

5. METODOS DE ESTIMACION DE LA EROSION Y SEDIMENTOS

5.1 Introducción.

En este capítulo se describirán las metodologías más utilizadas en la estimación de la erosión y los sedimentos. Este es un tema que ha tomado gran importancia en los últimos años por la creciente preocupación por los aspectos ambientales. En primer lugar se tratará la USLE, como la metodología clásica y luego se discutirán las metodologías más recientes, entre ellas el modelo EPIC y el modelo WEPP.

5.2 USLE.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, USLE, fué desarrollada por Wischmeier (1978), como una metodología para la estimación de la erosión laminar en parcelas pequeñas. Luego de varias modificaciones la ecuación se presenta como una metodología de gran utilidad en la planificación de obras de conservación de suelos.

Se ha considerado que la USLE (Wischmeier, 1978), hasta el momento, representa la metodología más idónea para el cálculo de las pérdidas de suelo en tierras agrícolas; por ello, se ha utilizado esta metodología como una guía para la evaluación de acciones en manejo de cuencas, en especial aquellas que conllevan a un cambio del uso de la tierra y manejo de suelos. De acuerdo a la USLE, la tasa de pérdidas de suelo por erosión hídrica, T , es una función de: el **poder erosivo de la lluvia**, R , la **erodabilidad de los suelos**, K , la **cobertura vegetal**, C , la **práctica conservacionista**, P y el **factor combinado de la pendiente y la longitud de la misma**, LS ; todos estos factores conforman la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE, la cual se expresa como:

$$T = RKCPLS \quad (5.1)$$

De esos factores, **R** no puede ser modificado, **K** depende fuertemente de la textura de los suelos, la cual no puede ser fácilmente mejorada. De esa manera, sólo **C , P , y LS** pueden ser cambiados. Las prácticas agronómicas comunes, pueden utilizarse para modificar la cobertura vegetal, y consecuentemente **C** , mediante manejo de desechos y mejoramiento de los sistemas de siembra. El factor **P** puede ser cambiado por prácticas agronómicas, como las barreras vegetativas, o con obras de conservación de suelos como terrazas, zanjas o acequias de ladera. La modificación del factor **P** está íntimamente ligado a la reducción de la longitud de pendiente, **L** . Por último, la pendiente, **S** , sólo puede ser modificada mediante obras de conformación del terreno, tales como terrazas.

Para el diseño de cualquier práctica, es necesario determinar o establecer un límite de pérdidas de suelo permisibles; esto último depende principalmente de la profundidad de los suelos. En suelos normales, el límite máximo es del orden de las 6 Toneladas por hectárea, para suelos muy superficiales, las pérdidas tolerables pueden reducirse hasta valores de 2 T/Ha.

5.2.1 El Factor R .

El factor R depende de la intensidad de lluvia y de la lluvia total. El factor se estima para cada una de las tormentas significativas ocurridas durante un registro de una longitud aceptable, por lo general mayor de 10 años. Normalmente es determinado para cada mes del año y se presenta como valores acumulados, tal como se muestra en la figura 5.1 y el cuadro 5.1 Otra forma de presentar los resultados es mediante una mapa de iso-erodentas a nivel anual, tal como aparece en la figura A6 del anexo A.

Para la estimación de R, es necesario contar con registros de lluvias en la forma de hietogramas. A partir de esos registros se calcula el valor de la energía de la lluvia, **E**, para cada intervalo de tiempo de lluvia constante. Luego se calcula el índice de erosión, **EI**, para el evento. Foster et al. (1981) presentan un método de cálculo para el sistema métrico.

$$e_j = -0.119 + 0.0873 \log_{10} i_j \quad i_j < 76 \text{ mm/h} \quad (5.2)$$

ó

$$e_j = 0.283 \quad i_j > 76 \text{ mm/h} \quad (5.3)$$

en donde **e_j** es la energía cinética en megajoules por hectárea por milímetro de lluvia (Mj/ha*mm) para el intervalo de tiempo **j** ; **i_j** es la intensidad de lluvia del intervalo, en mm/h . Para calcular la energía para el evento se usa la ecuación:

$$E = \sum e_j p_j \quad (5.4)$$

en donde **E** es la energía para el evento en Mj/ha y **p_j** es la lluvia para el intervalo de tiempo **j** en mm. El valor de **EI** para el evento es:

$$EI = E * I_{30} \quad (5.5)$$

en donde **I₃₀** es la máxima intensidad registrada en 30 minutos y se expresa en mm. EI se expresa en Mj*mm/ha*h. Las tormentas menores de 13 mm y distanciadas por más de 6 horas de otros eventos no se consideran en el cálculo de EI, a no ser que caigan más de 6 mm en 15 minutos (Wischmeier y Smith, 1978).

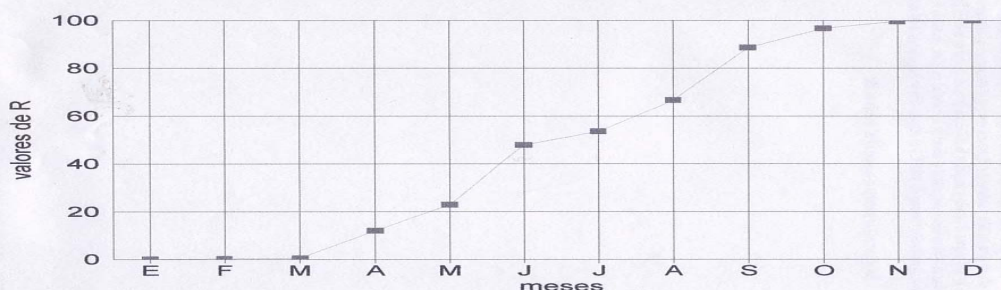
Como en la USLE la erosión no se calcula por eventos, sino por períodos de tiempos mayores, a veces anual, entonces se utiliza el factor R, el cual es la sumatoria de los valores de EI para el período en consideración. El cuadro 5.1B presenta un ejemplo del cálculo de EI para una tormenta.

Cuadro 5.1

COEFICIENTE DE ERODABILIDAD (FACTOR "R"), DATOS BASE

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
EL COYOLAR	0.9	23.8	7.6	212.3	655.8	818.0	302.9	222.9	594.8	430.2	95.7	19.4	3384.5
FLORES	1.0	12.6	3.8	105.9	470.1	575.8	336.2	524.9	576.4	229.7	133.8	9.4	2979.7
AGUA CALIENTE	7.2	46.2	139.1	328.4	1007.0	1305.1	968.8	862.3	1207.3	789.9	240.4	93.4	6994.9
SANTA CLARA	35.8	98.7	53.9	596.1	981.8	913.9	463.2	499.2	927.7	1143.7	315.6	84.2	6113.7
VICTORIA	15.2	70.0	146.9	332.2	1132.8	1525.6	1124.4	1043.4	1117.4	642.1	106.4	41.2	7297.5
LA ERMITA	15.1	42.5	57.1	211.4	793.9	745.9	209.1	392.5	506.1	681.4	173.6	105.2	3934.0
PLAYITAS	4.0	5.4	10.6	465.0	439.6	1006.8	229.4	526.6	889.7	326.7	114.1	17.2	4035.2
SIGUATEPEQUE	2.3	6.6	9.4	56.4	812.4	662.3	544.5	512.4	804.6	615.1	167.5	54.8	4248.3

Figura 5.1. Valores de R
Valores acumulados El Cajón, Honduras



R.Rojas, D:\MANCUE\CUADROS\CAJON.WK3

Cuadro 5.1B

CALCULO DE EI PARA UNA TORMENTA

HORA	LAMINA mm	DURACION min	INCREM mm	INTENSID cm/h	ENERG por cm	ENERG/ INTERVALO
400	0					
420	1.2	20	1.2	0.36	170.5109	20.4613107
427	3	7	1.8	1.5428571	226.761	40.816978
436	8.6	9	5.6	3.7333333	260.9166	146.113303
450	26.6	14	18	7.7142857	288.9693	520.144774
457	30.4	7	3.8	3.2571429	255.6425	97.1441408
505	31.7	8	1.3	0.975	209.0214	27.1727834
515	31.7	10	0	0	0	0
530	33	15	1.3	0.52	184.7243	24.0141587

875.867449

ENERGIA CINETICA DEL EVENTO = 8.7586745

I30 = 5.4864 CM/H 4:27 A 4:57

EI30= 48.05359 EN CENTIMETROS

NOTA: Tomado de Wishmeier y Smith, 1978)

5.2.2. Estimación del factor K .

Como se mencionó anteriormente, K es el factor de erodabilidad y se calcula en función de:

porcentaje de limo+arena muy fina (0.1-0.002 mm), porcentaje de arena, porcentaje de materia orgánica, índice de permeabilidad e índice de textura. El factor K se puede estimar mediante el nomograma que aparece en la figura 5.2 o puede ser calculado analíticamente mediante la ecuación:

$$100 K = 2.1 M^{1.14} (10^{-4}) (12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3) \quad (5.6)$$

en donde:

M = (% limo+arena muy fina)*(100-% arcilla)

a = % de materia orgánica

b= código de estructura de suelo

c= clase de permeabilidad

el valor de K está expresado en unidades inglesas, para transformarlo a unidades métricas deberá ser multiplicado por un factor, de esa manera, para obtener K en unidades métricas se multiplicará ésta por el factor 1.317 (para R en centímetros). Tanto la ecuación 5.6 como el nomograma de la figura 5.2, son válidos para suelos con valores de (limo+arena muy fina) menores de 70% .

Para los casos en los cuales no se tenga información detallada de los suelos, se pueden utilizar tablas similares a las que aparece en el cuadro 5.2. Esos valores tendrán carácter de provisionales hasta tanto se hagan los levantamientos de suelos o se encuentre la información detallada necesaria.

5.2.3. Factor topográfico LS .

La USLE combina el efecto de la pendiente, S, con la longitud de flujo, L, en un factor topográfico, LS, el cual se calcula mediante la ecuación:

$$LS = (l/22.13)^m (65.41 \sin^2 \alpha + 4.45 \sin \alpha + 0.065) \quad (5.7)$$

en donde:

l = longitud de la pendiente en metros

α = ángulo de la pendiente

m = 0.5 para pendientes iguales o mayores de 5%

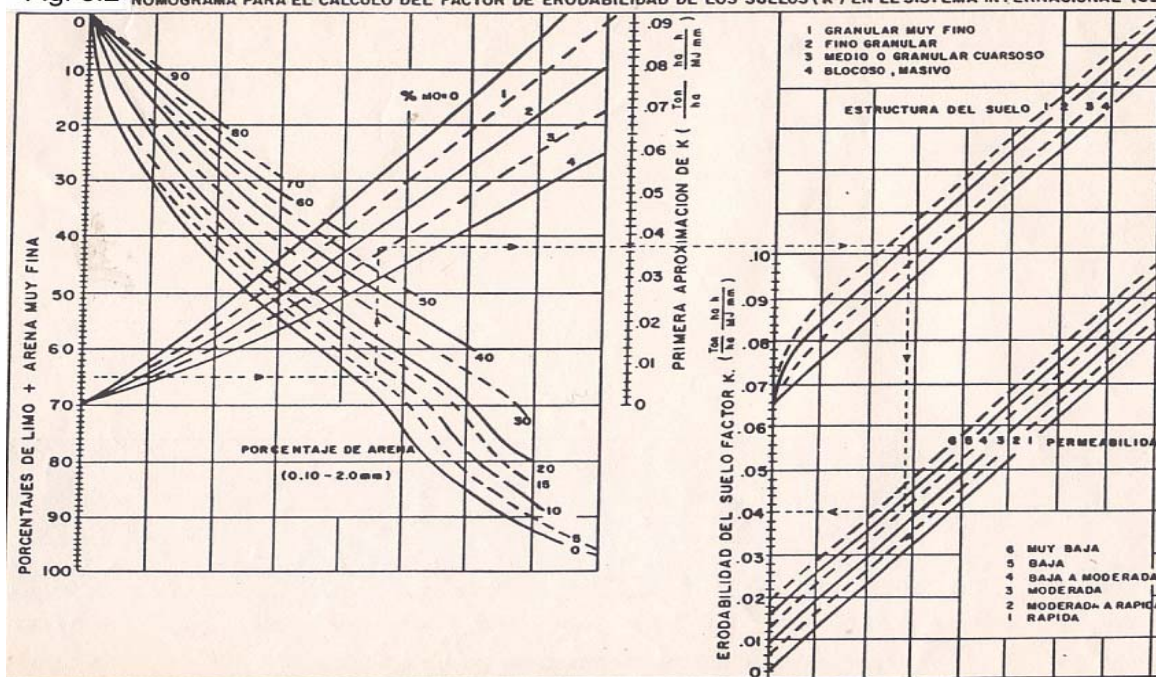
0.4 para pendientes entre 3.5 y 4.5 %

0.3 para pendientes entre 1.0 y 3.0

0.2 para pendientes uniformes menores de 1%

la ecuación 5.7 es comúnmente presentada en nomogramas para facilidad de cálculo.

