



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MEDICIÓN DIRECTA DE SEDIMENTOGRAMAS Y SU GENERACIÓN  
SINTÉTICA

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

**ALEJANDRO MAYA FRANCO**

TUTOR:

**Dr. Jesús Gracia Sánchez**

5 de Junio de 2009





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar  
Secretario: M.I. Franco Víctor  
Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Domínguez Mora Ramón  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Jesús Gracia Sánchez

---

NOMBRE DEL DIRECTOR DE TESIS

## *Agradecimientos*

Quiero agradecer al Dr. Jesús Gracia Sánchez por su apoyo, paciencia y confianza durante la elaboración de este trabajo. Quiero destacar que es una gran persona, como jefe y amigo.

Al M. en I. Víctor Franco por su apoyo y consejo durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería. Es una persona a la que respeto y admiro.

A la Ing. Claudia Edith López Fuentes, quien ha sido un ejemplo desde que la conozco. Agradezco su amistad, consejos, apoyo y por ser pieza fundamental en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis profesores, amigos y compañeros de la escuela e instituto. Evito mencionar nombres por temor a omitir a alguno. Gracias a ellos he aprendido el valor de la convivencia, aprendizaje y de la amistad.

## *Dedicatorias*

*Dedico este trabajo a...*

A mi madre Rosalía Franco Núñez, gracias por su apoyo, cariño, regaños y por todas sus atenciones. Quiero dedicarle este trabajo porque me ha demostrado su cariño, a pesar de no ser un buen hijo.

A mis abuelos Alicia Núñez Arzate y Juan Franco Nonato. Quiero dedicarles este trabajo porque han sido como unos padres para mí, me han cuidado desde la cuna y tienen todo mi respeto y admiración.

A Claudia López Fuentes, porque se ha convertido en una amiga inseparable y es una pieza fundamental en mi vida. Le dedico este trabajo porque he compartido con ella, momentos muy especiales.

A mis amigos Takashi, Gloria, Mauricio y Paula. Les dedico este trabajo por la amistad que hemos sembrado desde la licenciatura.

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo	1
1.2 Estructura del documento	1
1.3 Sedimento	3
1.4 Transporte de sedimentos	2
1.4.1 Arrastre de la capa de fondo	6
1.4.2 Transporte del fondo en suspensión	6
1.4.3 Transporte de fondo o transporte total de fondo	7
1.4.4 Transporte de lavado	7
1.4.5 Transporte en suspensión	7
1.4.6 Transporte total	8
1.5 Hidrogramas y su análisis	9
1.5.1 Hidrograma	9
1.5.2 Tiempo de concentración	10
1.5.3 Hidrograma unitario	12
1.6 Proceso de convolución	17
1.7 Fórmula Universal de Pérdida de Suelo	19
1.7.1 Breve historia de las fórmulas de pérdida de suelo	19
1.7.2 Factor o índice de erosividad de la lluvia (R)	21
1.7.3 El parámetro E <sub>i</sub>	21
1.7.4 Factor de erosividad del suelo (K)	23
1.7.5 Factor de pendiente y longitud (LS)	23
1.7.6 Factor de cobertura vegetal (C)	25
1.7.7 Factor de protección del suelo (P)	25
<b>2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>27</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS DIRECTOS</b>	<b>28</b>
3.1 Aforo del caudal sólido	28
3.1.1 En pequeñas cuencas	28
3.1.2 Método de la botella muestreadora	29
3.1.3 En grandes cuencas	32
3.2 Instrumentos de campo para medir la carga de sedimentos en suspensión	38
3.2.1 Guía para la elección de muestreadores de transporte de sedimento	38
3.2.2 Medición de transporte de sedimentos en ríos, estuarios y costas	41
3.2.3 Clasificación de muestreadores	44

---

3.3	Muestreadores de botella y trampa	44
3.3.1	Muestreador de botella	45
3.3.2	Trampa instantánea	46
3.3.3	Trampa integradora de tiempo	48
3.3.4	USP-61 Integrador puntual	49
3.3.5	Botella muestreadora Delft	49
3.3.6	USD - 49 Integrador de profundidad	51
3.4	Muestreador bomba	51
3.4.1	Muestreado filtro - bomba	52
3.5	Muestreo con métodos ópticos y acústicos	54
3.5.1	Sensor óptico puntual de dispersión (Backscatter)	55
3.5.2	Sensor puntual acústico (ASTM, UHCM, ADV)	56
3.6	Sensores de impacto	57
3.7	Sensores nucleares	57
3.8	Sensor de conductividad	57
<b>4.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS INDIRECTOS</b>	<b>58</b>
4.1	Método para valorar el transporte de lavado	58
4.1.1	Método de Lane y Karlinske	62
4.1.2	Método de Einstein	64
4.1.3	Método de Brooks	66
4.1.4	Método de Chang, Simons y Richardson	69
4.2	Metodologías consultadas en la literatura	71
4.3	Curva tasa de sedimento	72
4.3.1	Caso desarrollado en Japón	72
4.3.2	Modelo de producción de sedimento	77
4.4	Polutogramas	78
4.5	Generación sintética de sedimentogramas	80
4.5.1	Clasificación de sedimentogramas	82
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN SINTÉTICA DE SEDIMENTOGRAMAS</b>	<b>84</b>
5.1	Base teórica	84
5.1.1	Generación de hidrogramas	84
5.1.2	Generación de sedimentogramas	89
5.2	Integración del modelo	92
5.3	Definición de parámetros para el modelo	93
5.3.1	Tiempo de concentración	93
5.3.2	Curvas de infiltración	93
5.3.3	Cálculo de la erosión	94
5.3.4	Índice de erosividad	96
5.3.5	Cálculo del aporte de sedimento en la cuenca	97
5.3.6	Tiempo de traslado	98

---

5.4 Tormentas experimentales	98
5.4.1 Tormenta 1	99
5.4.2 Tormenta 2	101
5.4.3 Tormenta 3	105
5.4.4 Tormenta 4	107
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>110</b>

Referencias

Apéndice A (Manual)

Apéndice B (Código)

# MEDICIÓN DIRECTA DE SEDIMENTOGRAMAS Y SU GENERACIÓN SINTÉTICA

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es mostrar algunos procedimientos (métodos directos e indirectos) para obtener el sedimentograma generado por una tormenta. Además se desarrolla una metodología que muestra la influencia que tiene el hidrograma respectivo sobre el sedimentograma y se analizan los factores que tienen influencia en el desfase del pico del sedimentograma con respecto al del hidrograma de la tormenta.

### 1.2 Estructura del documento

*Capítulo 1.* En este capítulo se plantea el objetivo de esta tesis. Además, se presenta la información básica que nos ha permitido desarrollar la metodología propuesta. Se ha desarrollado con la intención de dar al lector las herramientas elementales, para facilitar la comprensión del tema.

*Capítulo 2.* Se busca plantear la importancia y necesidad de abordar el tema del transporte de sedimento de lavado (wash load). Aunque es un capítulo breve, la intención es explicar la problemática principal.

*Capítulo 3.* Se ha desarrollado una investigación acerca de los dispositivos principales para la obtención de muestras de campo. Con las muestras, es posible desarrollar un sedimentograma de manera directa.

*Capítulo 4.* Al realizar una investigación sobre metodologías que pudieran ayudarnos a obtener sedimentogramas. Se ha encontrado que la información, es escasa. Se reportan los métodos encontrados en la literatura y que son de uso común.

*Capítulo 5.* Plantea la metodología propuesta para la obtención de sedimentogramas. Muestra los resultados obtenidos con las tormentas propuestas, analizadas con el programa elaborado para tal fin.

*Capítulo 6.* Muestra las conclusiones y observaciones de la metodología. Así como algunas propuestas de lo que se podría hacer para mejorarla.



### 1.3 Sedimento

Se entiende por sedimento a todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua. El sedimento es material fragmentado, que básicamente se forma por la desintegración física y química de las rocas. Dichas partículas varían en tamaño, desde grandes rocas hasta fragmentos de tamaño coloidal. La forma de las partículas cambia, desde redondeadas hasta angulares. También varían en gravedad específica y en su composición mineral, aunque se ha observado que el material predominante es cuarzo. Las partículas de sedimento son transportadas por la gravedad, aire y también agua. Cuando el agente de transporte es el agua, recibe el nombre de transporte de sedimento fluvial. El proceso de movimiento y remoción de su estado original es llamado erosión.

Usualmente, tres modos de movimiento de partículas son los que se distinguen:

- Movimiento de deslizamiento o rodamiento de partículas.
- Movimiento de saltos o brincos.
- Movimiento de suspensión.

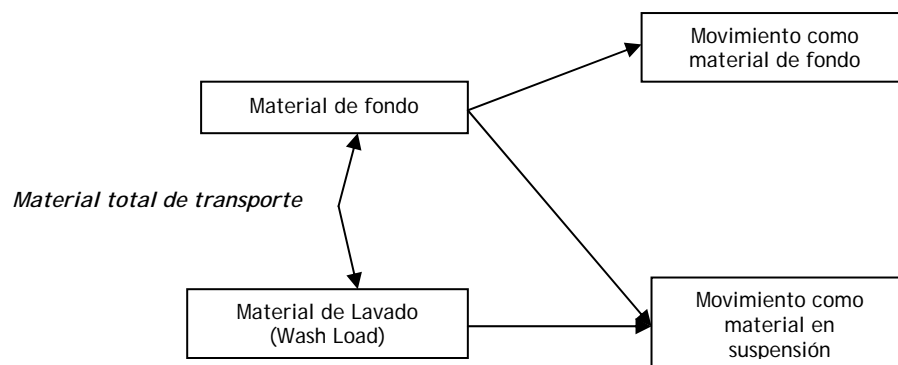


Figura 1. 1 Tipos de transporte de sedimentos

En la figura 1.1, se establecen los tipos de transporte que se presentan en una corriente. Así como su comportamiento en movimiento. El material de fondo, que es el de mayor tamaño, se mantiene en las partes bajas del cauce. Aunque un porcentaje de dicho material se mantiene en suspensión. Por otro lado, el material de lavado se mantiene en las zonas más próximas a la superficie. De esta manera, su movimiento es distinto al material de fondo. Aunque mantiene semejanzas al movimiento de la porción de fondo que se mantiene en suspensión. Posteriormente se hablará más a detalle de cada uno de los tipos de transporte de sedimento.

La diferencia en el comportamiento entre el material de fondo y el material de lavado (wash load) consiste en que el transporte de fondo depende de las condiciones hidráulicas de la corriente y de las características físicas del material. Por lo tanto, si en dos ríos se tienen tramos semejantes y con el mismo material de fondo, transportan las mismas cantidades de material. Esto no ocurre con el material de lavado; en forma general, un río puede transportar tanto material de lavado como llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente. Así, dos ríos semejantes con igual material en el fondo, pero uno con cuenca protegida o forestada y otro con una cuenca desprotegida con fuertes pendientes y material suelto sobre su superficie, arrastran cantidades completamente diferentes de material de lavado, llegando el primero al extremo de no transportar nada de ese material. El transporte de lavado siempre tiene lugar en suspensión, mientras que el material de transporte de fondo puede tener lugar dentro de la capa del fondo o en suspensión. La capa de fondo, como su nombre lo indica, se encuentra justo arriba del lecho de un cauce. Einstein, quien introdujo este concepto, le asignó un espesor igual a dos veces el diámetro de la partícula considerada. Por tanto, en una condición real hay tantas capas de fondo como partículas de diferente tamaño se tengan en el fondo.

#### 1.4 Transporte de sedimentos

El transporte unitario de sedimentos se expresa en peso o en volumen. Si se expresa en peso se designa como " $g_x$ " cuyas unidades serán  $\text{kgf}/(\text{s m})$  y si se expresa en volumen, se designa con la letra " $q_x$ " y sus unidades son  $\text{m}^3/(\text{s m})$ . Es importante tener en mente que el volumen  $q_x$  está ocupado por las partículas sólidas sin dejar huecos entre ellas. Por tanto, la relación entre  $g_x$  y  $q_x$  esta dada por:

$$g_x = \gamma_s q_x \quad (1. 1)$$

El subíndice x depende del tipo de transporte.

Así por ejemplo: si se obtiene que  $q_x = 2 \text{ m}^3/(\text{s m})$ , ello significa que cada segundo y por cada metro de ancho de la sección está pasando un volumen sólido de  $2\text{m}^3$  de material, del que están constituidas las partículas, sin que haya huecos entre ellas.

El volumen real  $V_x$  que ocuparía el material transportado, si llegara a depositarse, se obtiene de la relación

$$V_x = \frac{q_x b \Delta t}{(1-n)} = \frac{g_x b \Delta t}{(1-n)} = \frac{Q_x \Delta t}{(1-n)} = \frac{G_x \Delta t}{\gamma_s (1-n)} \quad (1. 2)$$

donde

$q_x, g_x$	transporte unitario de sedimentos expresado en volumen ( $m^3/(s m)$ ) o en peso( $kgf/(s m)$ ),-respectivamente
$Q_x, G_x$	transporte de sedimentos que pasa por la sección completa de un cauce expresado en volumen ( $m^3/s$ ) o en peso ( $kgf/s$ ), respectivamente
$\gamma_s$	peso específico de las partículas y del agua respectivamente, en $kgf/m^3$
$\Delta t$	intervalo de tiempo
$V_x$	volumen real ocupado por los sedimentos que pasan por una sección, en el lapso $\Delta t$ , una vez que ellos se han depositado
$n$	porosidad del material depositado
$b$	ancho del fondo del cauce

Conviene recordar que la relación de vacíos  $e$  se relaciona con la porosidad  $n$  mediante las relaciones

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (1. 3)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1. 4)$$

por lo que si se conoce la relación de vacíos, la ecuación de  $V_x$  se escribe como

$$V_x = q_x b \Delta t (1 - e) = \frac{g_x b \Delta t}{\gamma_s} (1 - e) = Q_x \Delta t (1 - e) = \frac{G_x \Delta t}{\gamma_s} (1 - e) \quad (1. 5)$$

Como en ocasiones se trabaja con el peso sumergido de las partículas, el transporte unitario de partículas expresado en peso sumergido se designa como  $g'_x$ . Sus relaciones con  $g_x$  y  $q_x$  son:

$$g'_x = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_x = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} g_x = \frac{S_s - 1}{S_s} g_x \quad (1. 6)$$

$$g'_x = (\gamma_s - \gamma) q_x = (\rho_s - \rho) g q_x \quad (1. 7)$$

donde

$\gamma_s, \gamma$  peso específico de las partículas y del agua respectivamente, en  $kgf/m^3$  o  $N/m^3$ . El peso específico del agua se obtiene en función de la temperatura con ayuda de tablas

$\rho_s, \rho$  densidad de las partículas y del agua respectivamente, en  $kg/m^3$ . La densidad del agua se obtiene en función de la temperatura con ayuda de tablas

g aceleración debida a la gravedad, en m/s<sup>2</sup>  
 S<sub>s</sub> densidad relativa de las partículas, adimensional

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma} = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (1.8)$$

Se ha indicado que G<sub>x</sub> y Q<sub>x</sub> (ec. 1.2) designan el transporte de sedimentos que tiene lugar en toda la sección transversal del río, expresados en peso, kgf/s o en volumen, m<sup>3</sup> /s respectivamente; por tanto se cumplen las relaciones

$$G_x = bg_x \quad (1.9)$$

$$Q_x = bq_x \quad (1.10)$$

donde b es el ancho del fondo del cauce o canal. Para obtener el gasto de sedimentos en la capa de fondo, que pasa por una sección de un río, algunos autores recomiendan utilizar como ancho efectivo; es decir, donde tiene lugar el transporte de fondo, a 0.8b, tal que

$$G_x = 0.8bg_x \quad (1.11)$$

$$Q_x = 0.8bq_x \quad (1.12)$$

Usualmente se utilizan las ecuaciones 1.9 y 1.10 pero en un caso real, conviene tener en mente la recomendación anterior para que al observar el cauce natural, se verifique si el transporte ocurre en todo el fondo o disminuye notablemente cerca de las orillas. De cumplirse lo anterior conviene multiplicar b por un coeficiente menor que uno, aunque no sea necesariamente 0.8.

Cuando se calcula el transporte del fondo en suspensión, se considera usualmente que ocurre en todo el ancho de la sección, por lo que se emplea el ancho de la superficie libre B o el ancho medio B<sub>m</sub>

$$B_m = \frac{b + B}{2} \quad (1.13)$$

Para facilitar el cálculo del transporte de sedimentos y comprender los datos que se requieren para su cuantificación, se propone distinguir las siguientes seis clases de transporte, ver tabla 1.1.

FORMA DE TRANSPORTE	NOTACIÓN			
	Kgf/(s m)	Kgf/s	m <sup>3</sup> /(s m)	m <sup>3</sup> /s
a) Arrastre en la capa de fondo	$g_B$	$G_B$	$q_B$	$Q_B$
b) Transporte de fondo en suspensión	$g_{BS}$	$G_{BS}$	$q_{BS}$	$Q_{BS}$
c) Transporte de fondo	$g_{BT}$	$G_{BT}$	$q_B$	$Q_{BT}$
d) Transporte de lavado	$g_L$	$G_L$	$q_L$	$Q_L$
e) Transporte en suspensión	$g_S$	$G_S$	$q_S$	$Q_S$
f) Transporte total	$g_T$	$G_T$	$q_T$	$Q_T$

Tabla 1. 1 Notación de las distintas formas de transporte

#### 1.4.1 Arrastre de la capa de fondo

Es el material del fondo del cauce que es movido por la corriente dentro de la capa de fondo, cuyo espesor, según Einstein, es igual a dos veces el diámetro de la partícula considerada. Otros autores, como Van Rijn y Pacheco-Ceballos, han propuesto diferentes espesores para cada capa de fondo.

