosion probabilities in Southern Piedmont: Cropping tillage effects". ASAE Paper No. 84-2546.(1984) 24.
11. Córdova, J.R., Rodríguez-Iturbe,I. y Guenni, L.B. "On the estimation of the mean and variance of Annual yield based on basin and storm characteristics". In: Scientific Procedures applied to the Planning, Design and Management of Water Resources Systems (Proceedings of the Hamburg Symposium, August, 1983). IAHS Publ. No. 147, (1983) 125-139.
12. López, J.L. y Falcón, M.A., "Calculation of Bed Changes in Mountain Streams", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, N° 3, (1999).
13. Strand, R. I., and Pemberton, E. L., "Reservoir Sedimentation", in Design of Small Dams, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, (1987).
14. Simons, D.B., and Senturk, F., "Sediment Transport Technology", Water Resources Publications, Fort Collins, CO, (1977, 1992).
15. CGR Ingeniería, "Estudios de Crecidas en las Cuencas de la Vertiente Sur del Parque Nacional Ávila", MARN-PNUD, (2001).
16. Ayala, L., "Estudios de crecidas de quebradas de Caracas", INOS, (1960).
17. Proyecto PREVENE, "Aporte a la Prevención de Desastres Naturales en Venezuela", PNUD-COSUDE, (2001).
18. Williams, J.R, "Testing the Modified Universal Soil Loss Equation", Proceedings of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands. USDA-ARS, Tuscon, Arizona, (1981) 157-165.
19. Bathurst, J.C., Graf, W.H. y Cao. H.H., "Bed Load Discharge Equations for Steep Mountain River", Sediment Mountain River (Thorne CR., Bathurst J. C., Hey R. D. Eds.) John Wiley & Sons Ltd, (1987), 453-477.
20. Mattos, R, "Pequeñas Obras Hidráulicas", UNESCO (1999) Cap. 3, 20 - 24.
21. Córdova, J.R., Baldoni, M. y Fuentes, V., "Modelo de Simulación Hidrológico basado en el Método del Servicio de Conservación de Suelos", II Encuentro Nacional de Clima, Agua y Tierra, (1985).
22. Williams, J.R y La Seur, W. V., "Water Yield Model Using SCS Curve Numbers", J. Hydraul. Div. ASCE 102(HY9), (1975) 1241-1253.

Anexo: Ecuaciones Principales de los Modelos Matemáticos

1.1. Formulación del modelo MUSLE

La ecuación principal del modelo es la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE):

$$Y = 116(q_p \times Q)^{0.56} \times K \times P \times C \times LS, \quad (1)$$

en donde:

Y = Sedimentos producidos por un evento (toneladas métricas)

q_p = Caudal pico del evento (m^3/s)

Q = Volumen total de escorrentía del evento (m^3)

K = Factor relativo a la erodabilidad del suelo

P = Factor relativo a las prácticas de manejo conservacionista del suelo

C = Factor relativo a la cobertura vegetal

LS = Factor relativo a la topografía

1.2. Ecuación de Schoklitsch

$$q_s = \frac{2.5}{\rho_s / \rho} S^{3/2} (q - q_o) \quad (2)$$

$$q_o = 0.21 S^{-1.12} \sqrt{gD^3}, \quad (3)$$

en donde:

q_s = Acarreo de fondo de sedimento por unidad de ancho, ($kg/s/m$)

D = Diámetro de las partículas, (mm)

S = Pendiente de la línea de energía, (m/m)

q_o = Descarga crítica por unidad de ancho, ($m^3/s/m$)

ρ_s/ρ = Relación entre la densidad de los sedimento y el agua

1.3. Ecuación de Meyer-Peter/Müller

$$q_B = \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \cdot g \cdot D^3 \cdot 8(\tau_* - 0.047)^{3/2}} \quad (4)$$

$$\tau_* = \frac{1000 \cdot Rh \cdot Sf}{(\rho_s - \rho) \cdot D}, \quad (5)$$

en donde:

τ_* = Tensión de corte crítico de la partícula

ρ_s = Densidad de los sedimentos

ρ = Densidad del agua

Sf = Pendiente de la línea de energía, (m/m)

D = Diámetro de la partículas (m)

Rh = Radio hidráulico (m)

1.4. Formulación del Modelo SCS

El método del SCS (Soil Conservation Service, USA) estima la escorrentía superficial de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, \quad (6)$$

en donde:

Q = Escurrimiento superficial

P = Precipitación total

S = Parámetro de retención

Designando por Ia las pérdidas iniciales, es decir, la precipitación que ocurre antes de que comience el escurrimiento, la relación antes descrita queda expresada:

$$\frac{(P - Ia) - Q}{S} = \frac{Q}{P - Ia}, \quad (7)$$

Análisis hechos a la relación Ia y S condujo a una aproximación lineal que asigna a Ia un valor equivalente al 20% de S , con lo cual al realizar los reemplazos correspondientes se llega a la ecuación (6).