Fig. 5.2 NOMOGRAMA PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD DE LOS SUELOS (K) EN EL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)



Cuadro 5.2

Factores de erosionabilidad del suelo asociados a la textura y al contenido de materia orgánica según Kirkby y Morgan (1980). Los valores de K están expresados (t/ha)/(MJ.mm.h)

Textura	Valores de K		
	Contenido de materia orgánica		
	< 0.5 %	2 %	4 %
Arena	.007	.004	.003
Arena fina	.021	.018	.013
Arena muy fina	.055	.047	.037
Arena franca	.016	.013	.011
Arena fina franca	.032	.026	.021
Arena muy fina franca	.058	.05	.04
Franco arenoso	.036	.032	.025
Franco arenoso fino	.046	.04	.032
Franco arenoso muy fino	.062	.054	.043
Franco	.05	.045	.038
Limo franco	.063	.055	.043
Limo	.079	.068	.055
Franco areno arcilloso	.036	.033	.028
Franco arcilloso	.037	.033	.028
Franco arcillo limoso	.049	.042	.034
Arcilla arenosa	.018	.017	.016
Arcilla limosa	.033	.03	.025
Arcilla	.017 - .038		

5.2.4. Factor de cultivo C .

El factor de cultivo C es un índice del grado de cobertura y protección que presenta la vegetación. Ese factor es constante para cultivos permanentes y variable para cultivos anuales. El cuadro 5.3 contiene valores promedio de C para diferentes coberturas. Los cuadros 5.3 al 5.8 contienen los valores de C para una mayor gama de cultivos y grados de cobertura.

La estimación del factor C es de suma importancia ya que es el más variable y sujeto a cambios. En manejo de cuencas este factor puede ser modificado a fin de minimizar las pérdidas de suelo por erosión.

Cuadro 5.3 Coeficientes de cultivo C de USLE (Wischmeier y Smith, 1978)

CULTIVO & COBERTURA	FACTOR C*						OBSERVAC
	PREP TIERR	SIEMBRA A 10%CV	CRECIM 10-50%CV	DESARRO 50-70%CV	MADURAC 80-90%CV	COSECHA	
MAIZ,SIN RESIDUOS	0.69	0.77	0.68	0.49	0.35	0.74	C/BAJOS RENDIM.
MAIZ,CON RESIDUOS		0.51	0.43	0.36	0.24	0.47	C/MULCH
MAIZ,RESID,CURVAS NIV.			0.25	0.24	0.22		MULCH
FRIJOLES CON RESID.		0.45	0.68	0.6	0.24		
MATORRAL 4m 25% COBERT.		0.23	0.14		0.042		
PASTO RALO 25% COBERTURA		0.2	0.17	0.038	0.013		
PASTO 75% COBERTURA		0.17	0.06	0.032	0.011		
BOSQUE 75-100% COBERTURA					0.001		
BOSQUE 45-75% COBERTURA					0.003		
BOSQUE 20-40% COBERTURA				0.006			

* EN CULTIVOS PERMANENTES EL % DE COBERTURA = MULCH

Cuadro 5.4

COEFICIENTES DE CULTIVO "C"
PARA DIFERENTES SITUACIONES DE MANEJO DE SUELO Y RESIDUOS
USLE (WISCHMEIER Y SMITH, 1978)

CULTIVO	RESIDUOS SOBRE TERRENO LBS *1	COBERTURA/ SIEMBRA BRA %	FACTOR DE CULTIVO "C" *2						OBSERVACIONES
			PREP TIERRA	SIEMB A 10%CV	CRECIM 10-50%CV	DESARRO 50-70%CV	MADURAC 80-90%CV	COSECHA	
1 MAIZ,SIN RESIDUOS...	AP		0.66	0.74	0.65	0.47	0.22	0.56	C/BAJOS RENDIM C/MULCH
2 ...	BP		0.67	0.75	0.66	0.47	0.3	0.62	
3 ...	MP		0.68	0.76	0.67	0.48	0.31	0.69	
4 ...	DP		0.69	0.77	0.68	0.49	0.35	0.74	
5 MAIZ,CON RESIDUOS...	4500		0.34	0.55	0.48	0.36	0.2	0.23	
6 ...	2000		0.51	0.68	0.6	0.45	0.27	0.47	
7 ZERO LABRANZA...	6000	95		0.02	0.02	0.02	0.02	0.14	
8 ...	4500	80		0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	
9 ...	3400	70		0.08	0.08	0.08	0.07	0.19	
10 ...	3400	50		0.15	0.15	0.14	0.11	0.27	
11 ...	2600	30		0.26	0.24	0.22	0.17	0.36	
LABRANZA REDUCIDA...									
12 ...CINCEL,DISCO SUP.	6000	70		0.08	0.08	0.07	0.07	0.17	
13 ...**	6000	20		0.23	0.2	0.18	0.16	0.21	
14 ...	4500	70		0.09	0.08	0.07	0.07	0.18	
15 ...	4500	20		0.25	0.22	0.19	0.16	0.22	
16 ...	3400	60		0.14	0.11	0.1	0.09	0.2	
17 ...	3400	10		0.36	0.32	0.29	0.22	0.3	
18 ...	2600	50		0.17	0.16	0.15	0.13	0.29	
19 ...	2600	10		0.41	0.36	0.34	0.26	0.37	
20 ...	2000	40		0.23	0.21	0.2	0.16	0.37	
21 ...	2000	10		0.46	0.42	0.38	0.27	0.47	
**EN PEND>12%,MULTIP.POR				1.3	1.3	1.1	1	1	
**SOBRE CAMELLON(SURCO)									
A NIVEL MULTIPLICAR POR				0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
				0.063	0.056	0.049	0.049	0.126	
22 LABRANZA EN FRANJAS...	4500	60		0.12	0.1	0.09	0.08	0.23	
23 ...1/4 DEL ESPACIAMIENTO...	3400	50		0.16	0.14	0.12	0.11	0.27	
24 ...CURV.NIVEL	2600	40		0.22	0.19	0.17	0.14	0.3	
25 ...	2000	30		0.27	0.23	0.21	0.16	0.36	
FRIJOLES									
26 FRIJOLES DESP.DE.MAIZ...	AP			0.33	0.6	0.52	0.29	0.17	
27 ...LABRANZA CONVENC.	BP			0.39	0.64	0.56	0.31	0.18	
28 ...CON RESIDUOS	MP			0.45	0.68	0.6	0.31		
29 FRIJOLES DESP.DE.MAIZ...	AP	70		0.09	0.08	0.07	0.07	0.18	
30 ...LABRANZA REDUC. ***	BP	60		0.14	0.11	0.1	0.09	0.2	
31 ...	MP	50		0.17	0.16	0.15	0.13	0.29	
***PENDIENTE>12% MULTIPLICAR POR				1.3	1.3	1.1	1	1	
***SURCOS A NIVEL Y SOBRE CAMELLON MULTIP.PO				0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	

*1=RESIDUOS SOBRE EL TERRENO (LBS/ACRI 4500LB REPRESENTA UN RENDIMIENTO DE 6.3-7.8 TM de maíz
3400LB=4.4-6.2 Tm/ha;2600LB=3.8-4.6 Tm/ha;2000LB=2.5-3.7 Tm/ha

*2 CV=COBERTURA VEGETAL

AP= Alta productividad
BP=Buena productividad
MP=Mediana productividad
DP=Deficiente productividad

CUADRO 5.5
COEFICIENTES C DE LA USLE
PARA CULTIVOS PERMANENTES *1

COBERTURA VEGETAL TIPO Y ALTURA *2	COBERT DOSEL *3	COBERTURA EN CONTACTO CON SUPERFICIE						
		TIPO *4	PORCENTAJE DE COBERTURA					
			0	20	40	60	80	95+
NO APRECIABLE		G	0.45	0.2	0.1	0.042	0.01	0.003
		H	0.45	0.24	0.15	0.091	0.04	0.011
HIERBAS ALTAS O MALEZAS BAJAS CON CAIDA PRIMEDIO DE GOTAS DE 50 CM	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.01	0.003
		H	0.36	0.2	0.13	0.083	0.04	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.01	0.003
		H	0.26	0.16	0.11	0.076	0.04	0.011
	75	G	0.17	0.1	0.06	0.032	0.01	0.003
		H	0.17	0.12	0.09	0.068	0.04	0.011
MATORRAL BAJO CON CAIDA PROMEDIO DE GOTAS DE 1.95m	25	G	0.4	0.18	0.09	0.04	0.01	0.003
		H	0.4	0.22	0.14	0.087	0.04	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.01	0.003
		H	0.34	0.19	0.13	0.082	0.04	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.01	0.003
		H	0.28	0.17	0.12	0.078	0.04	0.011
ARBOLES CON NO APRECIABLES MALEZAS BAJAS Y CAIDA PROMEDIO DE GOTAS DE 3.9 m	25	G	0.42	0.19	0.1	0.041	0.01	0.003
		H	0.42	0.23	0.14	0.089	0.04	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.04	0.01	0.003
		H	0.39	0.21	0.14	0.087	0.04	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.01	0.003
		H	0.36	0.2	0.13	0.084	0.04	0.011

*1 Los valores de C son validos para cobertura natural distribuida al azar

*2 La altura del dosel es medida como la altura de caida de las gotas de lluvia sobre el terreno
El efecto es despreciable cuando la altura es mayor de 10m.

*3 Proyeccion vertical del dosel

*4 G=gramineas o similares, residuos compactados en descomposicion y de 5cm de espesor
H=hierbas de hoja ancha con pocas raices laterales y/o residuos no descompuestos

Cuadro 5.6

FACTOR C
(Segun informe EPTISA, ago 1986)
Subcuenca de Humuya

Tipo de Vegetacion	Valor C
Bosque pinar	0.01700
Bosque latifoliado	0.01400
Bosque Mixto (pino predominante)	0.02800
Bosque mixto (latifoliado predominante)	0.02300
Pasto cultivado	0.00544
Pasto natural	0.02880
Pasto natural con matorral	0.06470
Matorral del bosque de hoja ancha con altura < 5 m.	0.18130

Tomado del informe de geomorfologia (Corrales, 1990)

CUADRO 5.7

VALORES DE C PARA COBERTURA BOSCOSA
(WISCHMEIER & SMITH, 1978)

BOSQUE NO PERTURBADO

COBERTURA/COBERTURA FACTOR
DOSEL Y SUPERFICIAL C
SUB-BOSQUE MAYOR 5 cm

100-75	100-90	.0001-.001
70-45	85-75	.002-.004
40-20	70-40	.003-.009

CUADRO 5.8

BOSQUE QUEMADO

CONDICION DEL SUELO* Y COBERTURA VEGETAL**

COBERTURA SUPERF %	EXCELENTE		BUENO		REGULAR		POBRE	
	SV	VH	SV	VH	SV	VH	SV	VH
0	0.25	0.1	0.26	0.1	0.31	0.12	0.45	0.17
10	0.23	0.1	0.24	0.1	0.26	0.11	0.36	0.16
20	0.19	0.1	0.19	0.1	0.21	0.11	0.27	0.14
40	0.14	0.09	0.14	0.09	0.15	0.09	0.17	0.11
60	0.08	0.06	0.09	0.07	0.1	0.08	0.11	0.08
80	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05

* SUELO

EXCELENTE=MUY ESTABLE CON RAICES Y RESIDUOS

BUENO=MODERADAMENTE ESTABLE, TRAZAS DE RESIDUOS

REGULAR=ALTAMENTE INESTABLE, SIN RESIDUOS

POBRE=SIN SUELO SUPERFICIAL, SIN RESIDUOS

** COBERTURA HERBACEA

SV=SIN VEGETACION VIVA

VH= 75% CUBIERTO DE PASTO O HIERBAS CON CAIDA DE 50 cm.