El arrastre en la capa de fondo se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, de la geometría del cauce y de las propiedades físicas del material del fondo.

#### 1.4.2 Transporte del fondo en suspensión

Está formado por el material del fondo del cauce que es transportado por la corriente en suspensión; es decir, dentro del seno del líquido arriba de la capa de fondo. El flujo, debido a su velocidad y turbulencia, levanta las partículas del lecho y las mantiene en suspensión, aunque continuamente se produce un intercambio de partículas con el fondo.

El material del fondo es granular en la mayoría de los ríos; es decir, está formado por partículas sueltas de arena, grava o boleos. Al ser levantadas y puestas en suspensión, el peso de cada- partícula es la única fuerza actuante para que las partículas retornen nuevamente al fondo. El transporte del fondo en suspensión se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, la geometría del cauce y las propiedades físicas del material del fondo. También se puede obtener en función de los primeros dos aspectos señalados y de una muestra de agua-sedimentos tomada en un punto conocido de la sección. De esa muestra se debe obtener la concentración de partículas en suspensión y las propiedades físicas de las partículas.

### 1.4.3 Transporte de fondo o transporte total de fondo

Está formado por el material del fondo que es transportado por la corriente, tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión. Por tanto, el transporte de fondo es igual a la suma del arrastre en la capa de fondo más el transporte de fondo en suspensión.

$$g_{BT} = g_B + g_{BS} \quad (1. 14)$$

### 1.4.4 Transporte de lavado (wash load)

Está formado por el material muy fino (partículas < 0.062mm) que es transportado en suspensión y que no proviene del material del fondo del cauce. Al considerar una sección determinada, todo el material de lavado procede de los tramos de aguas arriba. Su origen se encuentra en el suelo de la cuenca erosionado por las gotas de lluvia, o bien, procede en ocasiones de la erosión de las márgenes del río.

El transporte de lavado depende de la cantidad de partículas finas que la cuenca aporta al río bajo la acción de una lluvia. Como no es función de las características hidráulicas de la corriente, sólo se puede valorar cuando se toma una muestra de agua con partículas en suspensión y se separa la porción de partículas que no están representadas en la curva granulométrica del material del fondo.

### 1.4.5 Transporte en suspensión

Está formado por la totalidad de partículas que son transportadas en suspensión. Por tanto, el transporte en suspensión es igual a la suma del "de fondo en suspensión" mas el "de lavado".

$$g_S = g_{BS} + g_L \quad (1. 15)$$

Cuando se toma una muestra de agua en una corriente natural, se obtiene la concentración relacionada con el transporte en suspensión, ya que en ella puede haber material de lavado y partículas que proceden del fondo.

Una muestra que únicamente tenga material de lavado se puede obtener en la zona de un río en el que las velocidades sean muy bajas y el flujo no pueda levantar las partículas del fondo. Una muestra que contenga únicamente material del fondo en suspensión se obtiene en un canal de laboratorio con fondo arenoso donde se use agua limpia; en la naturaleza se encuentra en algunos afluentes en la zona de montaña.

Al tomar una muestra de agua-sedimento conviene separar el material que procede del fondo y el material de lavado. La forma práctica de hacerlo consiste en pasar la muestra a través de una malla 200 cuya apertura es de 0.074 mm (valor cercano a 0.062 mm establecido como separación entre ambos materiales). Las partículas retenidas en la malla corresponden al material del fondo y las que pasan, y quedan en la charola, al material de lavado.

#### 1.4.6 Transporte total

Está formado por todas las partículas que son transportadas por el río, procedan del fondo o sean de lavado. Se cumplen las relaciones siguientes: "

$$g_T = g_L + g_{BT} \quad (1. 16)$$

$$g_T = g_L + g_{BS} + g_{BS} \quad (1. 17)$$

$$g_r = g_L + g_{BT} \quad (1. 18)$$

$$g_T = g_S + g_B \quad (1. 19)$$

La mayoría de los primeros métodos desarrollados para cuantificar el transporte de sedimentos, pretenden obtener el material que es arrastrado en la capa del fondo; sin embargo, las pruebas en que se basan fueron obtenidas en canales de laboratorio y en ellos, el arrastre se conocía al cuantificar todas las partículas que eran transportadas y llegaban al final del canal. Cuando las velocidades del flujo eran altas, algunas partículas eran transportadas en suspensión, por lo que el transporte obtenido era el total del fondo y no únicamente el arrastre en la capa de fondo.

En 1950, Einstein introdujo el concepto de "*capa de fondo*" y separó el arrastre en la capa de fondo del transporte en suspensión; sin embargo, él tomó en cuenta resultados de otros autores en que se había cuantificado la suma de los dos arrastres y no únicamente el arrastre en la capa de fondo. Ese concepto es confuso y poco útil cuando se tiene un material bien graduado en el fondo, ya que la capa de fondo es igual a dos veces el diámetro de cada partícula considerada, lo cual puede dar un valor, por ejemplo, de 10 cm para una partícula grande mientras que para las arenas finas, dentro de la misma muestra, el espesor de su capa sería de sólo una fracción de milímetro. Por lo expuesto, otros autores han estudiado el espesor de esa capa, dentro de la cual ocurren pequeños saltos de las partículas y han obtenido la altura y longitud de esos saltos. Por su parte, Van Rijn propuso una relación empírica para determinar el espesor de la capa de fondo para un conjunto de partículas de distintos tamaños.

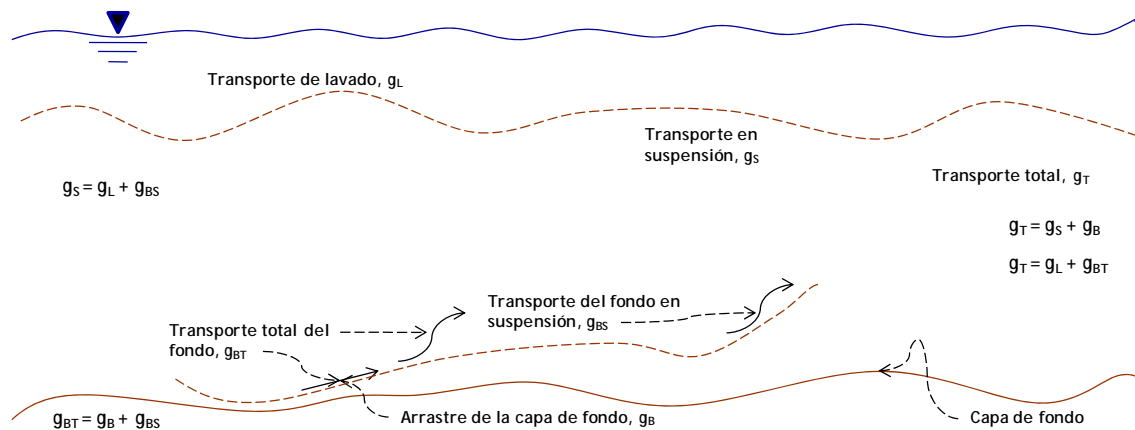


Figura 1. 2 Esquema de los diferentes tipos de arrastre de sedimentos

## 1.5 Hidrogramas y su análisis

### 1.5.1 Hidrograma

El hidrograma puede ser mirado como la expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que gobiernan las relaciones entre lluvia y escurrimiento para una cuenca particular. Los factores climáticos que afectan la forma y la magnitud del hidrograma son: la intensidad y duración de la lluvia y su distribución espacial y temporal sobre la cuenca. Entre los aspectos fisiográficos de más influencia en la forma del hidrograma, se señalan: el área y la forma de la cuenca, la red de drenaje, la pendiente de la cuenca y del cauce principal.

Es común que se tengan más datos de precipitación que de escurrimientos, por ello es necesario contar con métodos que permitan obtener los escurrimientos de una cuenca a partir de la precipitación. En términos de las características de la misma. Entre estas características están el área de la cuenca, forma, pendiente y el tipo de vegetación.

Para obtener el escurrimiento se han desarrollado varios métodos que dependen del grado de precisión, de la cantidad y de la calidad de la información; entre esos métodos se encuentran los "métodos de envolventes" que sólo toman en cuenta el área de la cuenca y es por esta razón que se utilizan para estimaciones que no requieren un alto grado de precisión, pues relacionan el gasto máximo con el área de la cuenca, y para el caso de México las más usadas son las de Creager y Lowry. Otro de los métodos es el de la "Fórmula Racional"; éste, además de tomar en consideración el área de la cuenca, considera la altura o la intensidad de la precipitación. En este método también se considera la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la



salida de la cuenca y la velocidad que adquiere, a partir del tiempo de concentración y un coeficiente de escurrimiento.

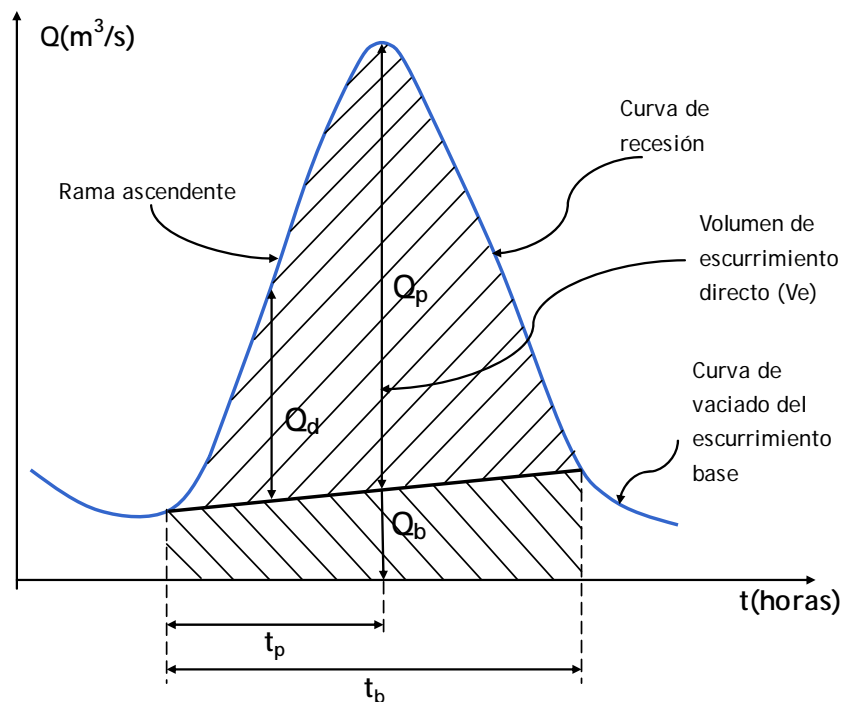


Figura 1. 3 Hidrograma típico

### 1.5.2 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota de agua en llegar de la parte más alejada de la cuenca, al sitio de salida de ella. El tiempo de concentración ( $T_c$ ) es uno de los parámetros más importantes en los modelos lluvia - escurrimiento.

Ramser y Kirpich lo definen como el tiempo al pico  $t_p$ . Viessman (1977), como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final del escurrimiento superficial directo. Siendo este último valor el punto de inflexión del hidrograma, después del caudal pico. Témez (1978) lo explica como la diferencia entre el tiempo de finalización del hidrograma de escurrimiento superficial directo y el tiempo de finalización de la precipitación efectiva. Aparicio (2006) lo define como el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio. Algunas de estas formas de cálculo son:

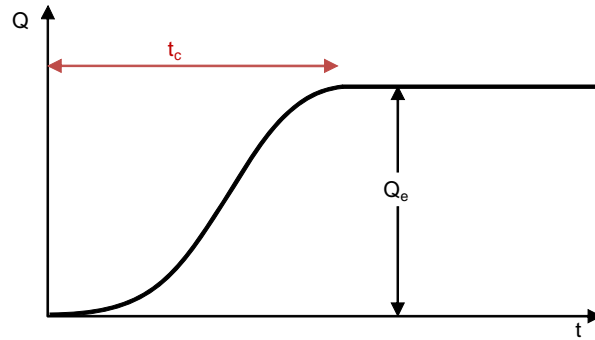


Figura 1. 4 Tiempo de concentración  $t_c$

Témez (1978)

$$t_c = 0.3 \left( \frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75} \quad (1. 20)$$

donde

$t_c$  tiempo de concentración, en h

$L$  longitud del cauce principal, en km

$S_0$  diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre  $L$ , en %

Kirpich (1940), es el más usado en México

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1. 21)$$

donde

$t_c$  tiempo de concentración, en h

$L$  Longitud del cauce, en m

$S_0$  diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre  $L$ , en m/m

Mientras el parámetro de tiempo de concentración es conceptualmente sencillo. La asignación de un valor numérico al concepto, que tenga la capacidad de reunir las complicadas condiciones físicas de una cuenca, está sujeto a imprecisiones substanciales. Una de las primeras, y aun una de las más usadas, relaciones propuestas para su uso en cuencas no aforadas fue desarrollada inicialmente en el flujo de canales bien definidos por Ramser (1927).

$$t_c = 0.02 L_c^{0.77} S_c^{-0.385} \quad (1. 22)$$

donde

$t_c$  tiempo de concentración, en min

$L_c$  longitud del tramo del canal, en m

$S_c$  pendiente del tramo del canal, en m/m

Esta relación tiende a correlacionarse pobremente con mediciones de escurrimiento del tiempo de concentración para áreas muy pequeñas (menores que 5 km<sup>2</sup>). Este resultado debería esperarse ya que las áreas pequeñas son dominadas por las condiciones de flujo superficial mejor, que teniendo un sistema de canales bien definido.

Kerby (1959) desarrolló un tiempo de traslado basado en una ecuación de flujo superficial.

$$t_c = \left| \frac{2.2nL_0}{\sqrt{S_0}} \right|^{0.467} \quad (1.23)$$

donde

$L_0$  longitud del flujo superficial, en m

$S_0$  pendiente de la ladera del flujo superficial, en m/m

$n$  coeficiente de rugosidad de Manning, en m<sup>1/6</sup>

Cuando se aplica en una cuenca a escala, esta fase de flujo superficial sobre la ladera tiene efectivamente un tiempo de traslado máximo. Debido a experimentos de erosión y a que otras investigaciones han mostrado substancialmente que la condición de flujo superficial puede, pocas veces, ser mantenido para una distancia más grande que 100 - 150 metros.

Casi todo el escurrimiento superficial comienza fuera de los canales. De esta forma, la ecuación recomendada para calcular el tiempo de concentración es la suma de las ecuaciones 1.22 y 1.23.

$$t_c = 0.02L_c^{0.77} S_c^{-0.385} + \left| \frac{2nL_0}{\sqrt{S_0}} \right|^{0.467} \quad (1.24)$$

### 1.5.3 Hidrograma unitario

El "hidrograma unitario" es otro de los métodos que permiten relacionar lluvia y escurrimiento, es uno de los más usados. Se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria (1mm), distribuida uniformemente en la cuenca, durante un intervalo de tiempo llamado duración en exceso  $d_e$ .

Suponiendo que se presenta una misma tormenta en dos cuencas con el mismo suelo y la misma área, pero de diferente forma; aunque el volumen escurrido sea el mismo, el gasto de pico y las demás características del hidrograma varían de una cuenca a otra. El método del hidrograma unitario toma en cuenta este efecto, considerando, además

de la altura total de precipitación y el área de la cuenca, su forma, pendiente, vegetación, etc. Aunque no de forma explícita. El hidrograma unitario representa una función de transformación de las lluvias efectivas en escurrimiento directo. Este método fue desarrollado por Sherman en 1932. Para la representación conceptual del hidrograma unitario y su definición en una cuenca hidrográfica específica se han desarrollado múltiples teorías y procedimientos. Se consideran así los siguientes tipos de hidrogramas unitarios:

Hidrogramas unitarios Empíricos obtenidos a partir de la información simultánea de lluvia y caudales en varias cuencas.

Hidrogramas unitarios Sintéticos donde la forma y elementos característicos del hidrograma unitario se obtienen a partir de las características morfométricas de la cuenca mediante relaciones empíricas.

### **Hipótesis consideradas en el hidrograma unitario**

#### *Tiempo base constante*

Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base,  $t_b$ , es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independiente del volumen total escurrido. El tiempo base se define como el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el final del escurrimiento directo. Todo hidrograma unitario está ligado a una duración de la lluvia en exceso.

#### *Linealidad o proporcionalidad*

Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo; es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.

#### *Superposición de causas y efectos*

El hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos de lluvia precedentes.

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia.

## Hidrogramas unitarios sintéticos

El hidrograma unitario desarrollado a partir de la información de lluvia y de caudal en una cuenca se aplica solamente para la cuenca y para el punto de la corriente donde se midió la información de caudales. Depende de la existencia simultánea de registros de precipitación y caudal, que no siempre están disponibles. Se han desarrollado técnicas que relacionan características morfométricas de la cuenca (área, perímetro, pendiente, etc) con características del hidrograma unitario (tiempo de pico, caudal pico, tiempo base, etc.). Estas relaciones se conocen con el nombre de hidrogramas unitarios sintéticos. La mayoría de ellas son empíricas, obtenidas con base en datos de varias cuencas.

Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos:

- a) Aquellos que relacionan las características del hidrograma (caudales, tiempos de pico, tiempo base, etc.) con las características de la cuenca.
- b) Los que se basan en hidrogramas unitarios adimensionales.
- c) Los basados en modelos de almacenamiento en la cuenca.

### *Método de Chow*

Fue deducido basándose en el concepto de hidrogramas unitarios e hidrogramas unitarios sintéticos y considera que el caudal pico del escurrimiento directo de una cuenca puede calcularse como el producto de la lluvia en exceso por el caudal pico de un hidrograma unitario, y es aplicable a cuencas no urbanas con una superficie menor de 25 km<sup>2</sup>.