El parámetro S , comprende el contenido de humedad del suelo al momento de producirse un evento, Para la estimación de este parámetro, se desarrolló la metodología del Número de Curva (CN). La ecuación que expresa el parámetro S en función del Número de curva (CN) es:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254, \quad (8)$$

en donde S está expresado en milímetros.

Modificación propuesta por Williams y La Seur (1976) [22]

Los autores introducen al modelo un índice de humedad SM , el cual se relaciona con el parámetro de retención S mediante la siguiente expresión:

$$SM = V - S, \tag{9}$$

en donde V es el máximo valor de almacenamiento de humedad del suelo.

Ea es la tasa de evapotranspiración actual, la cual esta en función valor de SM , de la evaporación al sol y del tipo de suelo y se puede representar como:

$$\frac{d(SM)}{dt} = -Ea. \tag{10}$$

Williams y La Seur (1976) [22] sugieren para estimar Ea , la siguiente expresión:

$$Ea = B * SM^2 * EV. \tag{11}$$

Sustituyendo la expresión (11) en (10) quedaría que:

$$\frac{d(SM)}{dt} = -B * SM^2 * EV, \tag{12}$$

en donde:

t = tiempo

B = coeficiente de agotamiento de la humedad del suelo

EV = evaporación

Integrando la ecuación (12) y resolviendo para SM , obtenemos:

$$SM_t = \frac{SM_{t-1}}{1 + B + SM \sum_{t=1}^T EV_t}, \tag{13}$$

en donde:

SM_{t-1} = índice de humedad del suelo al comienzo del primer evento.

SM_t = índice de humedad del suelo para un tiempo t .

EV_t = evapotranspiración diaria

T = número de días transcurridos entre eventos

Modificación propuesta por Baldoni y Fuentes (1985) [21]

Estos autores proponen a la ecuación de balance de humedad del suelo un segundo término que considera la percolación profunda (Pa). De esta forma, la ecuación (10), queda ahora de la siguiente forma:

$$\frac{d(SM)}{dt} = -Ea - Pa. \tag{14}$$

Según Eagleson (1977) [21], la tasa de percolación se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$Pa = B2 \left(\frac{SM}{V} \right)^c, \tag{15}$$

donde:

$B2$ = coeficiente de permeabilidad

c = índice de conectividad del espacio poroso, con valores según Eagleson para la mayoría de los suelos entre 1 y 6. De manera práctica para facilitar los cálculos de integración y considerando que la ecuación de la tasa de evapotranspiración es una función cuadrática, se tomo un valor de $c = 2$.

Así, sustituyendo (11) y (15) en (14), tenemos:

$$\frac{d(SM)}{dt} = -B \times SM^2 \times EV - \frac{B2}{V^2} \times SM^2. \tag{16}$$

Integrando esta expresión para SM , obtenemos:

$$SM_t = \frac{SM}{1 + B \times SM \times EV + \frac{B2}{V^2} \times SM}. \tag{17}$$

La humedad inicial para un evento vendrá dado por la suma de la humedad inicial más la lámina precipitada $SM + P$, considerando el desfase lluvia - escorrentía, se deja para el final del even-

to la sustracción de la escorrentía Q , dado que la cantidad que infiltra es $P - Q$, así la expresión para estimar el coeficiente de agotamiento es:

$$SM_t = \frac{SM_{t-1} + P_t}{1 + B(SM_{t-1} + P_t) + \frac{B^2}{V^2}(SM_{t-1} + P_t)} - Q_t. \quad (18)$$

Finalmente, la expresión para calcular la producción total de agua, es:

$$Qt = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} + B2 \left(\frac{SM}{V} \right)^2. \quad (19)$$

En donde el primer término del lado derecho de la ecuación representa el escurrimiento superficial, y el segundo término, el flujo base.

Recibido el 11 de Abril de 2005

En forma revisada el 03 de Julio de 2006