5.2.5. Factor de práctica conservacionista P .

El factor de práctica conservacionista, P, refleja el efecto de las prácticas de conservación de suelos que tienden a modificar la topografía, tales como: terrazas, cultivos en franjas y curvas de nivel. El cuadro 5.9 presenta los valores más comunes de P, de acuerdo a la práctica conservacionista y la pendiente.

CUADRO 5.9		
VALORES DEL FACTOR " P " Y LIMITES DE LONGITUD DE PENDIENTE PARA CULTIVOS EN CURVAS DE NIVEL (Wischmeier y Smith, 1978)		
PENDIENTE (%)	valor de P	longitud * maxima(m)
1 a 2	0.6	120
3 a 5	0.5	90
6 a 8	0.5	60
9 a 12	0.6	36
13 a 16	0.7	24
17 a 20	0.8	18
21 a 25	0.9	15
* Estos limites pueden ser aumentados si la cobertura de residuos supera al 50%		
VALORES DE " P " PARA TERRENOS CON TERRAZAS Y EN CURVAS DE NIVEL		
PENDIENTE (%)	FACTOR DE CURVAS DE NIVEL **	FACTOR CULTIVOS EN FRANJA
1 a 2	0.6	0.3
3 a 8	0.5	0.25
9 a 12	0.6	0.3
13 a 16	0.7	0.35
17 a 20	0.8	0.4
21 a 25	0.9	0.45
** VALORES PARA EROSION ENTRE TERRAZAS		

5.3. LIMITACIONES DE LA USLE.

La USLE tiene varias limitaciones en cuanto a su utilización ya que la determinación de los parámetros de la misma, algunas veces tiene carácter subjetivo, dependiendo de la experiencia de la persona que la utiliza y de la información disponible.

5.3.1. El parámetro R.

Limitaciones conceptuales

El factor R, como se expresó anteriormente, representa la sumatoria de los valores de erosividad, representados por el factor EI, el cual es una función de la intensidad y volumen de la lluvia para un determinado evento; es lógico suponer, que tanto el detalle como la calidad de la información son determinantes en cuanto a la fidelidad de la determinación de R. El parámetro R representa el potencial de erosión. Su aplicación directa puede llevar a estimaciones exageradas de la erosión si no se considera las condiciones de humedad antecedente del evento en consideración. En el caso de planificación, habría que estimar la humedad antecedente y determinar un coeficiente de reducción de R. Esto no está previsto dentro de la ecuación, por lo tanto la erosión estimada se refiere a la erosión potencial.

El cuadro 5.10 presenta los resultados de una prueba con simuladores de lluvia con dos tratamientos: seco y húmedo. En todos los tratamientos la intensidad de la lluvia y la duración de la misma fueron iguales y en consecuencia el valor de R es igual para todos los casos. Puede observarse que en el tratamiento húmedo, con las mismas condiciones de suelo-cobertura, las pérdidas fueron mayores que en el tratamiento seco; esto indica por una parte que la humedad inicial es muy importante en la estimación de la erosión y por otra que los valores de R deberían ser afectados de acuerdo al grado de humedad que se supone tendrán los suelos en el momento del evento.

Limitaciones para el cálculo.

Otra de las grandes limitaciones R, es su obtención. La información necesaria para el cálculo de EI no está disponible para la mayoría de los casos. La información publicada más detallada es a escala diaria, sin embargo, desde hace muchos años, el Ministerio del Ambiente ha dejado de publicar los datos y la obtención de la misma es muy problemática. Por esas razones, muchos investigadores se han preocupado por obtener metodologías sencillas para estimar el valor de R, ya sea a escala anual o mensual.

Estimación de R con poca información.

Para aquellos casos en que no exista mucha información, es necesario utilizar metodologías que puedan ayudar a resolver el problema. Hay que aclarar que en estas circunstancias, los resultados obtenidos hay que utilizarlos con las reservas del caso. A continuación se presentan algunas metodologías que pudieran ser utilizadas :

CUADRO 5.10
RESULTADOS DE ESTUDIOS EN PARCELAS DE EROSION
CON SIMULADORES DE LLUVIA

	HUMED	LONG	PEND.	COBERT	PREC	R	K	C	ESTIM USLE	EROSION MEDIDA
		m	%\$	%	mm	mm	mm		T/Ha	T/Ha
SRI0	SECO	22.1	6.4	1	48	612.33	0.0408	1	15.489	8
SRI4	SECO	22.1	6.4	4	48	612.33	0.0408	0.4	6.196	3.22
SRI17	SECO	22.1	6.4	17	48	612.33	0.0408	0.24	3.717	0.7
SRI26	SECO	22.1	6.4	26	48	612.33	0.0408	0.17	2.633	0.13
SRI44	SECO	22.1	6.4	44	48	612.33	0.0408	0.088	1.363	0.03
SYI0	SECO	22.1	6.4	1	48	612.33	0.0408	1	15.489	8
SYI17	SECO	22.1	6.4	17	48	612.33	0.0408	0.24	3.717	4.42
SYI27	SECO	22.1	6.4	27	48	612.33	0.0408	0.17	2.633	1.52
SYI36	SECO	22.1	6.4	36	48	612.33	0.0408	0.12	1.859	0.66
SYI56	SECO	22.1	6.4	56	48	612.33	0.0408	0.054	0.836	0.03
SRW0	HUMEDO	22.1	6.4	1	48	612.33	0.0408	1	15.489	11.13
SRW4	HUMEDO	22.1	6.4	4	48	612.33	0.0408	0.4	6.196	9.93
SRW17	HUMEDO	22.1	6.4	17	48	612.33	0.0408	0.24	3.717	5.33
SRW26	HUMEDO	22.1	6.4	26	48	612.33	0.0408	0.17	2.633	2.5
SRW44	HUMEDO	22.1	6.4	44	48	612.33	0.0408	0.088	1.363	0.48
SYW0	HUMEDO	22.1	6.4	1	48	612.33	0.0408	1	15.489	11.1
SYW17	HUMEDO	22.1	6.4	17	48	612.33	0.0408	0.24	3.717	7.76
SYW26	HUMEDO	22.1	6.4	26	48	612.33	0.0408	0.17	2.633	2.51
SYW36	HUMEDO	22.1	6.4	36	48	612.33	0.0408	0.12	1.859	2.38
SYW56	HUMEDO	22.1	6.4	56	48	612.33	0.0408	0.054	0.836	0.43

NOTA

SYI = SOYA SECO ; SYW = SOYA HUMEDO

SRI = SORGO SECO ; SRW = SORGO HUMEDO

F.C. Finker, J.E. Gilley and G.E. Varbel

Runoff and Erosion as Affected by Sorghum and Soybean Residue

ASAE Summer Meeting, San Luis Obispo, 1986

a) Mapas de isoerodentas.

Los mapas de isoerodentas representan la mejor forma de estimar R cuando no se cuenta con datos locales. Estos mapas son obtenidos a partir de información detallada la cual es luego regionalizada mediante mapas de isolineas de R. La figura A6 del anexo A muestra un mapa de isoerodentas para la cuenca de la represa de El Cajón en Honduras. Los valores de estos mapas por lo general sólo representan el valor anual de R.

b) Estimaciones basándose en la lluvia mensual.

Los valores de EI son obtenidos mediante ecuaciones de regresión obtenidas con datos medidos. Las ecuaciones por lo general son del tipo:

$$EI_m = a + bP_m \quad (5.8)$$

en la cual :

Ei_m = es el valor del EI para el mes m (mm)

a y b son los parámetros de la ecuación y varían con la localidad

Páez et.al (1989) realizaron estudios al respecto en varias localidades de Venezuela obteniendo varias ecuaciones, las cuales se presentan en el cuadro 5.11.

Cuadro 5.11 Estimación de R para localidades de Venezuela					
ESTIMACION DE LOS VALORES DE "R" DE USLE PARA ALGUNAS LOCALIDADES DE VENEZUELA (Páez, et.al, 1989)					
Localidad	Obs	a	b	R2	EI30
San Felipe	108	-34.59	1.01	0.83	1003
Guanare	108	-15.82	0.93	0.85	1021
La Asunción	108	-25.17	1	0.85	525
Valle de la Pascua	108	-21.69	1.04	0.87	718
Aragua de Barcelona	108	-11.8	0.8	0.87	748
Maturín	108	-24.93	0.82	0.88	523
Valencia	108	-7.06	0.76	0.85	742
Yaritagua	96	-8.27	0.65	0.81	451
Todas		-19.05	0.88	0.81	
R = a + b*P					
en donde P = lluvia mensual					

Ecuaciones basadas en las lluvias extremas.

Otro método empleado en la estimación de R, utiliza los valores de la lluvia de 2 años y 6 horas, $P_{2,6}$, la cual puede ser obtenida de estudios de lluvias extremas o de mapas de profundidad-duración-frecuencia.

Este método es presentado por USDA ARS (1992) en el manual de la RUSLE. La mejor ecuación fue obtenida por Cooley et.al (1988). La ecuación es:

$$R = 22.17 * P_{2,6}^{2.56} \quad (5.9)$$

en la cual :

R = valor de R en **100ft-ton in/acre h**

$P_{2,6}$ = lluvia de 2 años y 6 horas (**pulgadas**)

para el sistema métrico la ecuación quedaría como:

$$R = 0.0956 P^{2.56} \quad (5.10)$$

en donde:

R = valor de R en **MJ mm/ha h**

$P_{2,6}$ = es la lluvia de 2 años y 6 horas en **milímetros**

En pruebas con datos de USA y de Honduras, fueron obtenidos muy buenos resultados. Jegat (1991) obtuvo resultados similares con la lluvia de 2 años y 24 horas.

c) Metodología del EPIC

El modelo EPIC presenta una metodología para obtener EI para eventos, basándose en la lluvia diaria. En el anexo D se presenta el método.

5.3.2 El parámetro K.

La precisión en la determinación del factor K dependerá de la información de suelo disponible, tanto en detalle como en representatividad. No será lo mismo aplicar valores de una muestra de suelos para una gran área, que para el área cercana al lugar de la muestra. Por otra parte, la determinación requiere de valores de la porción de arena muy fina, la cual es raramente presentada en análisis de suecos. Por otra parte, la permeabilidad y estructura, son parámetros muy subjetivos cuya evaluación depende mucho de la experiencia del edafólogo.

El cuadro 5.12 presenta valores de los parámetros necesarios para la determinación de K y los valores obtenidos considerando la porción de arena muy fina o ignorándola. Se puede notar que la diferencia es de un 39% menor que la real o sea que en ese caso la erosión se sub-estimaría.

El modelo EPIC utiliza una ecuación diferente en la cual no se necesita el valor de arena muy fina. En el anexo D se presenta la misma.