### *Método de I - Pai Wu*

Se basa en el modelo lineal propuesto por Nash para la obtención de hidrogramas unitarios, el mismo que asimila una cuenca a un sistema de recipiente lineales iguales, con el mismo coeficiente de almacenaje, colocados en serie.

### *Hidrograma Unitario Triangular*

Fue desarrollado por Mockus. Las características de dicho hidrograma unitario sintético de forma triangular son obtenidas por medio de relaciones empíricas.

### *Hidrograma Unitario Adimensional (SCS)*

Para propósitos prácticos es suficiente con las características de un hidrograma unitario triangular; sin embargo, si la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta el diseño, puede usarse un hidrograma curvilíneo. Este modelo puede mejorar la definición de la forma del hidrograma utilizando los resultados obtenidos por el Soil Conservation Service de los EUA sintetizados. Para aplicar el método solo se necesita calcular el gasto y el tiempo pico.

### *Hidrograma Unitario Sintético de Snyder*

El modelo de Snyder fue desarrollado a partir de una serie de estudios sobre cuencas cuyas áreas oscilan en un rango de entre 10 y 10000 millas cuadradas en los Montes Apalaches de Estados Unidos. El modelo pretende derivar un hidrograma Unitario, a partir de algunas características físicas de la cuenca, para ser aplicado en las cuencas donde no se posea registro de caudal.

### *Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann*

A principios de la década de los setenta, Jimmy R Williams y Roy W. Hann propusieron un modelo para calcular el hidrograma Unitario Sintético producido por una lluvia instantánea en una cuenca, a partir de sus principales características geomorfológicas, como son el área, la pendiente del canal principal y la relación largo-ancho.

### **Hidrograma unitario geomorfológico**

Es un procedimiento que toma en cuenta las condiciones geomorfológicas de la cuenca, a través de una descripción de la red de drenaje. Toma en cuenta las características fisiográficas como área de la cuenca, pendiente, longitud y red de drenaje. Dicha descripción de la red de drenaje, está basada en las leyes de Horton.

Según Rodríguez Iturbe y Valdés (1979), se puede definir al hidrograma unitario geomorfológico como la función de densidad de probabilidades del tiempo de viaje a la salida de la cuenca, de una gota de agua que cae en ésta aleatoriamente con distribución espacial uniforme. Esta función de probabilidad, físicamente representa la transición de una gota a través de una trayectoria específica hasta llegar a la salida de la cuenca y el valor que nos indica es la probabilidad de que se presente ésta. Pero para que represente un HUIG deberá ser multiplicada por el área de la cuenca y convolucionarla con un hietograma unitario con una duración de lluvia en exceso  $d$ .

Par establecer el hidrograma unitario geomorfológico es conveniente puntualizar varios aspectos referentes a la cuenca.

Al conjunto de cauces que transportan la lluvia no infiltrada hacia la parte más baja de la misma, se le llama *sistema de drenaje*. A cada cauce del sistema se le denomina *corriente*.

En el sistema de drenaje, se les llama *fuentes* a los puntos más altos de las corrientes de las partes más elevadas de la cuenca y *salida* al punto más bajo. La unión de dos corrientes se llama *nodo*.

Las corrientes de un sistema de drenaje pueden ser numeradas u ordenadas de acuerdo con el esquema de Strahler. Esquema establecido a partir del esquema de Horton.

### Hidrograma unitario instantáneo

Este hidrograma, es el correspondiente a una precipitación efectiva de 1mm que cae en un tiempo  $dt = 0$ . El HUI representa la respuesta de la cuenca a una entrada impulso instantánea y permite determinar el HU de cuenca para cualquier duración.

Si se observa la figura 2.5, se puede observar que tanto la altura total de lluvia efectiva como la duración en exceso ( $d_e = 14h$ ) es igual en los tres hietogramas. Por lo tanto, si se tiene un hidrograma unitario para esta duración en exceso, podrían obtenerse los respectivos hidrogramas de escurrimiento directo. Sin embargo, en este caso los tres hidrogramas resultarían exactamente iguales, lo que no sucede en la realidad. El método del hidrograma unitario instantáneo toma en cuenta este problema, es decir, la distribución temporal de la lluvia.

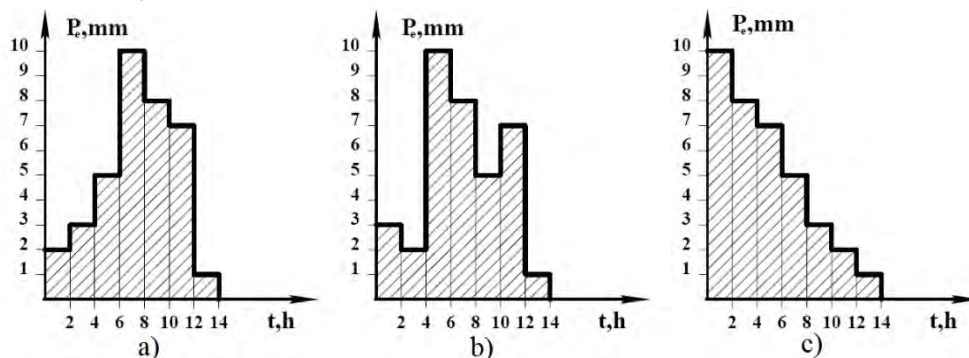


Figura 1. 5 Hietogramas de lluvia efectiva

## 1.6 Proceso de convolución

Es el proceso mediante el cual la tormenta de diseño es combinada con la función de transferencia (hidrograma unitario) para producir el hidrograma de escurrimiento directo. La función de transferencia, es la que transforma la lluvia en exceso en escurrimiento directo.

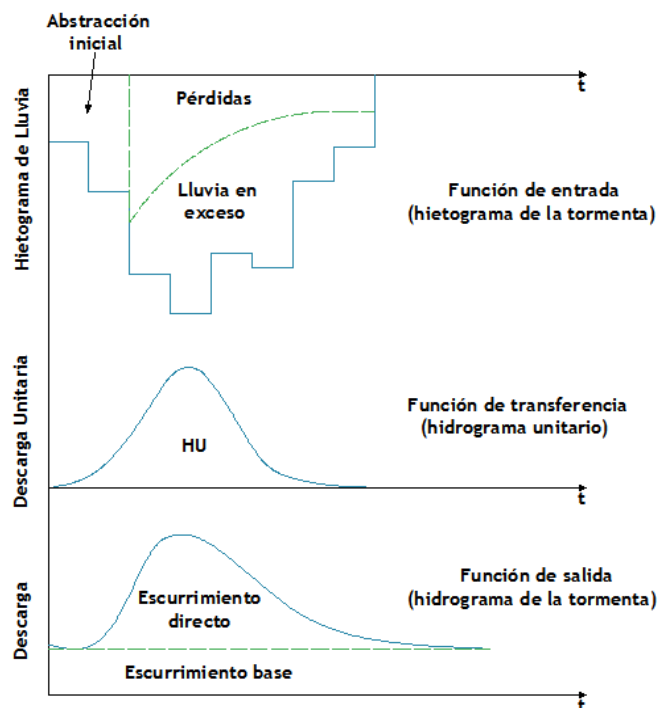


Figura 1. 6 Lluvia/Escorrimento como un proceso sistémico

Analíticamente, la convolución es referida como una teoría de superposición lineal. Conceptualmente es un proceso de multiplicación, traslación en el tiempo y adición. Esto es, el primer elemento del hietograma de lluvia en exceso con duración  $D$  es multiplicada por las ordenadas del hidrograma unitario (HU). El HU es trasladado un tiempo  $D$ , y el siguiente elemento del hietograma de lluvia en exceso es multiplicado por las ordenadas del HU. Después de que el HU ha sido trasladado para todos los elementos de lluvia en exceso y duración  $D$ ; los resultados de las multiplicaciones son sumados para cada intervalo de tiempo. Este proceso de multiplicación, traslación y adición es el mecanismo por el cual se deriva un hidrograma. A partir de un hietograma de lluvia en exceso y el HU.



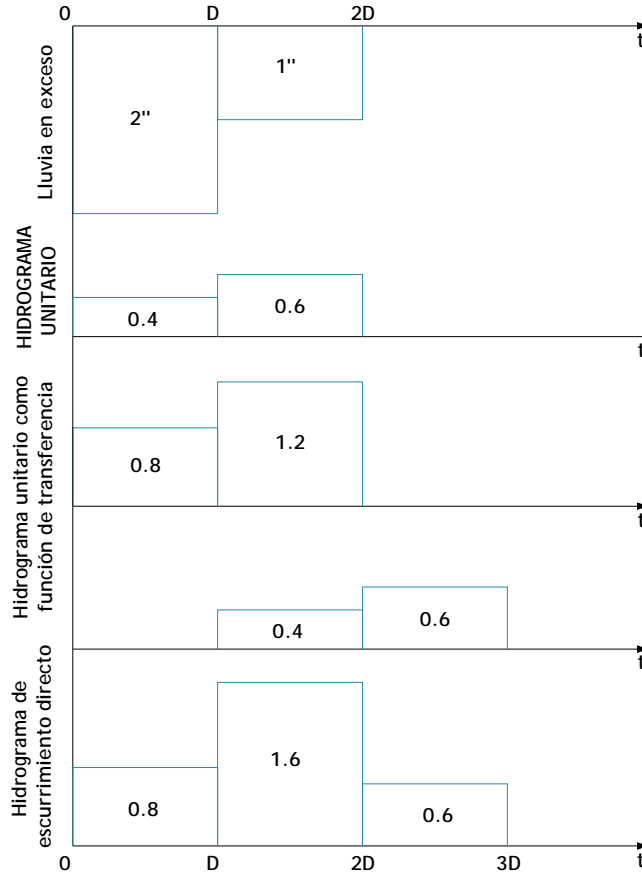


Figura 1. 7 Convolución: Un proceso de multiplicación - traslación - adición

El tiempo base del hidrograma, producto de la convolución, puede ser calculado con

$$t_b = t_{bPE} + t_{bHU} - 1 \tag{1. 25}$$

donde

- $t_b$  tiempo base del hidrograma generado
- $t_{bPE}$  tiempo base del hidrograma de lluvia en exceso
- $t_{bHU}$  tiempo base del hidrograma unitario

El proceso de convolución puede ser utilizado para procesos con comportamiento discreto o continuo. Para procesos continuos la multiplicación, traslación y adición es realizada por la integral:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)U(t - \tau)d\tau \tag{1. 26}$$

donde

- $y(t)$  distribución en el tiempo del escurrimiento directo
- $U(t)$  es el hidrograma unitario

$x(t)$  elemento de la lluvia en exceso  
 $t$  tiempo de retraso

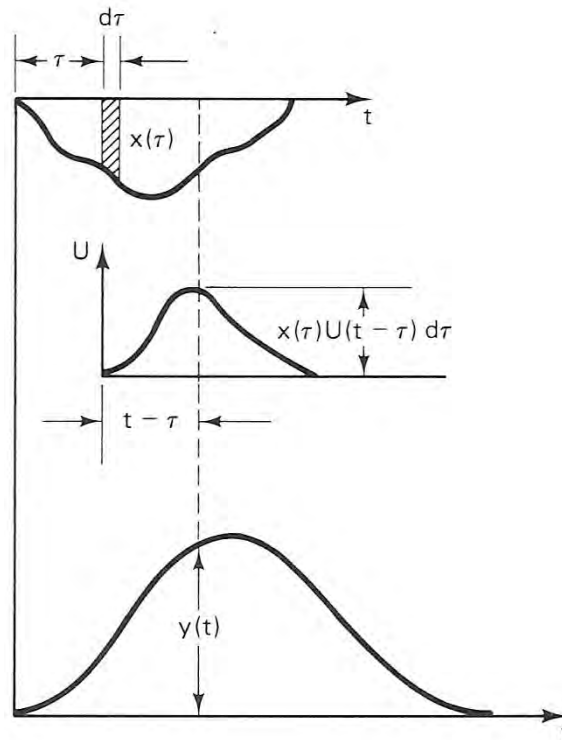


Figura 1. 8 Diagrama esquemático de la integral de convolución

La representación discreta de este proceso, que es la utilizada en este trabajo, será explicada con más detalle en capítulos posteriores.

## 1.7 Fórmula Universal de Pérdida de Suelo

### 1.7.1 Breve historia de las fórmulas de pérdida de suelo

El desarrollo de ecuaciones para calcular la pérdida de suelo comenzó alrededor de 1940 en el cinturón de maíz (*"the corn belt"*). El procedimiento para la estimación de la pérdida de suelo desarrollado en esa región fue referido como método de pendiente (*"slope-practice"*). Zingg publicó una ecuación en 1940 relacionando la tasa de pérdida de suelo con la longitud y la pendiente en porcentaje. En el siguiente año, Smith adicionó factores de cultivo y conservación y el concepto de un límite de pérdida de suelo, esto para desarrollar un método gráfico. Browning y asociados adicionaron factores de suelo y manejo; prepararon un arreglo de tablas para simplificar el uso de la ecuación en Iowa. Científicos y personal operativo del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), en los estados del norte (EUA), trabajaron juntos en el desarrollo de la ecuación del método de pendiente por todo el cinturón de maíz. Un comité nacional se reunió en Ohio en 1946 para adaptar la ecuación del cinturón de

maíz, para ser usada en otras regiones. El comité volvió a evaluar los factores y añadió un factor de lluvia. La fórmula resultante, comúnmente conocida como la fórmula Musgrave "*The Musgrave Equation*", ha sido extensamente utilizada para la estimación bruta de la erosión en cuencas.

La fórmula de pérdida de suelo que se utiliza en este trabajo es conocida como la "*Formula Universal de Pérdida de Suelo (USLE)*". La fórmula fue desarrollada en el Centro Nacional de Datos de Escurrimiento y Pérdida de Suelo "*National Runoff and Soil Loss Data Center*", establecido en 1954 por la Administración de Ciencia y Educación. Proyectos de investigación de por lo menos 49 sitios, contribuyeron con más de 10000 años de datos de escurrimiento y pérdida de suelo para realizar análisis estadísticos. Después de 1960, los simuladores de lluvia operados desde Indiana, Georgia, Minnesota y Nebraska; fueron usados en mediciones de campo de 16 estados de EUA. Para rellenar algunos de los espacios en los datos, que eran necesarios para la evaluación de la fórmula.

El análisis de este extenso grupo de datos básicos, trajo consigo mayores progresos para la fórmula de pérdida de suelo:

- a) Un índice de erosividad, evaluado a partir de las características locales e la lluvia.
- b) Un factor cuantitativo de erosionabilidad del suelo, que es evaluado directamente de las propiedades del suelo y es independiente de la topografía y las diferencias de precipitación.
- c) Un método para evaluar los cultivos y los efectos de su manejo en relación con las condiciones climáticas locales.
- d) Un método de contabilidad de los efectos de las interacciones entre el sistema de cultivos, nivel de producción, prácticas de tala y manejo de residuos.

La ecuación fue designada como universal porque estaba exenta de algunas generalizaciones, restricciones geográficas y climáticas inherentes a modelos anteriores.

La USLE (por sus siglas en inglés) es un modelo de erosión diseñado para predecir un promedio a largo plazo de pérdida de suelo. Debido al escurrimiento en áreas específicas con sistemas de manejo y cultivo determinados.

Con los valores de los parámetros disponibles, opciones de cultivo y manejo pueden ser determinadas para reducir la pérdida de suelo a valores de tolerancia sugeridos

para determinado tipo de suelo. Wischmeier (1976) dijo que la USLE puede ser utilizada apropiadamente para:

- a) Predecir un promedio anual de pérdida de suelo de alguna área con condiciones específicas.
- b) Guiar la selección de sistemas de cultivo, manejo y prácticas de conservación para suelos y pendientes específicas.
- c) Predecir el cambio en pérdida de suelo que resultaría de un cambio en las prácticas de cultivo y conservación en un terreno específico.
- d) Determinar cómo las prácticas de conservación pueden ser aplicadas o alteradas, para permitir un cultivo intensivo..
- e) Estimar pérdidas de suelo de terrenos no utilizados en la agricultura
- f) Proveer estimaciones de pérdidas de suelo para ser usadas en la determinación de las necesidades de conservación.

La Fórmula Universal de Pérdida de Suelo está dada por:

$$A = (R)(K)(LS)(C)(P) \quad (1. 27)$$

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de sus elementos.

### 1.7.2 Factor o índice de erosividad de la lluvia "Rainfall an Runoff Factor" (R)

El valor numérico usado para R en la ecuación de pérdida de suelo debe cuantificar el efecto de impacto de la lluvia y proveer de información relativa sobre el monto y magnitud del escurrimiento asociado a la lluvia. El índice de erosividad de la lluvia parece reunir, mejor que otros parámetros probados, todos los requerimientos.

Los datos de investigación indican que cuando algunos factores, diferentes a la lluvia se presentan constantemente. La pérdida de suelo de terrenos cultivados es directamente proporcional al parámetro de la tormenta identificado como (EI). La relación de pérdida de suelo con este parámetro es lineal. La suma de los valores EI de la tormenta en cierto periodo, representa una medida del potencial erosivo de la lluvia dentro del periodo.

#### *El parámetro (EI)*

El valor EI para una tormenta es igual al producto de la energía de la tormenta (E) por la intensidad máxima en 30 min. EI es una abreviación de veces energía "energy-

*times-intensity*", y el término no debe ser considerado como un parámetro de energía. El, también es un término de interacción estadística que refleja cómo la energía total y el pico de la intensidad de la lluvia son combinados en una tormenta particular.

La energía de una tormenta es una función del monto de lluvia y de los componentes de la tormenta. Tamaños de gotas medianos se incrementan con la intensidad de la lluvia, y las velocidades terminales de caída libre de las gotas se incrementan con su tamaño. La energía de una masa en movimiento es proporcional a su velocidad elevada al cuadrado, la energía de la lluvia está directamente relacionada con la intensidad de lluvia. Dicha relación está expresada por la ecuación:

$$E = 916 + 331 \log_{10} I \quad (1. 28)$$

En Sistema Internacional de Unidades (SI)

$$E = 1.213 + 0.89 \log_{10} I \quad (1. 29)$$

En donde E es la energía cinética en, kg m/m<sup>2</sup> mm e I es la intensidad de la lluvia en, mm/h.

El factor de erosividad de la lluvia (R), es obtenido dividiendo el producto (EI) entre 173.6 (SI). De esta manera el cálculo de R queda:

$$R = \frac{\left[ \sum_{j=1}^n (1.213 + 0.89 \log_{10} I_j)(I_j T_j) \right] I_{30}}{(173.6)} \quad (1. 30)$$

donde

- R índice de erosividad de la lluvia
- I<sub>j</sub> intensidad de la lluvia para un incremento de una tormenta específica, en mm/h
- T<sub>j</sub> periodo de tiempo para un incremento específico de la tormenta, en hr
- I<sub>30</sub> la intensidad máxima de la lluvia en 30 min para la tormenta, en mm/hr
- j incremento específico de la tormenta
- n número de incrementos de la tormenta

### 1.7.3 Factor de erosividad del suelo "Soil Erodibility Factor" (K)

La tasa de pérdida de suelo,  $A$ , en la ecuación, puede ser influenciada mayormente por la pendiente del terreno, características de la lluvia, cubierta y manejo que por las propiedades inherentes del suelo. Sin embargo, algunos suelos se erosionan con más facilidad que otros, aun cuando tengan factores similares. Diferencias en las susceptibilidades naturales a la erosión de los suelos, son difíciles de cuantificar por medio de observaciones de campo. Aún un suelo con un índice de erosividad bajo puede mostrar signos de erosión seria, cuando se presentan pendientes escarpadas o en donde ocurren numerosas tormentas de gran intensidad. Un suelo con un índice de erosividad alto, por otro lado, puede presentar escasa evidencia de erosión. Esto último bajo el efecto de una lluvia ligera cuando ocurre en pequeñas pendientes, o cuando el mejor manejo del suelo está en práctica. Los efectos de la lluvia, pendiente, cubierta y manejo son tomados en cuenta la USLE por medio de  $R$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $C$  y  $P$ . Por lo tanto, el factor de erosividad del suelo,  $K$ , tiene que ser evaluado independientemente de los efectos de otros factores.

El factor de erosividad del suelo,  $K$ , en la USLE es un valor cuantitativo determinado experimentalmente. Para un suelo en particular, representa la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión medida en una unidad de terreno "*unit plot*". El cual ha sido arbitrariamente definido como sigue:

Una unidad de terreno es 72.6ft (22.13m) de longitud, con una pendiente uniforme de 9 por ciento en un terreno barbecho labrado cuesta arriba y cuesta abajo. Dicha unidad fue seleccionada con base en los valores de  $L$ ,  $S$  y  $K$ . Terreno barbecho, para este propósito, es una región que ha sido labrada y liberada de cualquier tipo de vegetación por más de dos años. Durante el periodo de medición de pérdida de suelo, el terreno es arado y colocado en una condición de siembra de maíz convencional cada verano. Es labrado para prevenir el crecimiento de vegetación. Cuando todas estas condiciones son conocidas,  $L$ ,  $S$ ,  $C$ , y  $P$  pueden ser igual a 1, y  $K$  puede ser igual a  $A/EI$ .

### 1.7.4 Factor de pendiente y longitud "Topographic Factor" (LS)

$LS$  es el radio esperado de pérdida de suelo por unidad de área de un terreno con cierta pendiente. Por medio de este factor se toma en cuenta el efecto de longitud de pendiente "*slope length*" y gradiente. De manera separada la longitud de pendiente es definida como la distancia desde el origen del escurrimiento superficial hasta el punto en donde la pendiente decrece lo suficiente para que el escurrimiento se

deposite en un canal definido. El gradiente, es la pendiente usualmente expresada en porcentaje. El factor de longitud de pendiente fue definido como:

$$L = \left( \frac{x}{22.13} \right)^m \quad (1. 31)$$

donde

- L factor de longitud de pendiente
- x longitud considerada, en m
- m coeficiente empírico, adimensional

Wischmeier y Smith, propusieron las siguientes recomendaciones para el coeficiente m

- m = 0.5 si S ≥ 5%
- m = 0.4 si S < 5% y S > 3%
- m = 0.3 si S ≤ 3% y S ≥ 1%
- m = 0.2 si S < 1%

También, estos investigadores determinaron que la pérdida de suelo estaba correlacionada con el gradiente de elevación o pendiente de la siguiente forma:

$$S = \frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613} \quad (1. 32)$$

donde

- S factor del gradiente
- s pendiente, en %

Entonces el factor de pendiente y longitud, quedará definido de la manera siguiente:

$$LS = \left( \frac{x}{22.13} \right)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2) \quad (1. 33)$$

Esta ecuación fue utilizada para la construcción de la gráfica 1.10

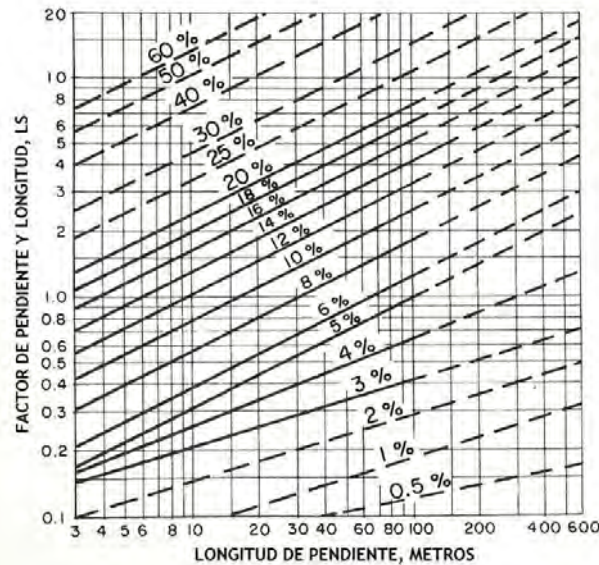


Figura 1. 9 Factor de Longitud de pendiente y pendiente, LS, para su uso con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

### 1.7.5 Factor de cobertura vegetal "Cover and Management Factor" (C)

Los efectos de la cubierta vegetal y manejo no pueden ser evaluados independientemente porque su efecto combinado está influenciado por muchas interrelaciones. Así pues, casi cualquier cultivo puede crecer de manera continua, o puede aumentar en rotación. El factor C en la USLE, representa el ratio de pérdida de suelo de una región sembrada bajo condiciones específicas de cubierta y cultivo a la correspondiente pérdida de suelo de un terreno limpio, labrado y barbecho. Para el mismo suelo, pendiente y tormenta.

Este factor incluye los efectos de interrelación de cubierta vegetal, secuencia de cultivo, nivel de producción, temporada de crecimiento, prácticas culturales, manejo de residuos, y distribución de la lluvia. La evaluación de este factor es a menudo difícil debido a la existencia de un gran número de sistemas de manejo y cultivo.

### 1.7.6 Factor de protección del suelo "Support Practice Factor" (P)

Es el ratio de pérdida de suelo con una práctica de protección específica a la correspondiente pérdida con una técnica "up-and-down hill". Los controles de erosión que a menudo incluyen este factor son: labranza de contorno, labranza en el sentido de la pendiente, labranza a través de la pendiente, labranza a través de la pendiente con surcos, cultivo con surcos en contorno.



Labranzas de conservación, rotación de cultivos, tratamientos de fertilidad y la retención de residuos son importantes para las prácticas de control de erosión. Sin embargo, estas prácticas están contenidas en el factor C.

Rango de la pendiente %	Práctica de Control de Erosión				
	Labranza en el sentido de la pendiente	Labranza a través de la pendiente	Labranza de contorno	Labranza a través de la pendiente con surcos	Cultivo con surcos en contorno
2 - 7	1	0.75	0.50	0.37	0.25
7.1 - 12	1	0.80	0.60	0.45	0.30
12.1 - 18	1	0.90	0.80	0.60	0.40
18.1 - 24	1	0.95	0.90	0.67	0.45

*Tabla 1. 2 Magnitud del factor "P" para prácticas de control de erosión en tierras de cultivo*

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Un problema esencial en el cálculo del transporte de los sedimentos durante las avenidas, es la determinación del material en suspensión comúnmente denominado transporte de lavado (wash load), producto de la erosión en la cuenca. En muchos de los casos, este material constituye la mayor parte del material sólido transportado. Es capaz de producir daños, cuando alguna corriente se desborda en una zona urbana, o bien, cuando al depositarse en los embalses causa la pérdida de su capacidad. En el capítulo anterior, ya se describió más a fondo este tipo de transporte.

La determinación del sedimentograma (curva que relaciona el transporte sólido con el tiempo) sirve principalmente para cuantificar el transporte de sedimento en suspensión en una corriente. Generalmente el sedimentograma relaciona la variación de las concentraciones (g/l) del material fino en suspensión con el tiempo (min), aunque en algunos casos se emplea para relacionar al gasto sólido (kg/s) con el tiempo (min); ambos conceptos son equivalentes cuando se asocian al hidrograma.

Actualmente, la cuantificación del material sólido transportado por una corriente, se hace solamente por medición directa en el sitio, o por ajuste e interpolación de datos previamente medidos. Mientras el registro de una avenida puede hacerse "fácilmente" empleando un limnógrafo, y donde no importa el momento en que se presenta la avenida, pues el registro es continuo, la medición del sedimento transportado sólo puede hacerse puntualmente, y como no se conoce la evolución de la avenida, es difícil el muestreo sistemático, independientemente de las dificultades prácticas para enfrentar la toma de muestras durante grandes avenidas.

En la mayor parte de las corrientes, no se dispone de dispositivos para medir el transporte de sedimento en el transcurso de la avenida. Motivo por el cual la información detallada sobre el transporte sólido es escasa.

Entonces un problema que trata de resolver esta tesis, es el de proporcionar una herramienta para cuantificar de manera práctica, el volumen de sedimento de lavado que fluye por una cuenca. La medición directa del sedimento, por medio de dispositivos, presenta varias dificultades. Debido al tamaño de la corriente, inseguridad para el operador y costo de los instrumentos. Como se verá más adelante muchos de los dispositivos, no son capaces de generar un registro continuo de manera automática. Debido a estas razones existen casos en los que, es más conveniente calcular que medir.

### 3. ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS DIRECTOS

#### 3.1 Aforo del caudal sólido

##### 3.1.1 En pequeñas cuencas

La medición del caudal sólido en pequeñas cuencas, generalmente se realiza al evaluar la erosión que se produce en parcelas experimentales y cuencas de pequeña extensión.

<i>Tamaño de la cuenca, km<sup>2</sup></i>	<i>Descripción</i>
< 25	muy pequeña
25 a 250	pequeña
250 a 500	intermedia - pequeña
500 a 2500	intermedia - grande
2500 a 5000	grande
> 5000	muy grande

*Tabla 3. 1 Clasificación de una cuenca en función de su área*

Una parcela experimental se compone de una extensión de terreno de algunas centenas de metros cuadrados que actúa como una cuenca hidrológica totalmente independizada del resto del área. Para conseguir esta unidad hidrológica de tan pequeña extensión se hace preciso el aislarla a lo largo de su perímetro utilizando diversos medios como pueden ser muretes de mampostería hidráulica, paredes metálicas, zanjas, etc., de tal modo que se llegue escurrimiento de terrenos circundantes. En el punto de desagüe de la parcela se instala un sistema receptor que permite evaluar el volumen de agua y cantidad de tierra que sale de ella después de cada tormenta.

Los dispositivos de medición que se utilizan son muy diversos, siendo su constitución y funcionamiento de relativa facilidad. A continuación se hace referencia a un sistema de medición que se ha utilizado por los servicios de conservación de suelos de diferentes países europeos y americanos. El escurrimiento de la parcela se concentra en una especie de embudo situado en el punto de cierre, de aquí, mediante un canal pasa a un tanque de sedimentación, el cual retiene la mayor parte de la tierra que transportan las aguas y que procede de la erosión del suelo de la parcela. El escurrimiento pasa a través de varias cajas distribuidoras a un segundo tanque de captación. Las cajas distribuidoras son, de modo esquemático, placas de un número determinado de ranuras verticales e iguales, las cuales dividen el flujo del agua en

partes proporcionales, de esta manera la segundo tanque de captación llega únicamente una fracción representativa del flujo total que por su pequeña cuantía facilita el hacer las determinaciones que en cada caso se requieran.

Después de cada lluvia se determina el peso conjunto de agua y suelo recogido en cada tanque y se toman muestras representativas, en las cuales, siguiendo técnicas de laboratorio adecuadas, se determinará el peso de sedimento que contienen.

Las parcelas experimentales por su pequeña extensión, entendiéndose menores a 100 Has, permiten medir y controlar con rigor los valores de la pendiente, cubierta vegetal, naturaleza del suelo y precipitación caída en cada aguacero. Al registrar al mismo tiempo la cuantía del escurrimiento y cantidad de tierra erosionada permite correlacionar a ésta con los factores que la definen y así estudiar la posible influencia de tales factores en los fenómenos erosivos.

Las cuencas pequeñas, se eligen constituyendo unidades hidrográficas lo más perfectamente diferenciadas de las circundantes evitándose así la necesidad de aislarlas en todo su contorno, lo que como es lógico pensar sería costoso. El mayor escurrimiento genera transporte de materiales sólidos producto de la erosión, lo cual exige el adoptar técnicas de medición específicas. Por otra parte, dado que los datos recopilados son utilizados en el campo hidrológico, y por consiguiente, que en muchas ocasiones los lugares se encuentran en la parte más alta de la cuenca, donde la dificultad de acceso impide que el personal encargado de la toma de muestras esté en los momentos oportunos para realizarla, se hace necesario que su funcionamiento sea automático.

### **3.1.2 Método de la botella muestreadora, desarrollado por el Servicio Hidrológico Forestal de California**

La estación, en síntesis, consta de un dique de cierre con vertedor triangular que retiene parte del material sólido transportado por el escurrimiento. Las aguas al pasar el dique llevan en suspensión partículas de suelo cuya valoración se hace a base de tomar muestras mediante un sistema de funcionamiento automático. Este sistema consta de dos dispositivos diferenciados en su función y que de aquí en adelante se denominarán "dispositivo muestreador" y "dispositivo motor". Figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

El dispositivo muestreador consta de una botella de plástico, de medio litro aproximadamente de capacidad, adosada al extremo de un tubo que puede ser igualmente de plástico. La botella y tubo van unidos a un listón que refuerza al conjunto y que, puede bascular en determinadas ocasiones sobre un eje de giro

situado en el extremo de un soporte vertical encajado en el suelo. La longitud del tubo y listón puede estar comprendida entre 1 y 1.20 metros y debe cumplirse como condición imprescindible que el brazo que no contiene a la botella pese más que el brazo cuando la botella está vacía, y ligeramente menos, cuando la botella se llene.