VARIACION DEL FACTOR "K" DE LA USLE AL NO CONSIDERAR LA FRACCION DE ARENA MUY FINA				
CARACTERISTICAS	MUESTRAS			
	1	2	3	4
ARENA %	50	47	42	37
LIMO %	38	40	45	47
ARCILLA %	12	13	13	16
ARENA MUY FINA	25	24	25	25
AMF+LIMO %	63	64	70	72
MAT ORG%	4	3.7	2.2	1.4
PERMEABILIDAD	2	2	3	3
ESTRUCTURA	3	3	3	3
K CON AMF	0.042	0.044	0.06	0.064
K SIN AMF	0.024	0.026	0.038	0.041
% ERROR	42.86	40.91	36.67	35.94

Cuadro 5.12. Variación de "K" y datos

5.3.3 El factor de cultivo C.

El factor C representa la relación entre la pérdida de suelo de una superficie sin vegetación, $C=1$, y la erosión con la cobertura en consideración. Wischmeier, 1978, presenta tablas con valores de C para varios cultivos en diferentes condiciones de siembra y manejo. El coeficiente C varía con el porcentaje de cobertura del dosel, así como por la cobertura superficial. Para un cultivo anual, C varía a lo largo del ciclo. El cuadro 5.3 presenta un resumen de valores de C, para los usos más comunes existentes y propuestos dentro de un proyecto. El cuadro 5.4 muestra los valores estacionales de C para una rotación de maíz-frijol.

Cuando se utilizan valores anuales de R, el factor C debe ser prorrateado de acuerdo a los valores parciales de EI en cada etapa de desarrollo del cultivo. El cuadro 5.6 muestra valores del informe de EPTISA, citado por Corrales (1990). Se observa que los valores de C para pasto cultivado son inferiores a los del bosque en general y los valores para pasto natural, son inferiores a todos los usos de bosque, excepto el bosque mixto con predominancia de latifoliadas. Los valores presentados en ese cuadro no indican el porcentaje de cobertura superficial para el cual fueron calculados; esto puede llevar a interpretaciones erradas, ya que de acuerdo a los valores indicados, la cobertura de pasto es mejor que la de bosque y consecuentemente la hipótesis del aumento de erosión por cambio de uso de bosque para pasto, quedaría negada.

5.3.4 El factor LS.

La USLE integra las condiciones de longitud de la pendiente, L, con la pendiente del terreno, S, en un parámetro, LS, que es dado por una ecuación o puede ser determinado gráficamente, tal como se indicó anteriormente.

La longitud de la pendiente, representa la longitud de recorrido del escurrimiento superficial hasta que éste es interrumpido o desviado por obstáculos en el terreno, tales como: cercas, zanjas, cambios de pendiente, terrazas, barreras, etc. La determinación de L, para condiciones naturales, es muy difícil necesitándose de una topografía muy detallada para realizarlo. Se pueden realizar aproximaciones utilizando fotografías aéreas o analizando la red de drenaje de la cuenca o área de trabajo.

Como la mayoría de los datos utilizados en el desarrollo de la ecuación provienen de parcelas de tamaño reducido, la utilización de valores altos de L implica una extrapolación que puede llevar a errores considerables. Por otra parte, para grandes áreas, será necesario utilizar valores medios, lo cual implica otros riesgos de imprecisión.

La pendiente, S, introduce otro elemento de incertidumbre cuando se trata de grandes áreas; de igual manera, hay que utilizar valores promedio, los cuales no necesariamente se compadecen con los valores promedio de L. La ecuación inicial para

calcular LS, fue desarrollada con pocos valores de pendientes superiores al 9%; esto implica que para valores superiores a 9%, el método sobre estima los valores de LS.

McCool, Wischmeier y Johnson, 1982, proponen una nueva ecuación para pendientes superiores al 9% la cual se expresa como:

$$LS = (L/22.13)^{0.3} * (s/9)^{1.3}$$

(5.11)

en la cual:

L= longitud en metros

s= pendiente en %

esta ecuación da valores menores de LS que la ecuación o diagrama original.

5.3.5 Factor de Práctica conservacionista, P.

El factor P, representa la relación entre la erosión producida sin ninguna práctica conservacionista, P=1, y la erosión producida con prácticas conservacionistas. El valor de P, depende del tipo de práctica y de la pendiente del terreno. Las medidas agronómicas de manejo de cultivo, tales como manejo de desechos, labranza en contorno, etc., no se incluyen en P. Los valores de P se refieren por lo general a: curvas de nivel, cultivos en fajas y terrazas; por lo general las terrazas van acompañadas de siembra en curvas de nivel y/o franjas.

5.4 Estimación de los sedimentos a partir de la USLE.

El método de la USLE sirve para estimar la erosión producida en un punto de la cuenca. Para estimar los sedimentos que llegan a un punto de interés, es necesario utilizar una metodología para el tránsito de los sedimentos. Williams (1977) desarrolló la MUSLE, basada en la USLE, la cual es una metodología para calcular los sedimentos y que puede ser utilizada con modelos hidrológicos sencillos que permitan obtener el pico de las crecidas y el volumen de la misma. La MUSLE se utiliza para calcular los sedimentos al nivel de eventos.

Para cuencas sin datos y pequeños proyectos, se pueden utilizar metodologías más sencillas para calcular el **factor de entrega**. El MARNR (1990) presenta una metodología sencilla la cual se basa en la utilización de las características de la cuenca para definir el porcentaje de sedimentos que llega al sitio de interés. Para aplicar la metodología, se utiliza el cuadro 5.13. El factor se estima prorrateando los valores parciales del mencionado cuadro.

Cuadro 5.13

Relación de Concentración de Sedimentos y Características de la Cuenca.

Características de La cuenca	Relación de concentración de Sedimentos		
	30%	60%	90%
Textura suelo	Gruesa	Mediana	Fina
Forma cuenca	Fondo llano	Forma de “U”	Forma de “V”
Densidad canales de drenaje	Baja	Mediana	Alta
Tamaño cuenca	1000 Km ²	100 Km ²	1 Km ²
Pendiente cauce	0-5 %	9-15 %	> 15 %
Tamaño cauce	Pequeño	Mediano	Grande
Desbordamiento	Extenso	Mediano	Grande
Erosión	Laminar, debido a cursos de agua intermitentes	Fondo del canal de torrentera	Fondo y paredes del canal de torrentera
Vegetación del canal de drenaje	De protección		Ninguna
Pendiente de la cuenca cerca del embalse	0-10 %	10-30 %	> 30 %

Tomado del Marnr, 1980

5.5 Estimación de sedimentos con la metodología del EPIC.

Como se mencionó en la introducción, el EPIC es un modelo que permite realizar varias estimaciones relacionadas con erosión, sedimentos y calidad del agua. El modelo incluye varias metodologías de cálculo entre ellas la USLE. El modelo será descrito en más detalle en el anexo D; aquí sólo trataremos de su uso como metodología sencilla.

El EPIC tiene dos grandes diferencias con la USLE. La primera y más importante es la de ser un modelo diario y la segunda es que se ha tratado de mejorar los problemas de estimación de la

USLE, en especial el del factor de erosividad de la lluvia. En ese sentido, el modelo presenta seis

metodologías: USLE, Onstad – Foster, MUSLE, MUST, MUSS y MUSSI. Todas esas metodologías, excepto la USLE, consideran que el principal factor de erosividad es el producto de la escorrentía total y el pico de la misma (Q_{qp}). Las ecuaciones que proporcionan los mejores resultados son la MUSLE y la MUST.

La MUSLE se define como:

$$Y = 1.856 (Q \cdot qp)^{0.56} A^{0.12} KCPLS \quad (5.12)$$

La MUST se define como:

$$Y = 2.5 (Q * qp)^{0.5} \quad (5.13)$$

En donde:

Y = sedimentos a la salida de la cuenca (t/ha)

KCPLS son los mismos factores de la USLE

Q = es la esorrentía total del evento (mm)

Qp = es el pico del evento (mm/h)

A = área en hectáreas.

La MUSLE y la MUST se pueden utilizar para evaluar eventos o se pueden aplicar a un período en particular, por ejemplo al ciclo de un cultivo.

5.6. Ejemplo de cálculo con la USLE

El cuadro 5.14 presenta un resumen de las características del área de la cuenca de drenaje de una pequeña represa. Se requiere estimar los sedimentos para determinar su influencia sobre la vida útil de la represa.

Estimación de la erosión

a) **Factor R.** En un mapa de isoerodentas se determina un valor de R=6000

b) **Factor K.** En el cuadro 5.14 se presenta el resultado de la estimación. Por ser más exactos, se toman los valores obtenidos de la figura 5.2. Suelo “A” : K=0.042 ; suelo “B” :K=0.064 .

c) **Factor LS.** Tomando un valor de L=50 m. (suelos ondulados) y m=0.3 se obtiene: para el suelo A

$$L = (50/22)^{0.3} = 1.28$$

el valor de S será:

$$S = 0.065 + 0.045 * 3 + .0065 * 3^2 = 0.2585$$

$$LS = 1.28 * 0.2585 = 0.33$$

para el suelo B, LS será:

$$L = (50/22)^{0.3} = 1.28$$

el valor de S será:

$$S = 0.065 + 0.045 * 2 + .0065 * 2^2 = 0.181$$

$$LS = 1.28 * 0.181 = 0.232$$

Cuadro 5.14. Información para ejemplo de estimación de sedimentos.

Cuenca de 600 has con las siguientes características:

Longitud del cauce = 3 Km.

Erosividad = 6000 KJmm/ha h

Pendiente del cauce 2.5 %

Características de las tierras	Suelo A (40 %)	Suelo B (60%)
Textura	Franco	Franco
Arena %	50	37
Limo %	38	47
Arcilla %	12	16
Arena muy fina %	25	25
AMF + Limo %	63	72
Materia orgánica %	4	1,4
Permeabilidad	Moderada rápida	Moderada
Estructura	Media	Media
Pendiente	3	2
Vegetación	Arboles com 50%de cobertura y 60% de hierbas	Matorral bajo con 50% de cobertura y gramíneas con 40% de cobertura
Relieve	Ondulado	Ondulado
Calculos y resultados		
Permeabilidad (Fig B1)	2	3
Estructura (Fig. B1)	3	3
Resultados:		
K com Fig B2	.042	.064
K com cuadro B1	.038	.047

d) Factor C

Para el suelo A, el factor C tomado del cuadro 5.5 será $C = 0.082$

Para el suelo B, el factor C tomado del cuadro 5.5 será $C = 0.07$

e) Factor P

Como no hay prácticas conservacionistas $P = 1$

f) Cálculo de las pérdidas de suelo:

Para el área de suelo A será:

$$T = 6000 * 0.042 * .33 * .082 * 1 = 6.82 \text{ ton/ha}$$

Para el área de suelo B será:

$$T = 6000 * 0.064 * .232 * .07 * 1 = 6.24 \text{ ton/ha}$$

Estimación de los sedimentos en la represa.

De acuerdo a los datos de la cuenca, esta tiene 6 Km^2 , o sea 600 has. Con la información suministrada y aplicando la metodología del cuadro 5.13, se obtiene:

Textura mediana	60%
Forma, forma de U	60%
Densidad de los canales, mediana	60%
Tamaño, pequeño	90%
Pendiente	30%
Tamaño del canal de drenaje, pequeño	30%
Desbordamiento, limitado	90%
Erosión, laminar	30%
Media	56.25

Lo anterior indica que el 56.25% de los sedimentos producidos, son depositados en la represa. Los sedimentos anuales que llegan a la represa serán :

a) Suelo A, 40% = $600 * .4 = 240$ has.

$$\text{Sedimentos} = 6.82 * 240 * .56 = 916.6 \text{ toneladas/ año}$$

b) Suelo B, 60% = $600 * .6 = 360$ has.

$$\text{Sedimentos} = 6.24 * 360 * .56 = 1258 \text{ toneladas/ año}$$

El total de sedimentos es:

$$\text{total sedimentos} = 916.6 + 1258 = \mathbf{2174.6 \text{ toneladas por año}}$$

Volumen de sedimentos.

El volumen de sedimentos se calcula considerando la densidad de los sedimentos. Si consideramos una densidad aparente de 1.3 g/cm^3 , esto significa que un metro cúbico de sedimentos pesa 1.3 toneladas. Para el ejemplo se obtiene:

$$\text{Volumen} = 2174.6 / 1.3 = \mathbf{1672.76 \text{ m}^3 \text{ de sedimentos por año}}$$

5.5.1 Utilización del Modelo EPIC

El modelo EPIC, el cual se describe en el capítulo 7, representa una metodología más avanzada en el cálculo de la erosión y sedimentos. Entre sus ventajas se encuentran: a) utilización de información diaria lo cual mejora el cálculo y simplifica la obtención de la erosividad de la lluvia EI; b) Realización de balances hídricos diarios para incluir el efecto de la humedad del suelo; c) cálculo de sedimentos por eventos; d) estimación continua del valor C y e) actualización de los parámetros del suelo.