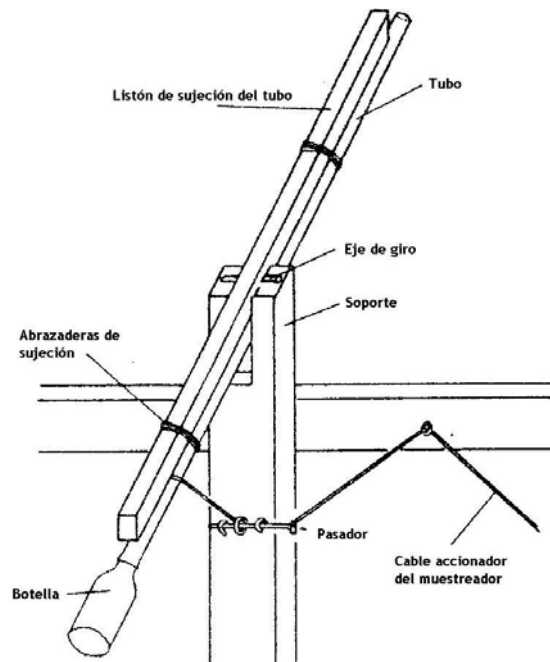


Figura 3. 1 Dispositivo muestreador en perspectiva

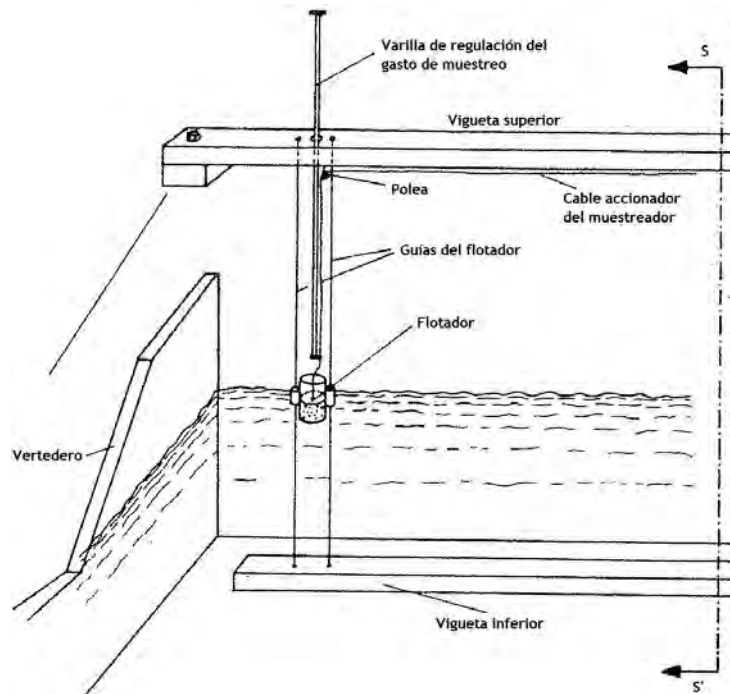


Figura 3. 2 Dispositivo motor en perspectiva

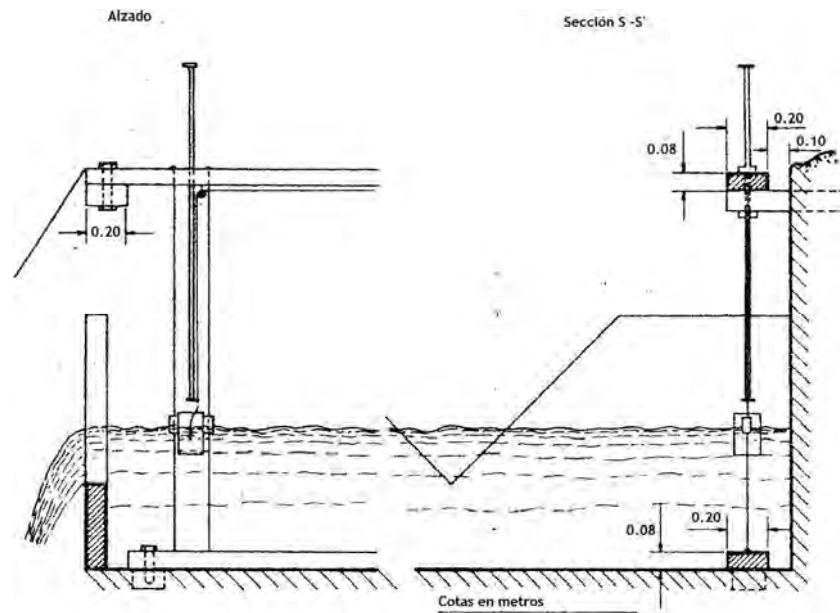


Figura 3. 3 Dispositivo motor, alzado

Antes de tomar la muestra, el dispositivo está anclado por un pasador. Y para que adopte la posición de toma de muestra es preciso retirar ese pasador con lo que se consigue dejar el tubo en libertad de giro y que el extremo opuesto al de colocación de la botella descansa sobre un canalón por el que se han desviado las aguas que han de muestrearse. En este instante comienza a llenarse la botella y cuando lo esté totalmente, el peso del agua recogida obliga a girar el tubo y volver a su posición inicial.

Generalmente, conviene tomar muestras para más de una altura de la corriente (es decir, para distintos caudales) siendo necesario para ello el disponer de tantos muestreadores como alturas se consideren, ya que cada sistema recoge una sola muestra.

Finalmente, se señala que la estación deberá complementarse con un limnógrafo que evalúe el escurrimiento de la cuenca; el conocimiento de este dato juntamente con la concentración de tierra de las muestras recogidas permite evaluar la cantidad de material sólido que va en suspensión y que no queda detenido en el vaso del dique. Este valor sumado a los acarreo dará en definitiva la cantidad de suelo que se ha perdido en la cuenca.

### 3.1.3 En grandes cuencas

La determinación del caudal sólido transportado por los cursos de agua es uno de los problemas de mayor complejidad presentados en el campo de la hidrología. Para su resolución se han aportado diversos procedimientos y utilizado diferentes técnicas que de un modo general pueden encuadrarse en los grupos siguientes:

a) Promover mediante estructuras adecuadas ubicadas en los cursos (canales de turbulencia, vertederos especiales) que el conjunto de todas las partículas sólidas transportadas por la corriente vaya en suspensión. Determinada la concentración en diferentes puntos de la corriente mediante la recolección de muestras y conocida la ley de distribución de velocidades de aguas, un fácil cálculo matemático resolvería el problema.

b) Calcular por separado los acarrees y suspensiones mediante la recolección de muestras, con aparatos especiales, de ambos transportes.

c) Calcular las suspensiones recogiendo muestras y determinando los acarrees de un modo indirecto por la aplicación de métodos analíticos basados en la granulometría del material constitutivo del lecho y determinados parámetros característicos de la corriente. Entre estos métodos cabe destacar el ideado por H.M.EINSTEIN con las modificaciones introducidas por COLBY y HUBBELL.

#### *Medida del caudal sólido en suspensión*

Si los sedimentos en suspensión se distribuyeran uniformemente en toda una sección transversal de la corriente, la determinación del gasto en suspensión sería una cuestión de relativa facilidad, tomando una muestra en un solo punto y determinando su concentración, ésta sería la concentración media de toda la sección; el gasto en suspensión sería igual al producto de la concentración hallada por el gasto total del curso, comprendiendo en éste el conjunto de la parte sólida y líquida. Desgraciadamente las cosas no ocurren así ya que la concentración varía más o menos en los diferentes puntos de la sección, siendo preciso el tener en cuenta tales variaciones si se quiere determinar el transporte sólido con cierto grado de exactitud.

De lo expuesto se puede prever la necesidad imperiosa de obtener datos básicos en el propio curso tanto relativos a la distribución de velocidades de las aguas como a la variación de la concentración de sedimentos en los diferentes puntos de la sección del curso elegida.

## Determinación del caudal instantáneo de sedimentos en suspensión

La concentración de sedimentos en suspensión como se ha expuesto anteriormente varía en los diferentes puntos de una sección. Por lo que el problema a plantear puede describirse en dos puntos

- ▶ Elección de verticales a muestrear y localización
- ▶ Muestreo de verticales

### *La elección de verticales a muestrear, su número y localización*

Los métodos de selección de verticales donde se efectuará la toma de muestras puede englobarse en dos grupos generales

- ▶ Verticales espaciadas arbitrariamente

Se puede elegir una sola vertical o varias verticales. De considerar una sola ésta debe corresponder al punto medio de la sección, o bien al lugar de mayor profundidad. Esta última es más aconsejable ya que por la zona más profunda discurre la mayor proporción de caudal de agua. Sin embargo, el considerar una sola vertical solamente es indicado para corrientes pequeñas y cuando no es preciso obtener resultados con gran exactitud.

La elección de varias verticales es obvio que aportará resultados más representativos. La experiencia aconseja localizarlas a  $1/4$ ,  $1/2$  y  $3/4$  del ancho de la sección o bien a  $1/6$ ,  $1/2$  y  $5/6$ .

- ▶ Verticales uniformemente espaciadas

Se divide el ancho de la sección en varias fracciones de igual magnitud y en cada punto medio se fija la vertical correspondiente. El número de intervalos (en general entre 10 y 25) dependerá del ancho del curso, uniformidad de los sedimentos y distribución de la velocidad de las aguas en la sección considerada.

Muestreo de verticales: Existen dos métodos generales de muestreo a fin de obtener la concentración de sedimentos correspondientes a una determinada vertical:

a) Recogiendo una muestra a lo largo de toda la vertical



## b) Recogiendo muestras en determinados puntos de la vertical

Para el primer método se utiliza un muestreador que recorre la vertical con velocidad constante. Posee una boquilla por donde penetra la muestra a una cavidad interior. La cantidad de muestra recogida en cada punto es proporcional a la velocidad de las aguas. Para corrientes de profundidad inferior a 5 m. se recorre la vertical en los dos sentidos ascendente y descendente, permaneciendo en el fondo instantáneamente. Para corrientes de profundidad superior a 5 m. solamente en un sentido, bien desde la superficie hasta el fondo o viceversa. La ventaja del muestreo en profundidad radica en que con una sola muestra está determinada la concentración en toda la vertical o bien en una fracción si se trata de grandes profundidades. Como inconveniente el que los aparatos a utilizar dejan una pequeña zona en la proximidad del lecho sin recoger muestra.

Para el segundo método la toma de muestras se realiza mediante aparatos denominados integradores puntuales que actúan en puntos determinados de una vertical. El muestreador se mantiene fijo en medio de la corriente y mediante una boquilla orientada en dirección de la velocidad de las aguas recoge la muestra en el punto considerado. La velocidad de entrada de la muestra en la boquilla debe coincidir con la instantánea de la corriente. El muestreador debe estar acondicionado para que actúe únicamente cuando esté situado en el punto a muestrear.

El primer problema que se plantea es el criterio a seguir para fijar los puntos dentro de la vertical a muestrear. Existe una gran diversidad de métodos a este respecto utilizados por diversos investigadores. Se hará referencia en este trabajo a dos concretamente: al método de Straub y el de B.C. Colby.

El método de Straub, empleado en el río Missouri, se basa en las hipótesis de que la distribución de la velocidad a lo largo de una vertical sigue una ley exponencial y que la concentración de sedimentos aumenta linealmente desde la superficie al fondo. La ecuación a emplear es:

$$C_m = \frac{3}{8}C_{0.8d} + \frac{5}{8}C_{0.2d} \quad (3. 1)$$

donde

$C_m$  concentración del caudal correspondiente a la vertical

$C_{0.8d}, C_{0.2d}$  las concentraciones de muestras recogidas a 0.8 y 0.2 de profundidad, respectivamente

El método recomendado por B.C. Colby es el siguiente:

La profundidad de una vertical se divide en fracciones de igual magnitud y las muestras se toman en los puntos medios de cada fracción. La concentración del caudal correspondiente a la vertical muestreada se determina como media ponderada de las concentraciones puntuales halladas, dando a cada una de éstas un peso igual a la velocidad de la corriente en el punto muestreado. La necesidad de conocer la distribución de velocidades puede eliminarse registrando el tiempo de recogida de la muestra y utilizando este valor como peso en vez de la velocidad de la corriente.

### *Aparatos de muestreo*

Son muy numerosos los aparatos que se han venido utilizando para la recogida de muestras del material transportado en suspensión y aunque han sido ideados por diversos investigadores lo cierto es que muchos de ellos son similares tanto en su construcción como en la forma de actuar. Aquí se hará referencia, de modo general, a los aparatos denominados “*turbisondas*” empleados para la recogida de muestras en profundidad (integradores en profundidad) y para la toma puntual (integradores puntuales)

### *Integradores en profundidad*

En líneas generales, constan de un cuerpo hidrodinámico en cuyo interior va alojada una botella. Una boquilla, situada en la cabecera o parte delantera del aparato, permite la recogida de la muestra al poner en comunicación el interior de la botella con la corriente. Conjuntamente poseen un dispositivo regulador de la presión del aire existente en el interior de la botella, que consiste en un tubo de escape que parte de la botella y sale al exterior un poco por encima de la boquilla.

Para que la muestra sea representativa, la turbisonda ha de perturbar lo mínimo posible las características de la corriente, fundamentalmente la velocidad de las aguas en el trayecto a muestrear. Si la velocidad en la boquilla disminuye, al introducirse. Se producirá una divergencia en las líneas de corriente, divergencia que las partículas sólidas experimentarán en menor cuantía por ser mayor su inercia, lo que motivará que la muestra tenga una concentración superior a la real. Ocurrirá lo contrario si la velocidad aumenta. En este caso la convergencia de las líneas de corriente no la seguirán las partículas sólidas y como consecuencia la muestra recogida tendrá una concentración inferior.

El dispositivo regulador de presiones, contribuye de un modo fundamental para evitar esto. Haciendo que en todo instante la presión del aire de la botella se ajuste lo máximo posible a la que posee el área muestreada. Es lógico pensar que si la presión en el interior de la botella es inferior o superior a la existente en la entrada a la boquilla, la diferencia de presiones creada originará una aceleración o desaceleración respectivamente.

En síntesis estas son las ideas fundamentales y más comunes que encierran la diversidad de integradores en profundidad proyectados. En U.S.A. los tipos más utilizados son los denominados US DH-48, US DH-59, US D-43 y US D-49. Se hablará con detalle de ellos más adelante.

### *Integradores puntuales*

Se utilizan para recoger muestras de la corriente a fin de determinar la concentración de sedimentos en puntos de una vertical.

Constan de un cuerpo hidrodinámico en forma de salmón en cuyo interior se aloja la botella o recipiente donde se recogerá la muestra. Esta se capta mediante una boquilla dirigida en dirección de la corriente. Existe también en el interior del muestreador una cámara de aire que se comunica con la botella y boquilla mediante un tubo (tubo igualador de presiones) y en su parte inferior dispone de un agujero siempre abierto que permite el libre acceso de la corriente al interior de dicha cámara. Un tubo de escape permite la salida de aire del interior de la botella. Los pasos a través de la boquilla, tubo igualador y tubo de escape se controlan mediante una válvula accionada eléctricamente.

El funcionamiento es como sigue: al introducirse la turbisonda en la corriente y hasta que se inicia el muestreo, la boquilla y el tubo de escape están interceptados. El tubo igualador está libre. Por el agujero de fondo de la cámara se introducen las aguas, consiguiendo así que la presión del aire en cámara y botella sea la correspondiente a la corriente. Una vez iniciado el muestreo se pone en libertad la boquilla y el tubo de escape y se cierra el tubo igualador. De esta forma se consigue que la entrada inicial de las aguas se efectúe con velocidad análoga a la de la corriente y mientras se esté llenando la botella se conserve tal velocidad, ya que el incremento de presión no se producirá al existir una salida de aire mediante el tubo de escape. Una vez recogida la muestra se interceptan de nuevo los pasos de la boquilla y tubo de escape, y se saca la turbisonda al exterior.

Existe una gran variedad de integradores puntuales presentando ciertas características que les hacen aconsejables a corrientes de distintas profundidades. El Subcomité de Sedimentación de U.S.A. con la intervención de varios organismos afectados a los problemas de sedimentación ha experimentado diversos modelos entre los que cabe citar los siguientes: US P-46, US P-6 1, US P-50.

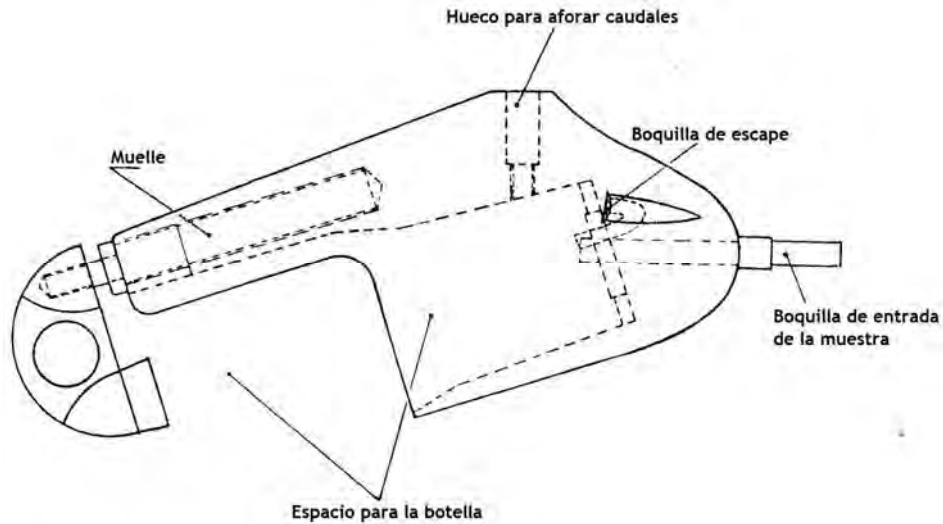


Figura 3. 4 Integrador en profundidad US DH 48

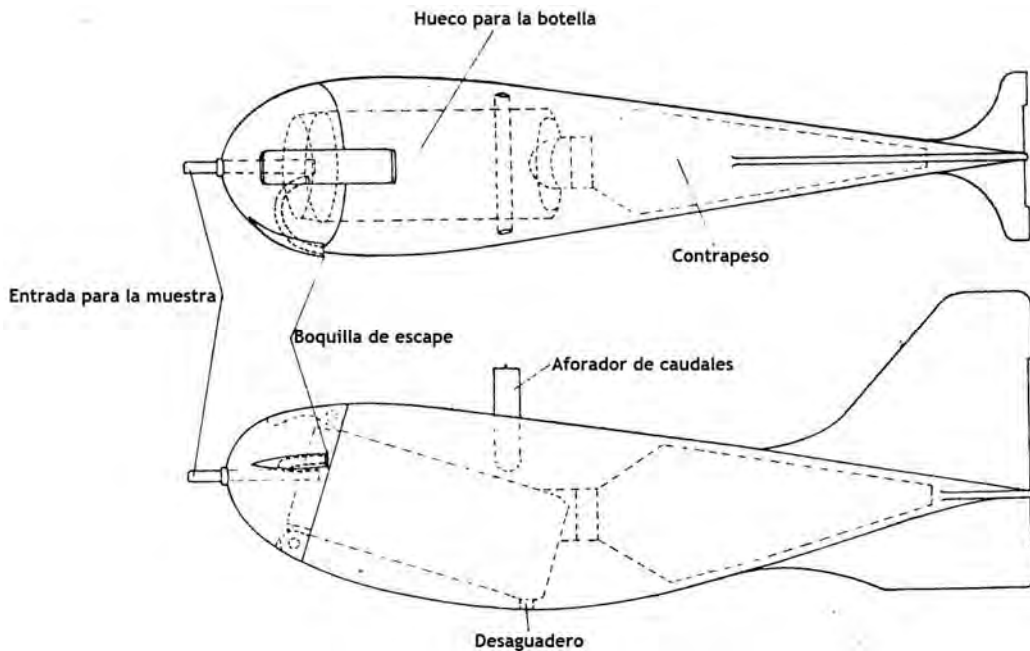


Figura 3. 5 Integrador en profundidad US DH 59

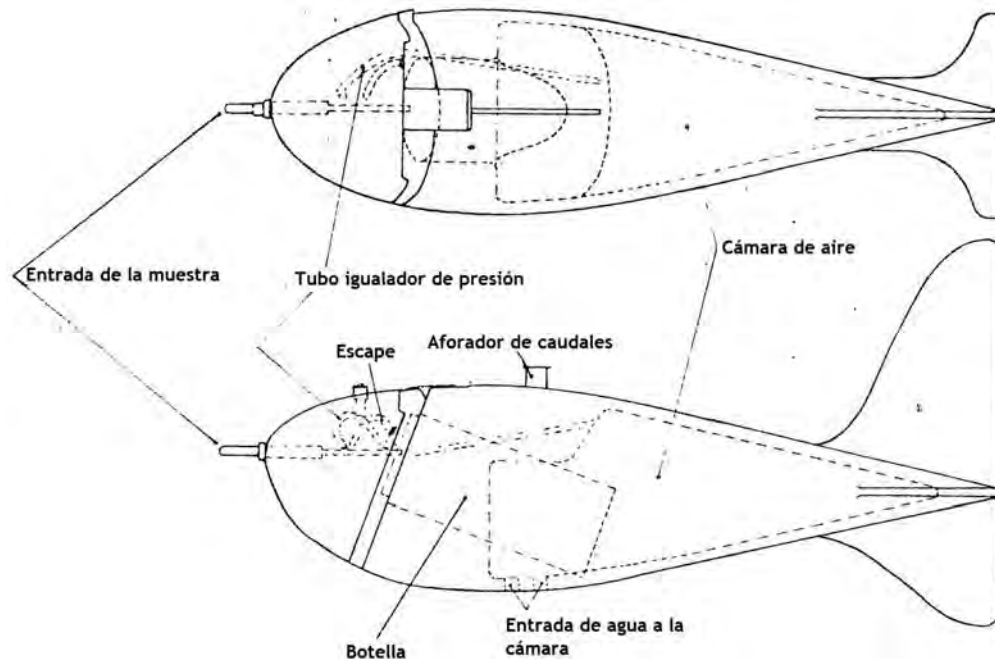


Figura 3. 6 Integrador puntual US P-46 R

## 3.2 Instrumentos de campo para medir la carga de sedimentos en suspensión

### 3.2.1 Guía para la elección de muestreadores de transporte de sedimento

La selección de la técnica de muestreo más apropiada debe estar basada en una serie de criterios, como se escribe a continuación:

#### 1. Tipo de proceso / parámetros que serán medidos:

- ▶ Material de fondo
- ▶ Arrastre de fondo
- ▶ Carga en suspensión
- ▶ Tamaño de partícula del fondo y de sedimento en suspensión
- ▶ Tamaño de partícula del sedimento en suspensión de floculación
- ▶ Velocidad de caída del sedimento

#### 2. Tipo de ambiente de muestreo

- ▶ Ríos, estuarios, mares y costas
- ▶ Sedimentos involucrados: Lodo, arcilla, arena, grava, mezclas, material de floculación
- ▶ Rango de profundidad y rango de velocidad involucrado

### 3. Tipo de muestreo

- ▶ Mediciones on - line utilizando un instrumento de mano en corrientes poco profundas o instrumentos instalados en una embarcación y conectados a través de un cable, estos instrumentos pueden ser también guiados por medio de una estructura como un puente o una plataforma
- ▶ Mediciones semipermanentes (stand alone), estas están diseñadas para periodos largos y normalmente están instaladas en trípodes u otras estructuras en la corriente
- ▶ Mediciones puntuales usando sensores que sólo medirán el comportamiento de un solo punto
- ▶ Mediciones a través del perfil (integradores de profundidad); se utilizan instrumentos que atraviesan el flujo o parte de él. Por medio de señales de un instrumento como las acústicas y las ópticas.

### 4. Tipo de proyecto y precisión requerida

- ▶ Estudio de reconocimiento para conseguir una estimación burda de los parámetros involucrados
- ▶ Procesos que requieren del entendimiento de detalles del sistema físico (flujo turbulento)
- ▶ Estudios enfocados en gran distribución espacial y temporal (dragado y plumas de distribución de desechos)
- ▶ Datos para modelación matemática como son las condiciones de frontera, con propósitos de diseño
- ▶ Datos para la verificación de modelos

### 5. Tipos de instrumentos disponibles

Para medir el sedimento en suspensión, una gran cantidad de instrumentos están disponibles. Desde los simples instrumentos mecánicos, hasta los muestreadores más avanzados como con los ópticos y los acústicos. La mayoría de los muestreadores son usados como integradores de la información de un punto. Esto significa la medición de los parámetros más relevantes en un punto específico sobre el fondo como función del tiempo. Algunos de los instrumentos son usados como integradores en profundidad, lo que significa que muestrean sobre el fondo subiendo y bajando el instrumento.

Las características más importantes de los instrumentos son: Periodo de muestreo, periodo mínimo de ciclo y precisión.

*Periodo de muestreo*

El periodo de muestreo es el tiempo durante el cual la muestra es recolectada. Para el instrumento muestreador de botella y de tipo trampa, este tiempo es igual al tiempo en el que se llena la botella o trampa. Para la botella Delft, el periodo de muestreo está restringido por el tamaño del contenedor de sedimento. De la misma forma, algunos dispositivos presentan restricciones de tamaño del filtro que utilizan. Como es el caso del muestreador bomba - filtro. En el caso de los muestreadores acústicos y ópticos, el periodo de toma de muestra no presenta ninguna restricción.

*Periodo mínimo de ciclo:*

Es el mínimo tiempo entre dos mediciones sucesivas en puntos adyacentes en sentido vertical. Este dato puede ser usado para evaluar el periodo de tiempo necesario para cubrir la medición de la concentración completa.

*Precisión*

Es una estimación del error total que de una sola medición debido a errores de medición y errores de fluctuación estocástica relacionados a un proceso físico. Estos últimos errores son inducidos por la fluctuación estocástica de los parámetros físicos que serán medidos.

Muestreadores de carga en suspensión	Carga en suspensión		Parámetro medido	Rango de medición (mg/l)	Tiempo de respuesta (s)	Periodo de muestreo (min)	Periodo mínimo de ciclo (min)	Precisión	
	Limos (<50µm)	Arenas (>50µm)						Limos	Arenas
<b>Instrumentos mecánicos</b>									
Botella	Si	Si	Conc.	>1	-	1	5	100 %	100 %
Trampa	Si	Si	Conc.	>1	Instante	Instante	5	100 %	100 %
USP - 61	Si	Si	Conc. Trans.	>1	-	1	5	100 %	100 %
Botella Delft	No	Si	Trans.	>10	-	5 - 30	10	-	50 %
Bomba - filtro	No	Si	Conc.	>10	-	5 -15	10	-	20 %
Bomba - sedimentación	No	Si	Conc.	>50	-	5 -15	15	-	20 %
Botella bomba	Si	Si	Conc.	>1	-	1 - 5	5	20 %	20 %
<b>Instrumentos electrónicos</b>									
Optical - OBS	Si	No	Conc.	10 - 100000	<1	Libre	5	50 %	-
Optical - LISST	Si	Si	Conc. P. Size	10 - 500	<1	Libre	5	30 %	30 %
Bomba - OBS	Si	No	Conc.	10 - 100000	-	Libre	5	50 %	-
Acústico - punto ASTM	No	Si	Conc. Trans.	10 - 10000	<1	Libre	5	-	50 %
Acústico - ABS	No	Si	Conc.	10 -10000	<1	libre	5	-	50 %

*Tabla 3. 2 Características de los instrumentos para concentración y transporte*

### 3.2.2 Medición de transporte de sedimentos en ríos, estuarios y costas

Los instrumentos disponibles, son capaces de medir:

- ▶ Sedimento de transporte de fondo
- ▶ Concentraciones de sedimento en suspensión y tasas de transporte
- ▶ Tamaño de partículas y velocidades de caída

Sedimento en suspensión, concentración y transporte en ríos, estuarios y costas

Tipo de sedimento	Tipo de método	Tipo de muestra	Precisión
Lodo/limos	Botella - bomba	On - line	20% botella llenada con bombeo durante 15 min.
	Botella USP - 61	On line (Toma a mano < 1m)	20% - 30% requiere muchas muestras, no cercano al lecho
	Botella/trampa	On line (Toma a mano < 1m)	20% - 30% requiere muchas muestras, no cercano al lecho
	Laser (LISST)	On - line Semipermanente	20% - 30% concentración < 150mg/l
	Óptico (OBS)	On - line Semipermanente	30% - 50% depende del número de muestras de calibración.
	Óptico - bomba (OBS)	On - line	30% - 50% depende del número de muestras de calibración. Botella llenada con un sensor
Arena	Botella - bomba	On - line	20% botella llenada con bombeo durante 15 min.
	Bomba - filtro	On - line	20% muestra incompleta, partículas menores al filtro
	USP - 61 botella	On - line	20% - 30% requiere muchas muestras, no cercano al lecho
	Botella/trampa	On - line	20% - 30% requiere muchas muestras, no cercano al lecho
	Acústico (ASTM, ABS)	On - line Semipermanente	20% - 30% depende del número de muestras de calibración.
	Laser (LISST)	On - line Semipermanente	20% - 30% concentración < 500mg/l
	Botella Delft	On - line	50% requiere muchas muestras, muestra incompleta de partículas finas; no cercano al lecho

*Tabla 3. 3 Características de los métodos de muestreo para carga suspendida en ríos*



Tipo de sedimento	Tipo de método	Tipo de muestra	Precisión
Lodo/limos	Botella - bomba	On - line	20% - 30% botella llenada con bombeo durante 15 min.
	Óptico - bomba (OBS)	On - line	30% - 50% depende del número de muestras de calibración. Botella llenada con un sensor
	Laser (LISST)	On - line Semipermanente	20% - 30% concentración < 150mg/l
	Óptico (OBS)	On - line Semipermanente	50% depende del número de muestras de calibración.
	Botellas y trampas	On - line	Factor 2, limitado número de muestras; no cercano al lecho
Arena	Botella - bomba	On - line	20% botella llenada con bombeo durante 15 min.
	Bomba - filtro	On - line	20% muestra incompleta, partículas menores al filtro
	Laser (LISST)	On - line Semipermanente	20% - 30% concentración < 150mg/l
	Acústico (ASTM, ABS)	On - line Semipermanente	20% - 30% depende del número de muestras de calibración.
	Botellas y trampas	On - line	Factor 2 a 3, limitado número de muestras; no cercano al lecho

Tabla 3. 4 Características de los métodos de muestreo para carga suspendida en estuarios

Tipo de sedimento	Tipo de método	Tipo de muestra	Precisión
Lodo/limos	Óptico (OBS)	On - line Semipermanente	50% depende del número de muestras de calibración.
Arena	Trampa mecánica	On - line	Factor 2 a 3, solo utilizable en lugares de poca profundidad
	Muestreador bomba	On - line	50%, sólo utilizable en orillas desde un muelle o plataforma
	Acústico (ASTM, ABS)	On - line Semipermanente	Factor 2 a 3, muestras in-situ no disponibles

Tabla 3. 5 Características de los métodos de muestreo para carga suspendida en costas

Los instrumentos disponibles para medir el sedimento en suspensión en costas son: Trampas mecánicas (trampas en zonas poco profundas, menos de 1m), muestreadores bomba, muestreadores ópticos y muestreadores acústicos.

Mediciones de material suspendido en condiciones combinadas de corrientes y olas, no pueden desarrollarse satisfactoriamente desde una embarcación. Hay dos opciones para estos casos:

1. Muestra on-line desde un muelle o embarcadero, conectado a la orilla, plataformas ubicadas sobre el lecho marino o trineos jalados por vehículos
2. Muestra semipermanente tomada desde marcos o trípodes sobre el lecho marino. Utilizando un conjunto de sofisticados sensores electrónicos



Figura 3. 7 AMF trípode de Rijkswaterstaat/RIZA (2001), Holanda

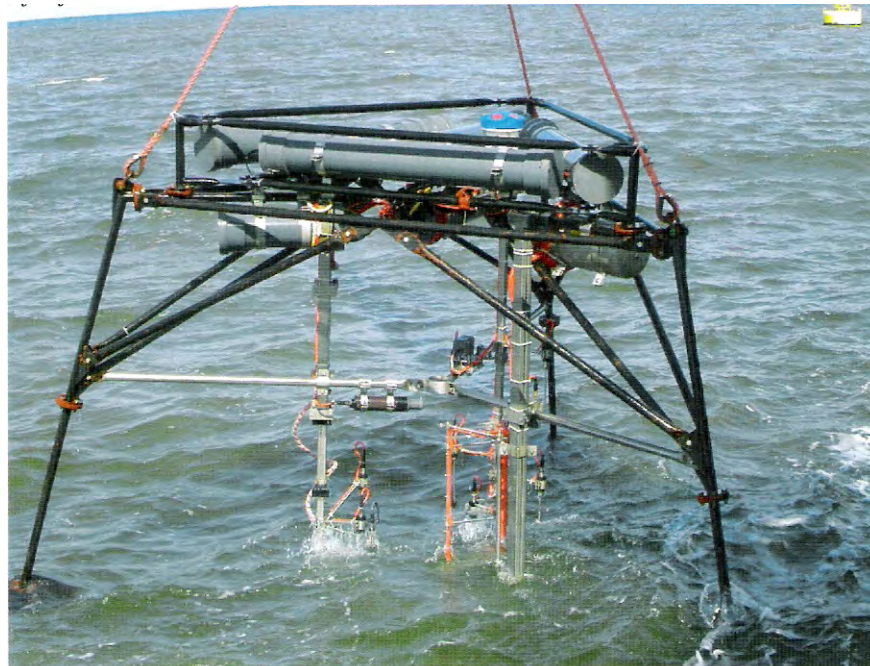


Figura 3. 8 HSM trípode de la Universidad de Utrecht (2005), Holanda

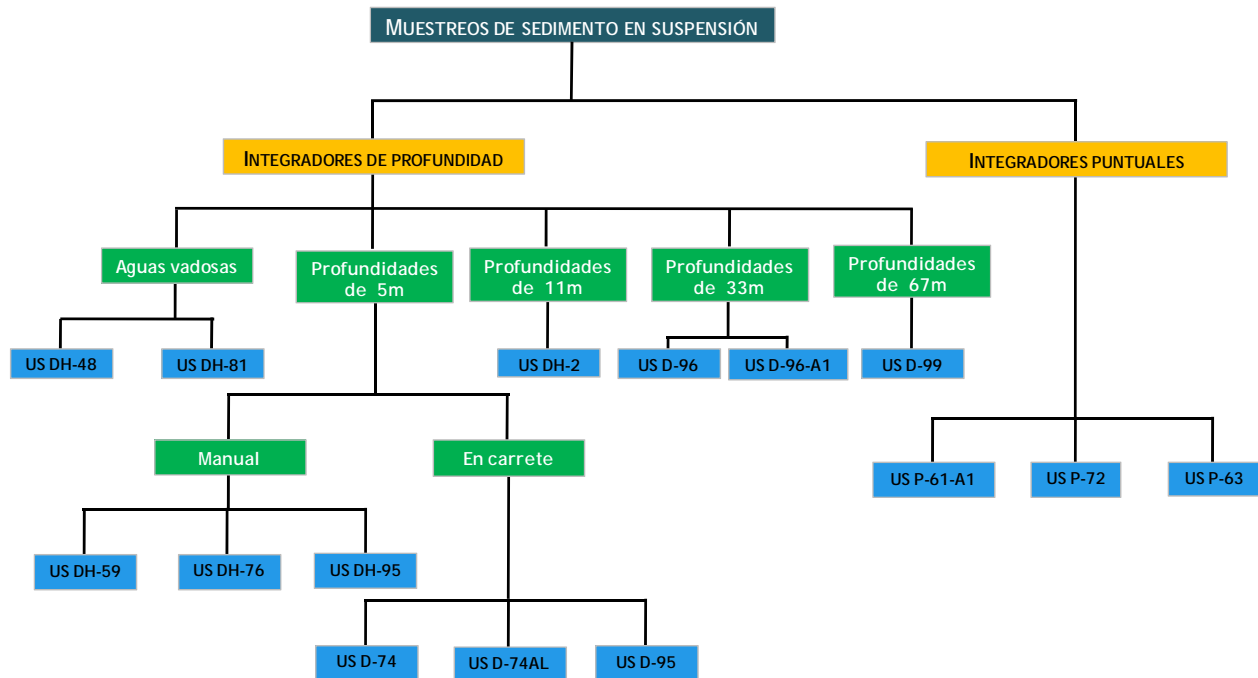


Figura 3. 9 Diagrama de selección para los muestreadores típicos de sedimento en suspensión (2005)

### 3.2.3 Clasificación de muestreadores

Muestreadores de sedimento en suspensión	Integradores puntuales	Integradores de profundidad
Método directo	Botella Delft	
	Muestreadores acústicos	
Método indirecto	Trampa	USD-49
	Botella	Bolsa muestreadora
	USP-61	
	Bomba	
	Óptico	
	Impacto	

Tabla 3. 6 Clasificación de muestreadores de acuerdo a su principio de medición

### 3.3 Muestreadores de botella y trampa

El principio básico de todas las botellas mecánicas y las trampas es la recolección de una muestra de sedimento con agua para determinar la concentración local de sedimento, transporte y/o tamaño de partícula mediante un análisis físico de laboratorio. Para lograr una recolección de muestra óptima, es necesario que la velocidad de entrada al instrumento sea igual a la velocidad local del flujo, esto se conoce como una muestra iso - cinética. Diferencias en dichas velocidades generarán errores en los resultados. Por ejemplo, si se toma una muestra a una velocidad menor a la local del flujo, se obtendrá una concentración de sedimento mayor.