En el anexo D se presenta el modelo EPIC en más detalle.

6. MODELOS HIDROLOGICOS.

6.1. Introducción.

Los modelos hidrológicos constituyen hoy día una de las herramientas más útiles en la planificación de Recursos Hidráulicos. El rápido desarrollo de la industria de la computación ha hecho posible que los micro-computadores sean cada vez más accesibles y con mayor capacidad para manejar programas complejos y voluminosas bases de datos en menor tiempo que lo que era posible en los años sesenta cuando se iniciaron los primeros modelos digitales.

En la actualidad existe una infinidad de modelos hidrológicos con aplicaciones diversas. James y Burges (1982) señalaban la existencia de más de 80 modelos, publicados en diferentes revistas técnicas y otras publicaciones; si a esto le agregamos los modelos no publicados y el tiempo transcurrido, esa cifra puede ser bastante elevada. Una lista de modelos en el campo ecológico publicada por la Universidad de Kassel (1999) indica un total de 592 modelos registrados y en dicha lista no aparecen algunos modelos conocidos. De esos modelos, 170 son modelos hidrológicos, 12 estiman erosión y 9 calculan sedimentos.

El tema de los modelos es muy amplio y ameritaría un texto aparte para describirlo. En este capítulo sólo se hará una descripción somera de los conceptos principales.

6.1.1 Clasificación de los modelos.

Los modelos pueden ser clasificados de diferentes maneras: a) por escala de tiempo, b) por su utilización, c) por su complejidad y base conceptual, y d) por el tamaño de la cuenca. Esas clasificaciones no son excluyentes y por lo tanto un modelo puede encajar en todas las categorías.

Por la escala de tiempo, los modelos pueden ser clasificados como de **eventos** y **continuos**. Los modelos continuos son clasificados como **instantáneos**, **diarios** y **mensuales**. Por su utilización, los modelos pueden ser: **hidrológicos**, de **calidad de agua**, de **erosión**, de **productividad**, etc. Por la complejidad, base conceptual y forma, pueden ser **sencillos** o **complejos**, **físicos**, **paramétricos**, **estocásticos**, **distribuidos**, etc. Finalmente pueden ser para **parcelas**, **pequeñas cuencas** y **grandes cuencas**.

De todas esas clasificaciones, la más generalizada es la de su utilización o aplicación. En el cuadro 6.1 se presenta una lista de algunos modelos utilizados en la actualidad.

6.2 Componentes y fases desarrollo de un modelo.

El desarrollo de un modelo comprende varios aspectos tales como: a) Modelo conceptual, b) Simulación de procesos, c) Diagrama de flujo, d) Modelo matemático, e) programa de computación, f) prueba de sensibilidad, e) El modelo operativo

6.2.1 El modelo conceptual.

Un modelo hidrológico trata de representar los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca, desde la caída de la lluvia sobre la superficie de la misma, su transformación en escorrentía y su pasaje por el punto de medición. El modelo conceptual constituye la forma como se concibe la representación de la realidad. De esa manera, el modelo conceptual puede ser desde muy sencillo hasta uno extremadamente complicado. Los primeros modelos hidrológicos, simulaban sólo la escorrentía y por ello eran muy sencillos en su concepción. Los modelos más sencillos son los de eventos para pequeñas cuencas, en este caso, el modelo conceptual se limita a simular los procesos de las relaciones precipitación – escorrentía.

Para representar esos procesos es necesario recurrir a analogías que puedan ser manejadas de una manera más conocida y comprensible. Los modelos analógicos, por ejemplo, representaban los procesos y transferencias dentro de la cuenca como si estos conformaran una serie de circuitos eléctricos. La figura 6.1 presenta los procesos hidrológicos, para un evento de precipitación, como una serie de tanques a través de los cuales se simulan los almacenamientos; las transferencias o flujos son simulados como orificios de salida de esos almacenamientos. La figura 6.1 representa un **modelo conceptual**, para un modelo de eventos.

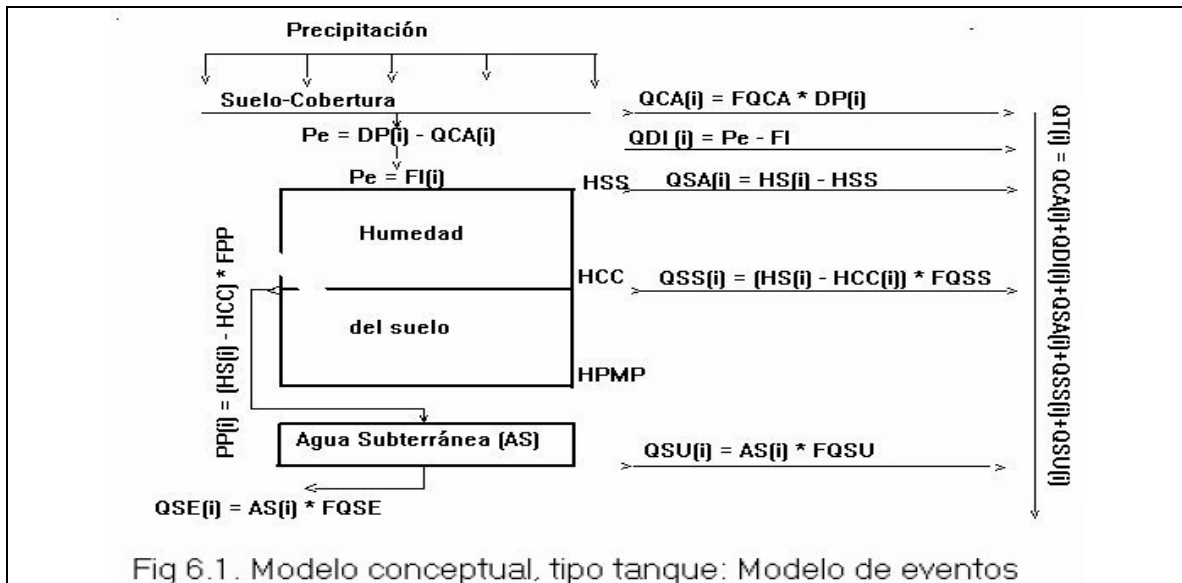


Fig 6.1. Modelo conceptual, tipo tanque: Modelo de eventos

Los modelos actuales presentan tres formas principales del modelo conceptual. La primera tiene que ver con la manera de cómo se concibe la cuenca, la segunda la forma cómo se conceptualiza la unidad de simulación y la tercera la manera como se transitan los flujos hasta la salida de la cuenca. Entendiéndose como unidad de simulación aquella que presenta una cierta homogeneidad para la mayoría de los procesos.

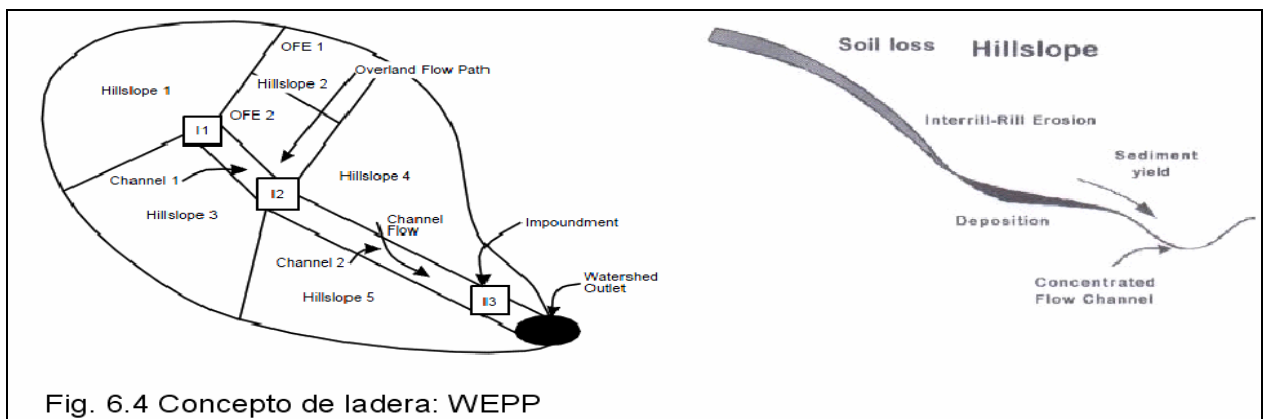
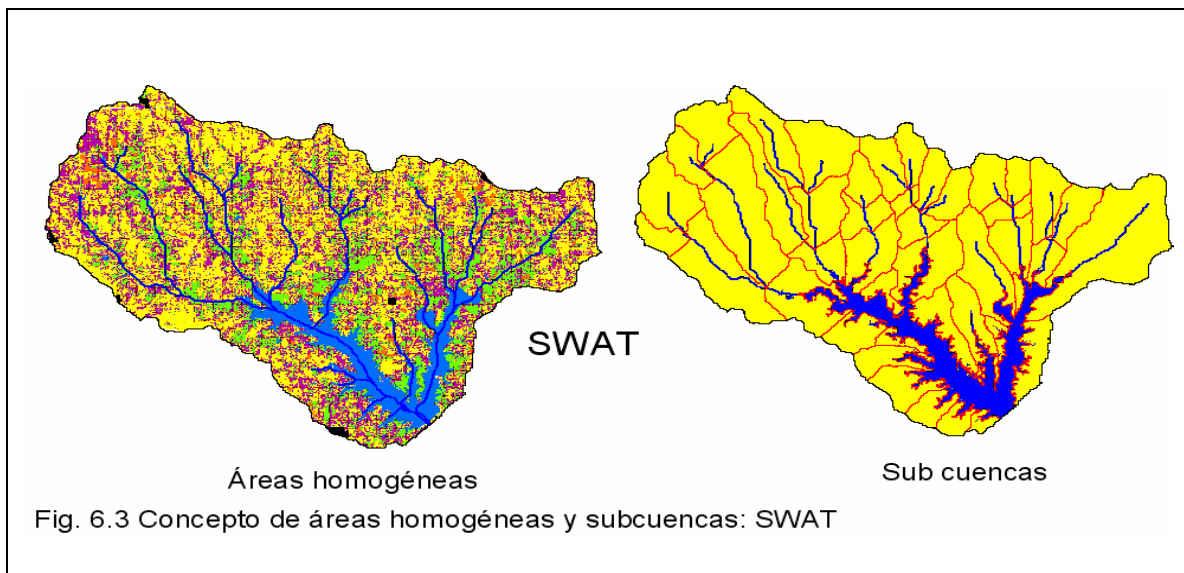
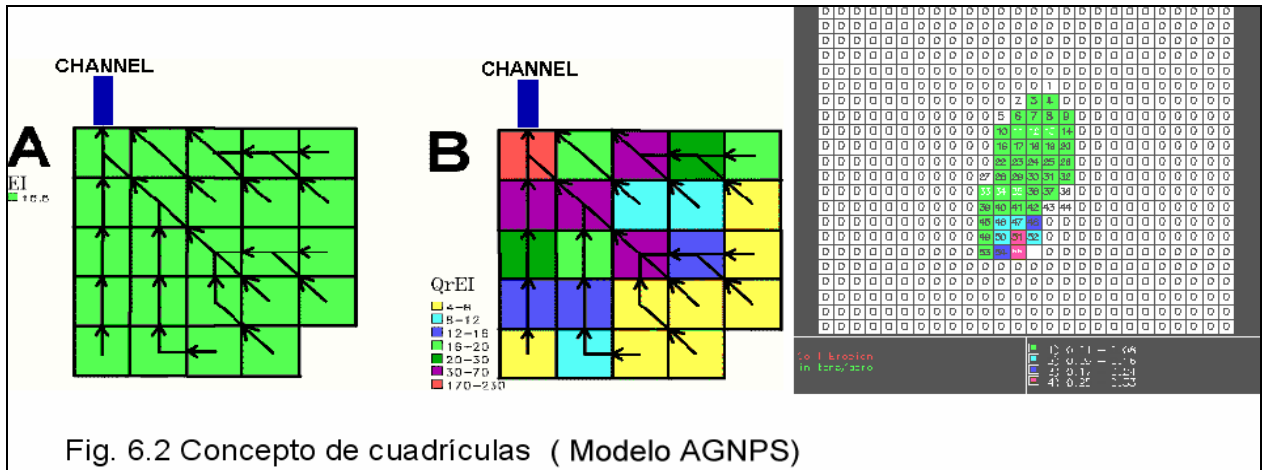
La **concepción de la cuenca** tiene tres formas principales de representación: a) cuadrícula o celdas, b) sub-cuencas o sub-áreas y c) laderas. Las figuras 6.2 a 6.4 muestran ejemplos de esas tres formas.