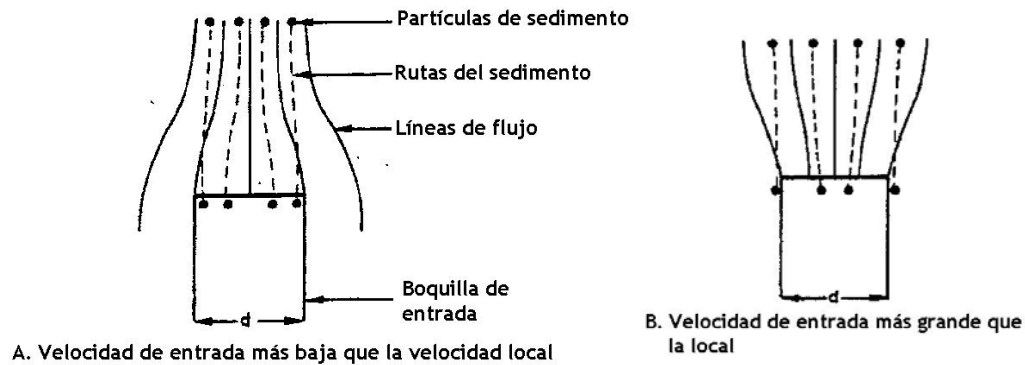


Figura 3. 10 Velocidad de entrada a la botella

### 3.3.1 Muestreador de botella

#### Principio

El método está basado en la idea de llenar una botella para determinar la concentración de material en un punto específico del flujo. La botella se coloca de forma vertical en un contenedor y se baja al punto deseado, la botella es abierta mediante un dispositivo eléctrico o mecánico. Una esfera es colocada en la botella para poder sellarla en cuanto esta se llene. El tiempo exacto de llenado es desconocido pero puede variar de 20 a 400 segundos.

#### Operación práctica

1. Hacer descender el contenedor hasta la posición de muestreo
2. Remover el obstáculo, eléctrico o mecánico, para tomar la muestra
3. Esperar hasta que la botella se llene (3 - 5 minutos)
4. Tomar las mediciones en una hoja apropiada
5. Se necesitarán análisis de laboratorio para determinar el contenido sólido

La cantidad de material es determinada como:

$$c = \frac{G_s}{V} \quad (3. 2)$$

donde

$G_s$  Es la masa seca del sedimento (mg)

$V$  Volumen de la muestra de agua (l)

### Ventajas

- ▶ Método simple para medir partículas de limo y arena
- ▶ Fácil de utilizar (no hay necesidad de electricidad)
- ▶ Manejable en condiciones adversas del ambiente
- ▶ Aplicable en condiciones de oleaje

### Desventajas

- ▶ Una gran cantidad de muestras, también consume una gran cantidad de tiempo
- ▶ Tiene un periodo muy corto de muestreo
- ▶ No es posible muestrear cerca del fondo del cauce

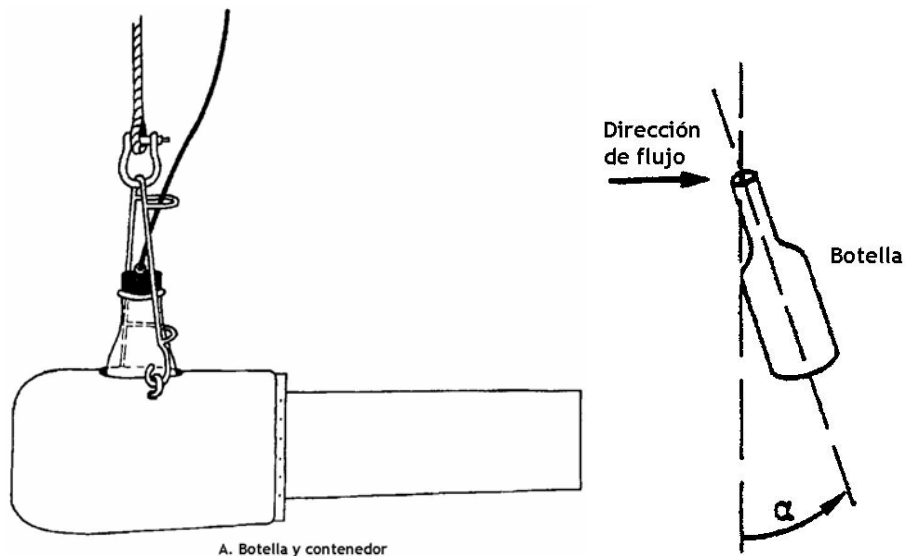


Figura 3. 11 Posición y elementos de la botella

### 3.3.2 Trampa instantánea

#### Principio

El muestreador de trampa instantánea consiste en un cilindro horizontal equipado con válvulas al final, que pueden ser cerradas repentinamente (por un sistema mensajero). Esto para atrapar la muestra instantáneamente. El agua fluye libremente a través del cilindro, mientras el muestreador es bajado al punto deseado.

#### Operación práctica

1. Bajar la trampa a la posición de medición
2. Cerrar las válvulas por medio del dispositivo mensajero
3. Elevar el muestreador

4. Transferir la muestra de sedimento a una botella
5. Anotar la medición en una hoja apropiada
6. Se necesitarán análisis de laboratorio para determinar el contenido sólido
7. La concentración es determinada mediante la ecuación 3.2

#### Ventajas

- ▶ Método simple para medir partículas de limo y arena
- ▶ Fácil de utilizar (no hay necesidad de electricidad)
- ▶ Manejable en condiciones adversas del ambiente
- ▶ Aplicable en condiciones de oleaje

#### Desventajas

- ▶ Una gran cantidad de muestras, también consume una gran cantidad de tiempo
- ▶ Tiene un periodo muy corto de muestreo
- ▶ Recipiente de muestra pequeño
- ▶ No muestrea cerca del lecho
- ▶ Muestras imprecisas de arena



Figura 3. 12 Trampa instantánea

### 3.3.3 Trampa integradora de tiempo

#### Principio

El principio es similar. Este tipo de trampa es la utilizada en lagos y océanos. Consiste en un cilindro con una base cerrada que se coloca verticalmente en la columna de agua. Son usadas para determinar:

- ▶ La gasto sólido de depósito del material a una determinada elevación
- ▶ La concentración del sedimento a determinada elevación

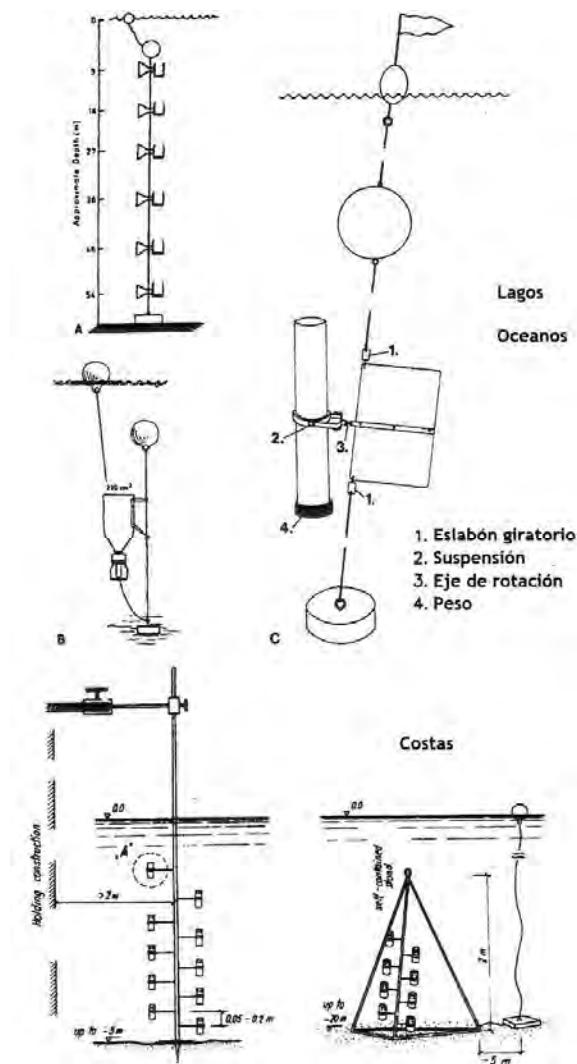


Figura 3. 13 Trampa integradora de tiempo

### 3.3.4 USP - 61 Integrador puntual

#### *Principio*

El muestreador consiste en un dispositivo de bronce, que encierra una botella de aproximadamente 500ml. Este muestreador ya fue descrito previamente, así que se presentará su operación, ventajas y desventajas.

#### *Operación práctica*

1. Bajar el instrumento a la posición de toma de muestra
2. Abrir la válvula eléctrica
3. Esperar a que la botella se llene, un 75% aproximadamente
4. Cerrar la válvula eléctrica
5. Izar el instrumento y reemplazar la botella
6. Anotar las mediciones en las hojas apropiadas
7. La concentración es determinada mediante la ecuación 3.2

#### *Ventajas*

- ▶ Método simple para medir partículas de limo y arena
- ▶ Fácil de utilizar (no hay necesidad de electricidad)
- ▶ Determinación directa del transporte

#### *Desventajas*

- ▶ Una gran cantidad de muestras, también consume una gran cantidad de tiempo
- ▶ Tiene un periodo muy corto de muestreo
- ▶ Recipiente de muestra pequeño
- ▶ No muestrea cerca del lecho
- ▶ Muestras imprecisas de arena

### 3.3.5 Botella muestreadora Delft

Está basada en el principio de continuidad, este menciona que el total de agua que ingresa al dispositivo por su boquilla es igual al que se libera del mismo por la salida trasera. Como resultado de la fuerte reducción de velocidad de flujo, producida por la geometría de la botella, las partículas de material más grandes que  $100\mu\text{m}$  se depositan en el interior. Utilizando este instrumento, se puede determinar el promedio de transporte de arena promedio.



*Operación práctica*

1. Bajar el instrumento a la posición de toma de muestra
2. Permitir escapar el aire por medio de la boquilla o abrir el dispositivo trasero
3. Comenzar el periodo de muestreo (anotar el tiempo)
4. Izar el instrumento lentamente (anotar el tiempo de izado)
5. Remover el agua del instrumento
6. Transferir la muestra a un vaso graduado y anotar el volumen
7. transferir la muestra a una botella para análisis de laboratorio
8. Anotar la medición en una hoja apropiada
9. La concentración es determinada mediante la ecuación

El promedio local de transporte de sedimento es determinado en  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$

$$S = \alpha(1 - \rho)\rho_s V_s / (FT) \quad \text{o} \quad S = \alpha G_s / (FT) \quad (3. 3)$$

donde

- $\alpha$  Factor de calibración
- $p$  Factor de porosidad
- $\rho_s$  Densidad del sedimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $G_s$  Masa del sedimento seco (mg)
- $V_s$  Volumen de la muestra de sedimento ( $\text{m}^3$ )
- $F$  Área de la boquilla ( $\text{m}^2$ )
- $T$  Periodo de muestreo (s)

## Ventajas

- ▶ Método simple para medir partículas de arena mayores a  $100\mu\text{m}$
- ▶ Periodo de muestreo largo
- ▶ Recipiente de muestra grande
- ▶ Determinación directa del transporte
- ▶ No necesita electricidad

## Desventajas

- ▶ No apto para partículas menores de  $100\mu\text{m}$
- ▶ Factores de calibración
- ▶ No apto para condiciones de marea
- ▶ No muestrea cerca del lecho

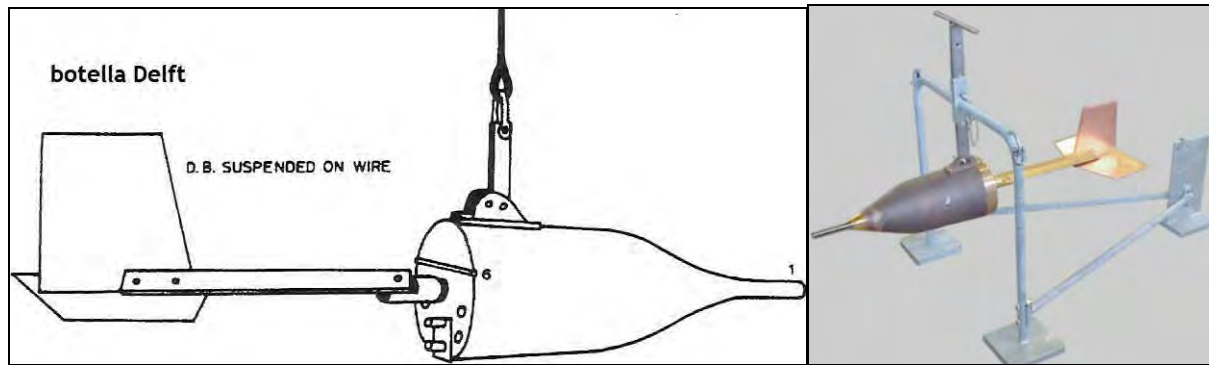


Figura 3. 14 Botella Delft

### 3.3.6 USD - 49 Integrador de profundidad

Muestreadores de este estilo, ya han sido descritos en la sección 3.1.3. Así que se muestran algunas generalidades del dispositivo.

#### *Operación práctica*

1. Bajar el instrumento a la posición de toma de muestra, dividiendo la profundidad en partes iguales, la muestra se obtendrá bajando e izando el instrumento
2. Reemplazar la botella o contenedor
3. Anotar el número de veces que se eleva y baja el instrumento
4. La concentración es determinada mediante la ecuación 3.2

#### Ventajas

- ▶ Método simple para medir partículas de limo y arena
- ▶ Determinación directa del transporte

#### Desventajas

- ▶ Para profundidades menores que 5m
- ▶ Muchas muestras requeridas
- ▶ Recipiente de muestra pequeño
- ▶ No muestrea cerca del lecho
- ▶ Frágiles boquillas de entrada

### 3.4 Muestreador bomba

Un muestreador de bomba, consiste en un dispositivo sumergible, una bomba montada y una manguera flexible conectada a la boquilla de entrada. El diámetro de la manguera debe ser lo más pequeño que se pueda.

Los muestreadores automáticos de este estilo cuentan con

1. Boquilla de entrada y sistema de tubería
2. Un contenedor en donde se tienen dispuestas botellas para su llenado
3. Un sistema de distribución para llenar la botella apropiada
4. Un sistema de activación que enciende y apaga el ciclo de muestreo



Figura 3. 15 Dispositivo de transporte del muestreador bomba, para funcionar debajo del agua

### 3.4.1 Muestreador Filtro - Bomba

#### *Principio*

La muestra de agua con sedimento es bombeada a través de un filtro que separa las partículas más grandes de las pequeñas. Para separar la fracción de arena, un filtro de nylon, con capacidad de  $50\mu\text{m}$ , puede ser usado. El volumen de agua es registrado por un dispositivo medidor. Después de tomada la muestra, el sistema de filtrado es abierto y el material atrapado es removido. Dicho material es llevado al laboratorio para su secado, registro de peso y análisis de tamaño de partícula respectivo.