La **cuadrícula** trata de representar la cuenca como una serie de **celdas** las cuales generan flujos los cuales pasan a las celdas vecinas de acuerdo a los gradientes hídricos. Esos flujos son interceptados por los cauces naturales formando la escorrentía, la cual es transitada a través de los cauces. Cada celda representa un área homogénea. Este concepto es generalmente utilizado por modelos que tienen interfaces con sistemas de información geográficos (SIG). Un ejemplo de ello lo constituye el modelo AGNPS. La figura 6.2 muestra lo anterior.

Las **subcuencas o sub-áreas** subdividen la cuenca en áreas homogéneas las cuales se conectan a los cauces. La escorrentía generada en esas áreas, se transita por los cauces hasta la salida de la cuenca. En esta categoría entran los modelos: SWRRB y SWAT. La figura 6.3 presenta un ejemplo.

Las **laderas** constituyen unidades de simulación homogéneas en las cuales la escorrentía es interceptada por cauces no permanentes. En esta forma, la escorrentía formada en la parte superior de la ladera, atraviesa la misma hasta el cauce. De esa manera, una cuenca puede estar formada por un mínimo de una ladera y un cauce. El único modelo que utiliza esta forma, es el WEPP. La figura 6.4 muestra este modelo conceptual.

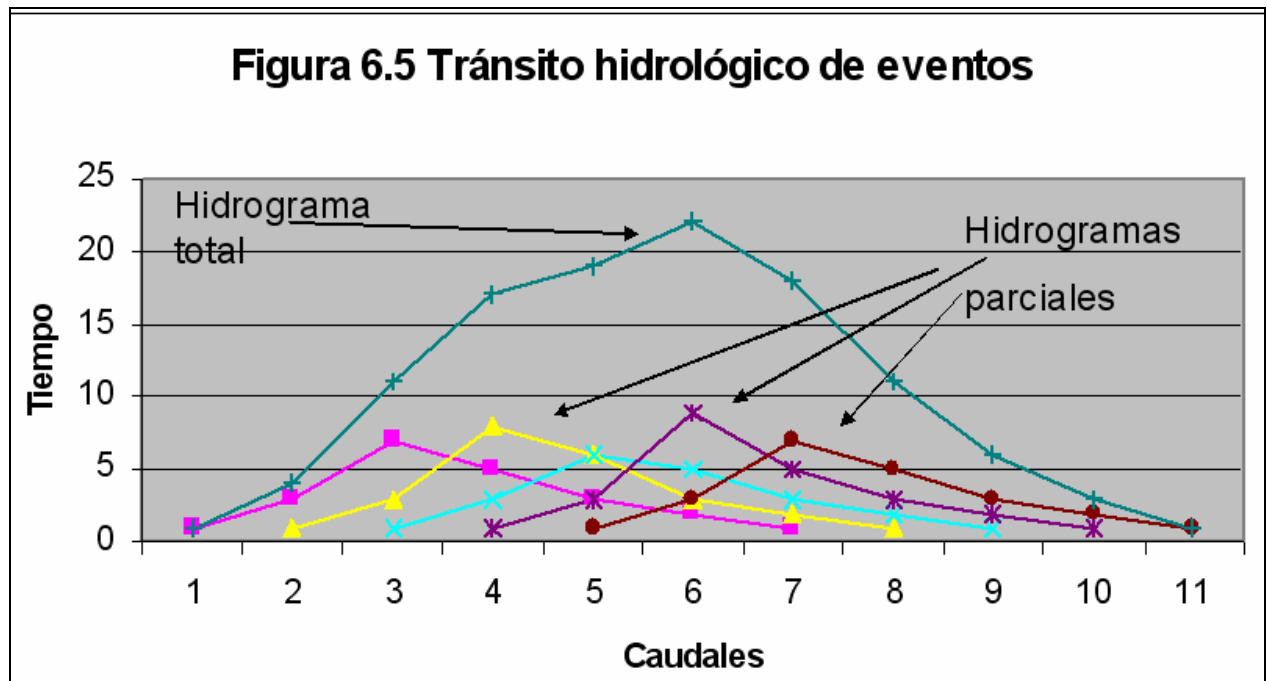
La conceptualización de las unidades de simulación puede hacerse de diferentes maneras y por lo general se compatibiliza con el modelo conceptual de la cuenca, con la escala de tiempo del modelo y con los procesos simulados. Por ejemplo, en un modelo de eventos para cuencas pequeñas no se simula la evapotranspiración y el agua subterránea puede no considerarse. Por otra parte puede que ese mismo modelo simule la erosión y por consiguiente habrá que incluir ésta en el modelo conceptual.



Todos los modelos de pequeña escala de tiempo, deben incluir el **tránsito de la escorrentía** desde el punto de origen hasta la salida de la cuenca. El tránsito es realmente importante en los modelos de eventos y en modelos diarios para cuencas en las cuales el agua subterránea

sea de importancia o el tiempo de concentración sea mayor de 6 horas. Las formas más comunes de tránsito son: a) tránsito hidrológico, b) tránsito hidráulico y c) tránsito de almacenamientos.

Los **tránsitos hidrológicos** por lo general utilizan hidrogramas unitarios sintéticos. Para cada intervalo de tiempo de simulación se calcula un hidrograma. El hidrograma transitado será la sumatoria de los hidrogramas parciales. La figura 6.5 ilustra el método del tránsito hidrológico. Los **tránsitos hidráulicos** utilizan ecuaciones basadas en la onda cinemática o la ecuación de Saint Venant. Por su parte las **tránsitos de almacenamiento** utilizan los principios del tránsito en embalses, en esta categoría, el método más conocido es el de Muskingum.



6.2.2. Simulación de los procesos.

Una vez definido el modelo conceptual, es necesario escoger las metodologías que mejor se adapten a la simulación de los procesos. Esto dependerá del tipo y escala del modelo. Los principales procesos a simular son: a) entradas, b) almacenamientos, c) transferencias y salidas. En los modelos hidrológicos, esos procesos se refieren sólo al agua; en modelos más complejos como los de calidad de agua, esos procesos incluyen el flujo o movimiento de sustancias químicas y microorganismos. En el tema relacionado con Balances hídricos diarios, se detallan todos los procesos hidrológicos.

Por ejemplo, para simular el proceso de evapotranspiración, se pueden utilizar varias metodologías, tales como Penman o Hargreaves. Para simular la infiltración en modelos diarios, se utilizan metodologías tales como la fórmula de Green-Ampt o el Número de Curva.

Es importante señalar que las metodologías escogidas para la simulación de procesos deben ser consistentes con la escala de tiempo del modelo; por ejemplo, para un modelo mensual no se pueden utilizar ecuaciones de infiltración pues éstas son para eventos. Aún para modelos diarios, las ecuaciones de infiltración tradicionales no funcionan bien y hay que adaptarlas.

6.2.3 El Diagrama de flujo.

El diagrama de flujo representa una forma de ordenar los cálculos y comandos a ser realizados por el modelo. Mediante ese diagrama se programa la secuencia de cálculo y se plantean las condicionantes para la ejecución de comandos. El diagrama es de suma importancia y puede considerarse como el corazón del modelo. De una manera general, el diagrama de flujo tiene cuatro grandes componentes: a) Entradas, b) manejo de datos, c) programa principal y d) salidas. La figura 6.6 presenta un ejemplo de un diagrama de flujo para el componente de hidrología (SWAT).

6.2.4 El Modelo matemático.

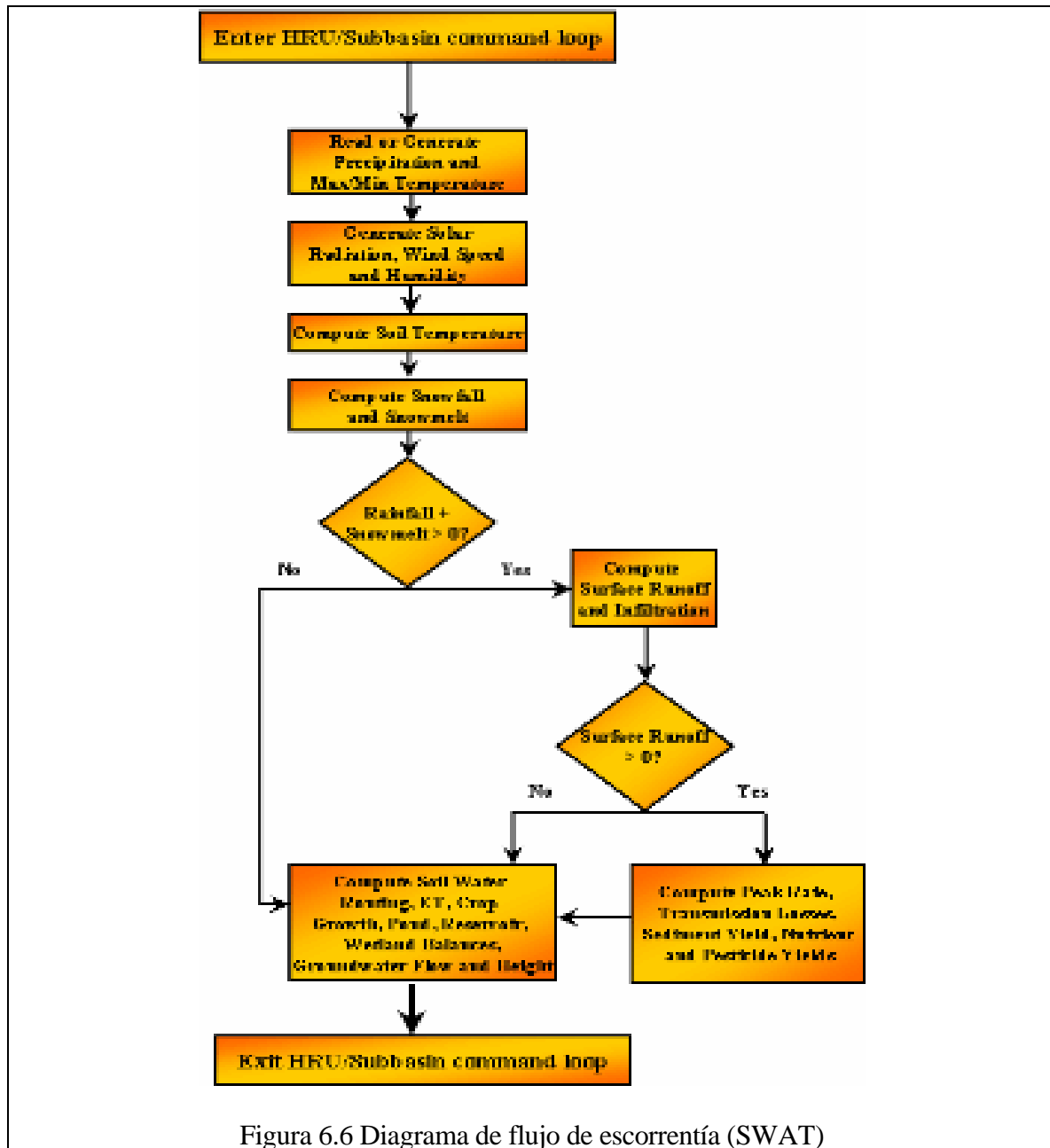
El modelo matemático es el conjunto de formulaciones matemáticas que representan los procesos, flujos y almacenamientos esquematizados en el modelo conceptual y ordenado dentro del diagrama de flujo. El modelo matemático estará formado por un conjunto de ecuaciones agrupadas de acuerdo a una cierta secuencia y controladas por una serie de condicionantes.

A manera de ejemplo se puede indicar el **proceso de la infiltración** en un modelo de eventos. En el supuesto de que la infiltración sea simulada con una ecuación tipo Horton:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (6.1)$$

en la cual la infiltración instantánea, **f**, es una función del tiempo y condiciones iniciales. En el caso de que la intensidad de lluvia en un cierto intervalo de tiempo sea menor que **f** y el almacenamiento superficial sea cero, entonces la infiltración real ya no será **f**, sino que será igual a la precipitación; en ese caso habrá que introducir una condición de:

$$\text{si } f > p \text{ y almacenamiento superficial} = 0 \text{ entonces } f = p$$



por otra parte, al finalizar la lluvia, la infiltración cesa y por lo tanto habrá que indicar:

si $p=0$ entonces $f=0$

En el modelo representado en la figura 6.1 se observa que tanto el flujo sub-superficial, **QSS**, como la percolación, **PP**, dependen de la humedad del suelo. Para que

estos flujos ocurran, la humedad del suelo, **HS**, debe ser mayor que la capacidad de campo, **CC**. Para expresar lo anterior, se escribe un comando así:

Si $(HS-CC) > 0$ entonces $PP = KP * (HS-CC)$

Si $(HS-CC) > 0$ entonces $KQSS = KQSS * (HS-CC)$

En las cuales **KQ** y **KQSS** son parámetros del modelo. Los controles lógicos como los anteriores y las formulaciones matemáticas como la ecuación 6.1 conforma el modelo matemático el cual puede ser representado gráficamente mediante un diagrama de flujo tal como lo muestra la figura 6.6.

El modelo matemático, para que pueda ser interpretado por la computadora, debe ser escrito en un lenguaje de programación.

6.2.5 El programa de computación.

El modelo matemático y el conjunto de instrucciones para: manejar los datos, ejecutar sub-rutinas opcionales e impresión de resultados conforman **el programa de computación** el cual puede ser escrito en un lenguaje tipo Fortran, Basic, Pascal, C++, etc.

Cuando un programa está elaborado para que pueda ser utilizado por cualquier usuario, se le denomina **programa operativo** o **modelo operativo** y por lo general está acompañado de un manual para su operación. La figura 6.7 presenta un diagrama del procesamiento de la información de los modelos en general. En términos generales son necesarios tres módulos: a) entrada de datos, b) modulo de procesamiento o modelo y c) módulo de presentación de resultados

6.2.6 Prueba de sensibilidad del modelo.

Los modelos obedecen a la forma como han sido concebidos y programados, sin embargo puede que ciertos parámetros o variables que hayan sido considerados como relevantes, en la realidad no lo sean. Para verificar esto, es necesario realizar una prueba de sensibilidad. Para ello, se ejecuta el modelo cambiando parámetros y variables a fin de constatar la respuesta a esos cambios. Si en este proceso se detecta poca sensibilidad, se pueden realizar cambios para perfeccionar el modelo.

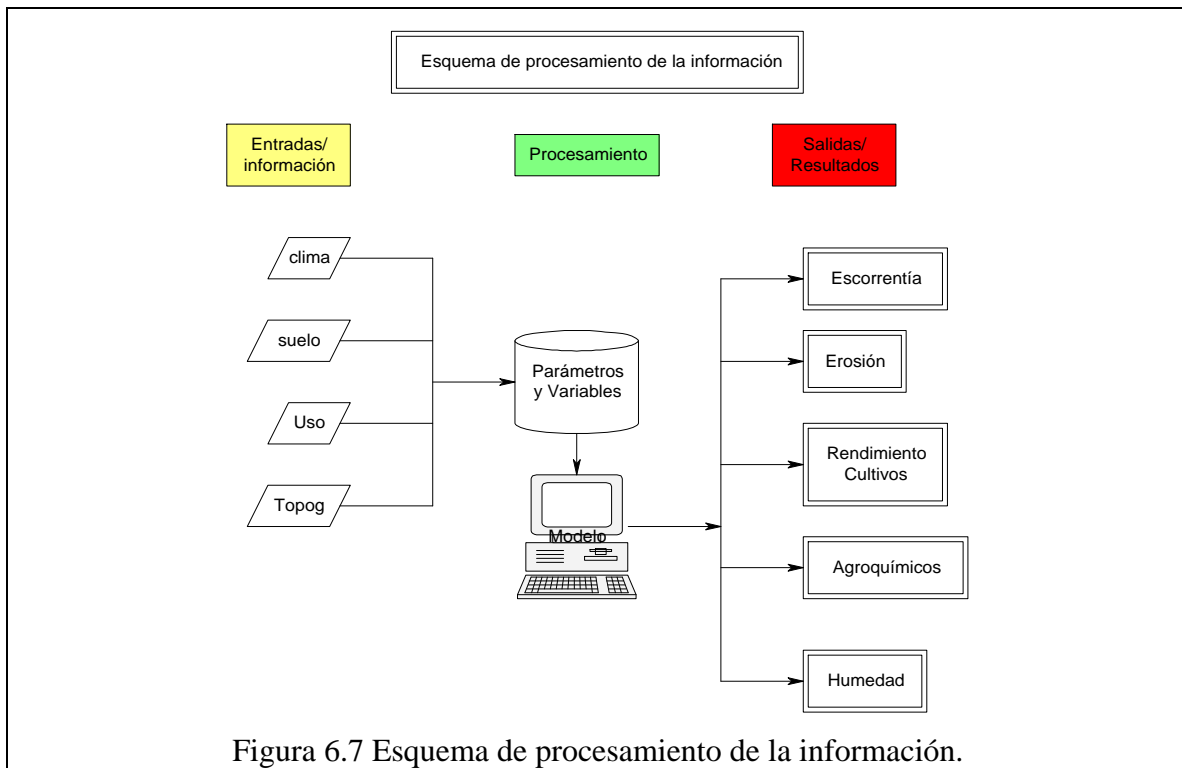


Figura 6.7 Esquema de procesamiento de la información.

6.2.7. El modelo operativo.

El modelo final puede funcionar perfectamente, sin embargo para que pueda ser utilizado extensivamente por los usuarios del mismo, es necesario que éste tenga instrucciones suficientemente completas para su entendimiento por los usuarios. Lo anterior se logra con instrucciones internas del modelo y con manuales de uso. Con la popularización del sistema Windows, se ha facilitado esta fase del modelo. Los modelos programados con interfaces para Windows, por lo general tienen módulos o “ventanas” para diversos fines tales como: introducción de datos, ejecución del programa e impresión de resultados y programas de ayuda.

6.3 Calibración y validación de los modelos.

Es muy difícil crear y ejecutar modelos perfectos y con basamento físico confiable. En primer lugar cualquier cuenca medianamente grande es heterogénea. Esa heterogeneidad conlleva a que sea difícil contar con toda la información necesaria. Es por ello que muchos modelos utilizan parámetros y “redondean valores” para poder simular los procesos.

Los modelos paramétricos, contienen parámetros específicos de las cuencas que deben ser calibrados. La calibración sólo se puede lograr con datos reales medidos. Existen varios métodos de calibración, siendo que todos ellos tienen en común el de tratar de ajustar los valores simulados con los medidos mediante el cambio de valores de los parámetros utilizando métodos de intento y error o con calibraciones automáticas. La calibración permite utilizar el modelo para extender los registros y para simular cambios dentro de la

cuenca. Cuando se cuenta con información de muchas cuencas calibradas, se pueden regionalizar los parámetros para poder utilizar los modelos en cuencas sin datos.

Por su parte la validación de los modelos consiste en correr los mismos para cuencas con datos y verificar su comportamiento. La validación permite comprobar las bondades del modelo y establecer su grado de confiabilidad y rangos de utilización. Por otra parte, la verificación de los modelos permite realizar ajustes en las metodologías de simulación de procesos utilizadas dentro de los mismos.

Los parámetros más comunes que necesitan ser calibrados son aquellos que condicionan las variables de: infiltración, agua subterránea, cobertura, evapotranspiración, humedad del suelos, entre otros. La figura 6.8 muestra la calibración de un modelo de un modelo diario.

6.3 Modelos existentes.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad existen muchos modelos hidrológicos. El cuadro 6.1 presenta una lista de los modelos hidrológicos más utilizados en la actualidad. El cuadro 6.2 muestra un resumen de las características de los modelos más conocidos en Venezuela. La mayoría de esos modelos pueden ser utilizados si se cuenta con la información pertinente y el equipo de computación requerido.

La utilización de modelos hidrológicos en Venezuela se remonta a los años setenta con la implementación del modelo Standford V en algunas cuencas, en especial la cuenca del río Uribante. El antiguo Ministerio de Obras Públicas (MOP) fue la primera Institución en utilizar ese modelo. Luego de ese inicio, en la Universidad Simón Bolívar, El CIDIAT y la Universidad de Los Andes, se realizaron algunos esfuerzos para utilizar modelos hidrológicos en cuencas con datos. Para manejo de cuencas, y en especial para cuencas sin datos o con pocos datos, el número de modelos es reducido y en Venezuela por lo general muy pocos han sido aplicados. Recientemente se han utilizado los modelos SWRRB, EPIC y SWAT, Hec-hms, en cuencas sin datos.

En el anexo D se presentan algunas características del modelo EPIC y se muestra una evaluación preliminar del mismo. En el anexo E se hace un resumen de los modelos SWAT y Hec-hms.

6.4 Utilización de los modelos.

La importancia de los modelos radica en que estos, una vez calibrados o validados, pueden ser utilizados para simular diversas situaciones o para extender la información existente. En manejo de cuencas tienen gran utilidad ya que se puede simular la respuesta de la cuenca a cambios de uso de la tierra y a la construcción de obras hidráulicas. La figura 6.8 muestra la calibración de un modelo hidrológico diario en donde puede notarse la buena concordancia entre los valores medidos y los simulados. En el anexo D se muestra la utilización del modelo EPIC.

Las figuras 6.9 y 6.10 presentan el resumen de un modelo de eventos, preparado en una hoja de cálculo, para una cuenca pequeña. La primera figura muestra la calibración del modelo, representando la situación actual. Puede notarse la buena calibración del mismo. La segunda muestra la situación cambiando la vegetación. La figura 6.10 muestra un esquema de utilización de modelos cuando hay pocos datos y la figura 6.11 presenta la utilización de un modelo para generar caudales mensuales.

Cuadro. 6.1 Lista de Algunos Modelos Hidrológicos

AGNPS:	Agricultural Non-Point Source pollution model
AQUAMOD:	AQUAMOD
AQUASIM:	Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems
ARTIC:	DEVELOPMENT OF A PHYSICALLY BASED, SPATIALLY DISTRIBUTED HYDROLOGIC MODEL FOR AN ARCTIC REGION
ASM:	Aquifer-Simulations-Model
CEMOS_WATER:	CemoS/Water - steady state model for chemical in rivers
CLIMAK:	CLimate MAKer - stochastic generator of daily weather data
CREAMS:	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
DEEP_PERCOLATION:	DEEP PERCOLATION MODEL
DRAINMOD:	Drainmod
EPIC:	Erosion-Productivity Impact Calculator
ERHYM:	Elakala Rangeland Hydrology and Yield Model
EROSION_2D:	model for erosion on slopes
GLEAMS:	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems
Hec-hms	Hydrologic Engineering Center (HEC), Hydrologic Modeling System (HMS)
HSPF:	Hydrological Simulation Program – FORTRAN
HUMUS:	Hydrologic Unit Model of the United States
HYRROM:	Hydrological Rainfall Runoff Model
KINEROS:	Examine infiltration and surface runoff and erosion
MACPET_TX:	SOFTWARE TO CALCULATE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION
NAVMO_2:	NAVMO_2 - precipitation-runoff-evapotranspiration
NIEDD:	NIEDD - rainfield model

Cuadro. 6.1 Lista de Algunos Modelos Hidrológicos (cont)

PERFECT: Productivity, Erosion and Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques
PRMS: Precipitation - runoff modeling system
QUAL2E: The Enhanced Stream Water Quality Model
RIBASIM: Ribasim 6.0 - River Basin Simulation model.
RUNOFF1: A simplified hydrological runoff model
RZWQM: Root Zone Water Quality Model
SOILPARA: SOIL PARAMeter Estimator - Software to determine hydraulic properties of unsaturated/saturated soils
SOILWAT: Soil Water Model
STREAM: STREAM (Segment Travel River Ecosystem Autograph Model)
SWAT: Soil and Water Assessment Tool
SWIM: Soil and Water Integrated Model
SWIM2: SWIM - Soil Water Infiltration and Movement
SWMM: Storm Water Management Model
SWRRBWQ: Simulator for Water Resources in Rural Basins-Water Quality
TOPMODEL: catchment water discharge and soil water
WEPP: Erosion Prediction Model
WGEN: Weather Generator

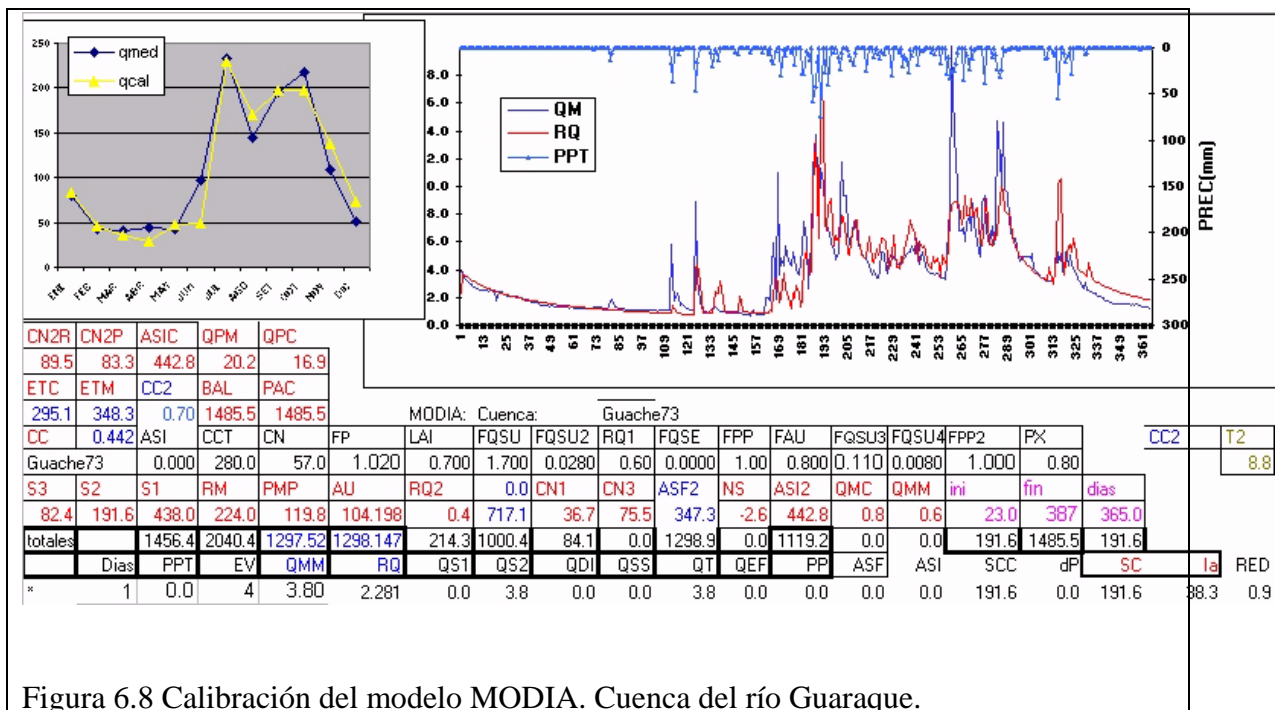


Figura 6.8 Calibración del modelo MODIA. Cuenca del río Guaraque.

Cuadro 6.2

Algunos Modelos de dominio público disponibles que pueden utilizarse en Manejo de cuencas

Modelo	Autor	Escala	Uso Principal	Datos	Observaciones
EPIC	J.R Williams	Modelo diario para parcelas	Estimación de escorrentía, erosión y calidad de agua	Clima diario, suelos, uso de la tierra, topografía	DOS. Interfase I EPIC
APEX	J. R Williams	Diario para pequeñas cuencas	Estimación de escorrentía, erosión y calidad de agua	Clima diario, suelos, uso de la tierra, topografía	DOS
WEPP	Purdue University	Diario para parcelas y cuencas	Estimación de erosión	Clima diario, suelos, uso y topografía	Windows
SWAT	J. R Williams y otros	Diario para cuencas grandes	Estimación de escorrentía, erosión y calidad de agua	Clima diario, suelos, uso de la tierra, topografía	DOS/Windows/Arc View
SPA W	Saxon y otros. USDA-ARS	Diario para parcelas	Escorrentía y calidad de agua, balance hídrico productividad de cultivos	Clima diario, suelos, uso	Windows
GAPS	Cornell University	Diario parcelas	Escorrentía, productividad, competencia de dos cultivos	Clima diario, suelos, cultivos	DOS/Windows
Hec-Hms	US Corp of Engineers	Eventos en cuencas	Hidrograma de crecidas	Lluvia de diseño, datos fisiográficos	Windows/Arc View
CropWat	FAO, IIDS, NWRC	Demandas de riego	Calculo de demandas de riego	Clima mensual, cultivos, suelo	Windows
Caudal3	Robredo	Eventos en cuencas	Hidrograma de crecidas, erosión	Lluvia de diseño, CN, topografía	DOS
SMADA	Eaglin	Eventos en cuencas	Suite de programas: crecidas, distribución de frecuencias, HU, tiempo de conc.	Depende del programa a utilizar. Luvia de diseño, CN y topografía para eventos	Windows
SUSHI	Univ.ersidad Pol.itécnica de Madrid	Eventos en cuencas	Suite de programas: crecidas, distribución de frecuencias, HU, tiempo de conc. Y otros	Depende del programa a utilizar. Luvia de diseño, CN y topografía para eventos	Windows (modelo nuevo)

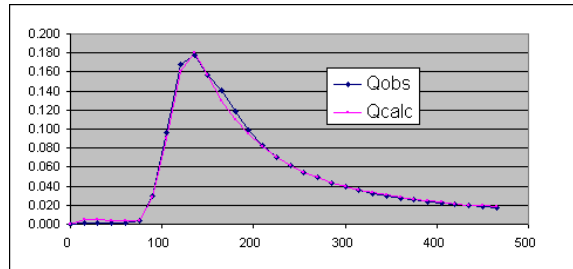


Fig. 6.9 Cuenca actual calibrada con CN = 47

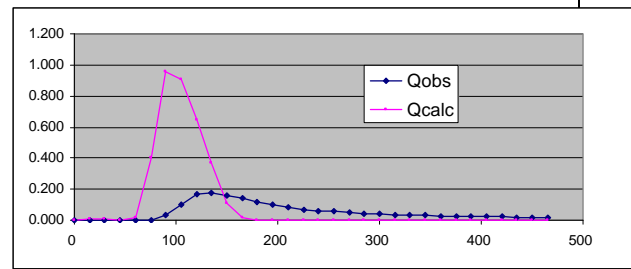


Fig. 6.10 Cambio de vegetación para: CN = 80

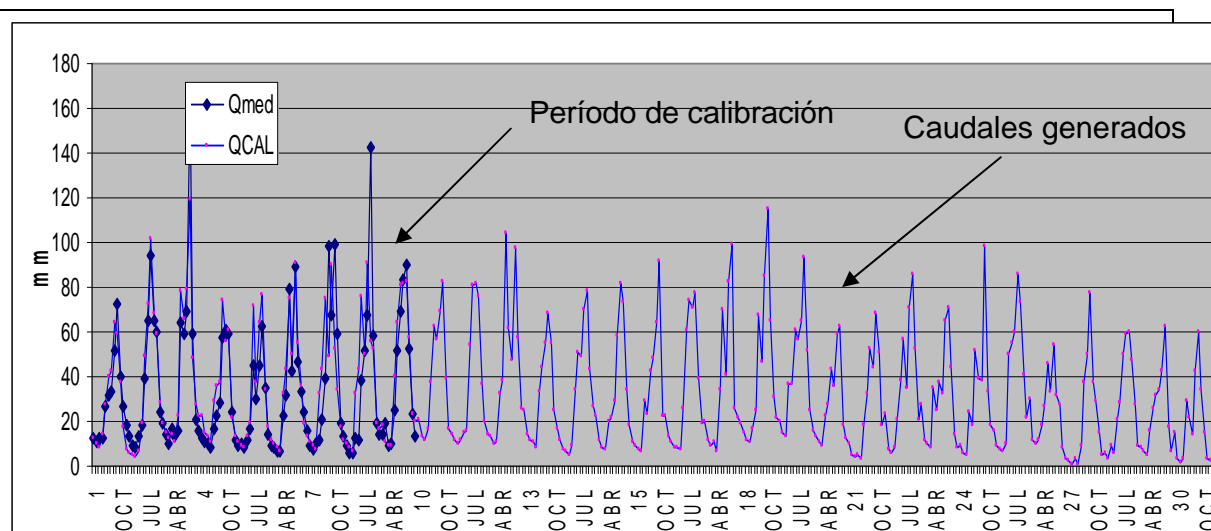
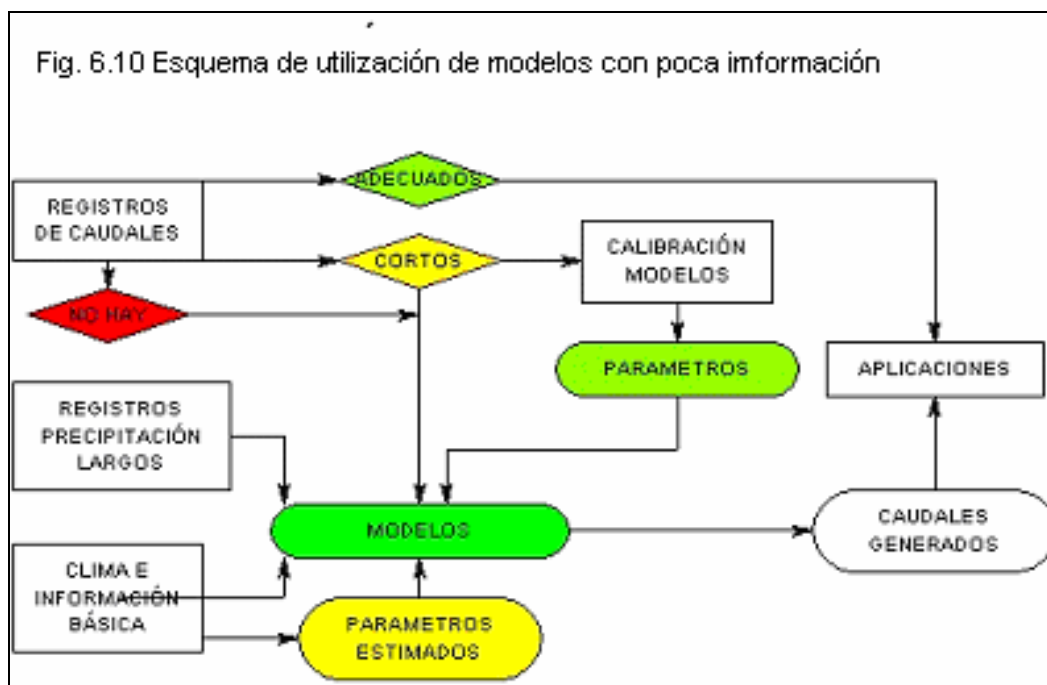


Figura 6.11 Calibración de MOMES y generación de caudales:
Cuenca San Andrés, El Salvador