#### Operación práctica

1. Bajar la boquilla de entrada al punto de medición
2. Abrir el contenedor del filtro para instalar el filtro de  $50\mu\text{m}$
3. Cerrar el contenedor de filtro y registrar el volumen inicial
4. Ajustar la velocidad de entrada a la velocidad del flujo
5. Esperar un minuto, mientras se lava la manguera por medio de un bypass
6. Bombear a través del filtro

7. Utilizar un periodo de muestreo de 5 min
8. Anotar el volumen registrado después de usar el bypass
9. Abrir el contenedor del filtro y remover el recipiente con el sedimento
10. Instalar un nuevo filtro
11. Anotar en una hoja apropiada
12. La concentración es determinada mediante la ecuación 3.2

#### Ventajas

- ▶ Método simple para medir partículas de arena
- ▶ Análisis de laboratorio simple
- ▶ Tamaño de muestra grande
- ▶ Apto para condiciones de oleaje

#### Desventajas

- ▶ No apto para limos
- ▶ Electricidad y una bomba son requeridos
- ▶ No muestrea cerca del lecho
- ▶ Partes mecánicas frágiles

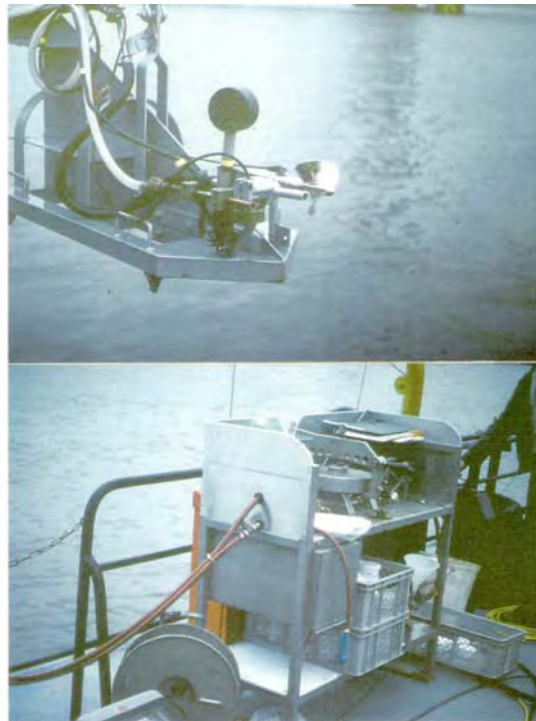


Figura 3. 16 Muestreador Filtro - Bomba

Otros dispositivos de tipo bomba son:

- ▶ Bomba de sedimentación

- ▶ Muestreador de bomba y botella

### 3.5 Muestreo con métodos ópticos y acústicos

Este tipo de muestreadores permiten la medición continua y sin necesidad de tocar el fluido. Es un importante avance comparado con los métodos mecánicos. Ambos métodos (ópticos y acústicos) tienen los siguientes principios de medición

- ▶ Transmisión
- ▶ Dispersión
- ▶ Transmisión - dispersión

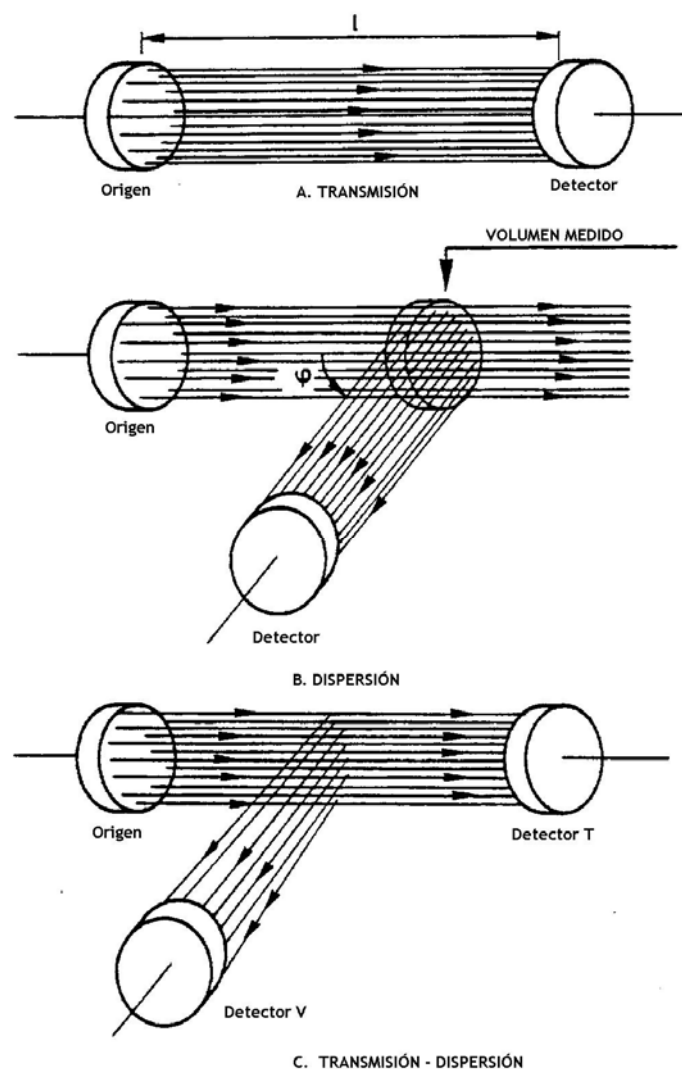


Figura 3. 17 Proceso de Transmisión - Dispersión, de los métodos acústicos y ópticos

Las principales ventajas que presentan estos métodos, como ya se comentaba, es la oportunidad de medición continua. Ya que se puede obtener un registro de medición

relativamente largo (un mes) de manera automática. Cuando hay poca variación de las concentraciones de limos, las mediciones en un punto determinado podrían ser consideradas como representativas de la sección transversal entera. Lo que podría sugerir la instalación de estos dispositivos en muelles o puentes. El lugar de medición es fácil de limpiar y accesible, para el cambio de baterías. El consumo de energía y el mantenimiento de almacenamiento de datos puede ser minimizado, por medio del uso de un interruptor que active el sensor por cortos periodos. Otra ventaja importante, es la posibilidad de hacer un barrido continuo de la sección y no solo en algunos puntos. Lo que habla de la rapidez para obtener datos de estos instrumentos.

### 3.5.1 Sensor óptico puntual de dispersión (Backscatter)

#### *Principio*

Este dispositivo es un sensor óptico para medir la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos. Por medio de la detección de una luz infrarroja, dispersa en materia suspendida. La respuesta de los sensores depende fuertemente del tamaño, composición y forma de las partículas en suspensión. Es importante mencionar que cada sensor requiere calibración, utilizando sedimento del lugar de interés.

Los sensores consisten en diodos que emiten luces infrarrojas de alta densidad. Un detector (cuatro fotodiodos) y un transductor lineal de temperatura en estado sólido. Los sensores miden la radiación de la luz dispersa por las partículas en el agua, a ángulos de 140 a 165 grados.

#### *Operación práctica*

1. Elevar y bajar el dispositivo a la posición de muestreo
2. Seleccionar el periodo de muestreo (3 a 5min)
3. Leer la señal de salida
4. Colectar muestras de agua simultáneamente para una apropiada calibración
5. Anotar en una hoja apropiada

#### *Ventajas*

- ▶ Muestra de volumen y tamaño pequeño
- ▶ Respuesta lineal; respuesta de alta frecuencia
- ▶ No sensible a burbujas de aire y luz del ambiente
- ▶ Rango de medición alto
- ▶ Instalaciones de largo plazo y semipermanentes
- ▶ Costo bajo

#### Desventajas

- ▶ Depende fuertemente del tamaño de partículas, calibración frecuente es requerida
- ▶ No apto para condiciones de mezclas entre arcilla, limo y arena
- ▶ No preciso para concentraciones debajo de 1000 mg/l (0.001 kg/m<sup>3</sup>)

#### Otros dispositivos similares son

- ▶ Sensor óptico puntual laser de difracción
- ▶ Eur Control Mex 2
- ▶ Partech Twin-Gap
- ▶ Metrawatt GTU 702
- ▶ Monitek 230/134

### 3.5.2 Sensor puntual acústico (ASTM, UHCM, ADV)

#### *Principio*

Es un instrumento desarrollado para medir la velocidad y la concentración de arena en un punto de interés. Está basado en la transmisión y dispersión de ondas de ultrasonido a través de las partículas en suspensión. Utilizando la amplitud y frecuencia de la señal dispersa. Consiste en un sensor con una unidad pre-amplificadora montada en una estructura sumergible y un panel convertidor separado.

#### *Operación práctica*

1. Elevar o bajar el dispositivo a la posición de muestreo
2. Seleccionar el periodo de muestreo (5min)
3. Leer la señal de salida
4. Colectar muestras de agua simultáneamente para una apropiada calibración
5. Anotar en una hoja apropiada

#### Ventajas

- ▶ Medición rápida y simultánea de velocidad, concentración y transporte
- ▶ Respuesta lineal entre 10 y 10000 mg/l
- ▶ Periodo de respuesta corto
- ▶ Poco sensible al tamaño de partícula de la arena
- ▶ Poco sensible a la temperatura, variación de salinidad y condiciones de limpieza del sensor
- ▶ Instalaciones de largo plazo y semipermanentes

#### Desventajas

- ▶ Calibración necesaria para medición de concentración
- ▶ Equipo electrónico frágil
- ▶ Estructura de grandes dimensiones y peso
- ▶ No recomendable para limos

Otros dispositivos similares son

- ▶ Sensores acústicos backscatter (ABS y ADCP)

### 3.6 Sensores de impacto

Las pruebas de impacto están basadas en el principio de transferencia de momento. La alta densidad de las partículas del sedimento les provee un exceso de momento en comparación con el agua alrededor. Lo que hace que tiendan a golpear un transductor colocado en camino de las partículas. Este efecto puede discriminar entre partículas de limo y arena. La altura del pulso de voltaje es proporcional al momento de la distribución de granos de arena. En general traducen una señal de impacto en una señal eléctrica.

Dispositivos con estas características son

- ▶ Sensores de impacto IOS

### 3.7 Sensores nucleares

Han sido usados en Rusia, Hungría, Polonia y China. El principio está basado en la absorción de energía radioactiva de las partículas de sedimento. La radioactividad es medida por medidores de radiación. Requieren calibración. El rango de medición de concentración es de 0.3 a 1000 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.8 Sensor de conductividad

Se ha desarrollado un sensor de conductividad a pequeña escala (CCM) para la medición concentraciones de arena en un rango de 100 a 2000kg/m<sup>3</sup>. El sensor mide a conductividad de un fluido en algunos puntos. Ha sido usado para medir las concentraciones de arena en una capa cercana al lecho.



## 4. ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS INDIRECTOS

### 4.1 Método para valuar el transporte de lavado

Si se desea conocer el transporte de lavado en un río se debe tomar, como mínimo, una muestra diariamente y obtener de ella la concentración de lavado. Cuando la muestra es pequeña y no es posible conocer su granulometría, se supone que la concentración del material de lavado es uniforme en toda la sección del río, por lo que el transporte de lavado se obtiene de

$$g_L = C_L q \quad (4. 1)$$

o

$$G_L = C_L Q \quad (4. 2)$$

donde

$C_L$  concentración del material de lavado expresado en peso, en  $\text{kg}/\text{m}^3$  o  $\text{N}/\text{m}^3$ . Si se expresa en volumen,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , se obtiene

$$q_L = C_L q \quad (4. 3)$$

o

$$Q_L = C_L Q \quad (4. 4)$$

donde

$Q$  gasto líquido que pasa por el cauce, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$q$  gasto líquido unitario.  $q = Q/B$ , donde  $B$  es el ancho de la superficie libre. Se expresa en  $\text{m}^3/(\text{s m})$  o  $\text{m}^2/\text{s}$ . Cuando el río o canal no es muy ancho se recomienda utilizar el ancho medio  $B_m$ .

Cuando la muestra de material en suspensión es grande y se logra obtener su curva granulométrica, se puede efectuar un cálculo más preciso utilizando algún método apropiado. La concentración  $C_L$  es tanto más uniforme en toda la sección cuanto más fino sea el material y mayor sea la velocidad de la corriente.

Los métodos desarrollados para medir el transporte de lavado requieren de la medición de la concentración del material en suspensión en un punto, dicho dato se puede obtener con bastante precisión. La debilidad de estos métodos consiste en que al hacerlo a partir de dicha concentración que obtenida a una distancia sobre el fondo, que también debe ser conocida, genera un costo elevado para la obtención de los datos. Otro problema es la disponibilidad de la información ya que en la mayoría de las estaciones hidrométricas que existen en México, no se obtienen muestras del

material en suspensión. En algunas en las que se toman muestras agua-sedimento, no se separa la fracción de material de fondo y la correspondiente a material de lavado, ya que la concentración obtenida en el laboratorio, usualmente se considera como de material de lavado y por tanto, uniformemente distribuida en la sección. Métodos que sirven para calcular el material de lavado, aunque requieren del conocimiento de la concentración  $C_a$  en un punto, son los siguientes:

- ▶ Método de Lane y Kalinske
- ▶ Método de Einstein
- ▶ Método de Brooks
- ▶ Método de Chang, Simons y Richardson
- ▶ Método de Einstein y Abdell - All
- ▶ Método de Itakura y Kishi

El transporte de sedimentos en suspensión por unidad de ancho en un flujo bidimensional a superficie libre, está dado por la relación

$$g_s \Big|_y^d = \int_y^d u C_s dy \quad (4.5)$$

donde

- $g_s$  transporte de sedimentos en suspensión en peso por unidad de tiempo y ancho, kgf/ s m, entre los niveles  $y$  y  $d$
- $d$  tirante de la corriente
- $C_s$  concentración de sedimentos en suspensión a un nivel  $y$  sobre el fondo dado en peso por unidad de volumen, kgf /m<sup>3</sup>
- $u$  velocidad del flujo nivel  $y$

Como indican los límites de la integral, el transporte de sedimentos en suspensión se obtiene siempre entre una cierta distancia  $y$  sobre el fondo y la superficie libre del agua. Cuando se desea calcular el transporte en suspensión en todo el ancho unitario o en toda la sección, la distancia  $y$  deberá ser igual al espesor de la capa de fondo. Ese espesor, como se ha mencionado es igual a  $2D$  según Einstein pero varía para algunos otros autores.

Si la concentración de sedimentos está dada en volumen por unidad de volumen, el transporte unitario de sedimentos evaluado mediante la ec. 4.5. se designa como  $q_s$  y se expresa en m<sup>3</sup> / s m o m<sup>2</sup> / s.

Conviene recordar que el transporte unitario de sedimentos en suspensión  $g_s$  se puede dividir en dos partes: la que corresponde al material del fondo  $g_{BS}$  y la debida al material de lavado  $g_L$ .

Si se conoce el diámetro medio del material de lavado, y la concentración del mismo en un punto de la vertical, las ecuaciones mostradas para conocer  $g_{BS}$  se aplican indistintamente para conocer  $g_L$ . Por tanto, 1a ec. 4.5 se puede escribir también como

$$g_L|_y^d = \int_y^d u C_L dy \quad (4. 6)$$

donde

$C$  concentración del material del fondo en suspensión, dado en peso por unidad de volumen

$C_L$  concentración del material de lavado en suspensión, dado en peso por unidad de volumen

Cuando el material de lavado es muy fino y la velocidad del flujo es alta, la concentración del material de lavado es prácticamente constante en toda la vertical. Al ocurrir lo anterior,  $g_L$  vale

$$g_L|_y^d = C_L \int_y^d u dy \quad (4. 7)$$

En que  $q$  es el gasto líquido unitario y  $U$  la velocidad media del flujo.

La ec. 4.5 ha sido integrada por diferentes autores, utilizando una distribución de velocidades casi siempre conocida y una distribución de concentraciones que en la mayoría de los casos fue desarrollada por el autor del método.

El transporte de sedimentos en suspensión se obtiene a partir del transporte unitario al multiplicarlo por el ancho medio de la sección  $B_m$ , es decir

$$Q_s = B_m q_s \quad (4. 8)$$

$Q_s$  en  $m^3/s$

O bien

$$G_s = B_m g_s \quad (4. 9)$$

$G_s$  en  $kgf/s$

Quien primero presentó una expresión para calcular el transporte de sedimentos en suspensión fue Forchheimer en 1930, el cual se basó en la ecuación desarrollada por Shoklitsch para evaluar el transporte en la capa de fondo. La relación presentada por Forchheimer es la siguiente

$$g_L = K_F \frac{\gamma^2}{\gamma_s - \gamma} \frac{US}{q} = K_F \frac{\gamma}{\Delta} \frac{S}{d} \quad (4. 10)$$

donde

$K_F$  constante ser evaluada

$\gamma, \gamma_s$  peso específico del agua y de las partículas, respectivamente

$\Delta$  densidad relativa de las partículas sumergidas

$U$  velocidad media del flujo

$S$  pendiente hidráulica

$q$  gasto líquido unitario,  $q = Ud$

Esta expresión no tuvo aceptación por la falta de fundamentos teóricos en su deducción y por su discrepancia con los resultados experimentales

Entre los autores más importantes que han propuesto un método para valuar el transporte de sedimentos en suspensión, en función de una concentración conocida, están los siguientes:

Lane y Kalinske (1941); Einstein (1950); Brooks (1963); Chang, Simons y Richardson (1967); Einstein y Abel-Aal (1972); e Itakura y Kishi (1980).

Para aplicar los métodos descritos a continuación se requiere conocer la concentración del sedimento transportado en suspensión, cuando menos en un punto, cuya localización también debe conocerse.

La obtención de esos datos no se efectúa en forma rutinaria en nuestro país. Por ello, la aplicación de dichos métodos está limitada a situaciones en que se realizan estudios fluviales que incluyen campañas de campo, en los que se toman muestras de concentraciones durante un cierto periodo.

Cabe señalar al lector que los métodos analíticos que a continuación se bosquejan, se pueden consultar con mayor detalle en la publicación de "*Transporte de sedimentos*" (Maza Álvarez et. Al.).

### 4.1.1 Método de Lane y Karlinske

Fue desarrollado en 1941, utilizando la distribución de velocidades propuesta por Prandtl-von-Karman y la distribución de la concentración de sedimentos en suspensión obtenida por los autores del método.

Así, la distribución de concentraciones de sedimentos, según Lane y Kalinske está dada por

$$C = C_a \exp\left[-\frac{15w}{U_*} \frac{y-a}{d}\right] \quad (4.11)$$

Mientras que la distribución de velocidades del flujo, obtenida de la de Prandtl-von-Karman tiene la siguiente expresión

$$\frac{u}{U} = 1 + \frac{U_*}{kU} \left[1 + \log \frac{y}{d}\right] \quad (4.12)$$

Al sustituir las ecuaciones 4.11 y 4.12 en la ecuación 4.6 queda

$$g_L = \int_0^d C_a \exp\left[-\frac{15w}{U_*} \left(\frac{y-a}{d}\right)\right] U \left\{1 + \frac{U_*}{kU} \left[1 + \log \frac{y}{d}\right]\right\} dy \quad (4.13)$$

Si se efectúa un cambio de variables, tal que

$$E = \frac{y}{d}; A = \frac{a}{d}$$

La ecuación 4.13 queda

$$g_L = C_a U d \int_0^1 \exp\left[-\frac{15w}{U_*} (E - A)\right] \left\{1 + \frac{U_*}{kU} [1 + \log E]\right\} dE \quad (4.14)$$

El producto  $Ud$  es igual al gasto unitario  $q$  del flujo; si además se extrae de la integral el término constante  $e^{\frac{15wA}{U_*}}$ , la ecuación 4.14 queda

$$g_L = qC_a e^{\frac{15wA}{U_*}} P_1 = UdC_a e^{\frac{15wA}{U_*}} P_1 \quad (4.15)$$

donde  $P_1$  es el valor de la integral, el cual se ha encontrado que vale aproximadamente  $1.7\sqrt{g}n/d^{1/6}$ ; siendo  $n$  el factor de fricción de Manning. Lane y Kalinske construyeron una gráfica para encontrar  $P_1$  en función de los parámetros  $w/U_*$  y  $n/d^{1/6}$  y que se muestra a continuación

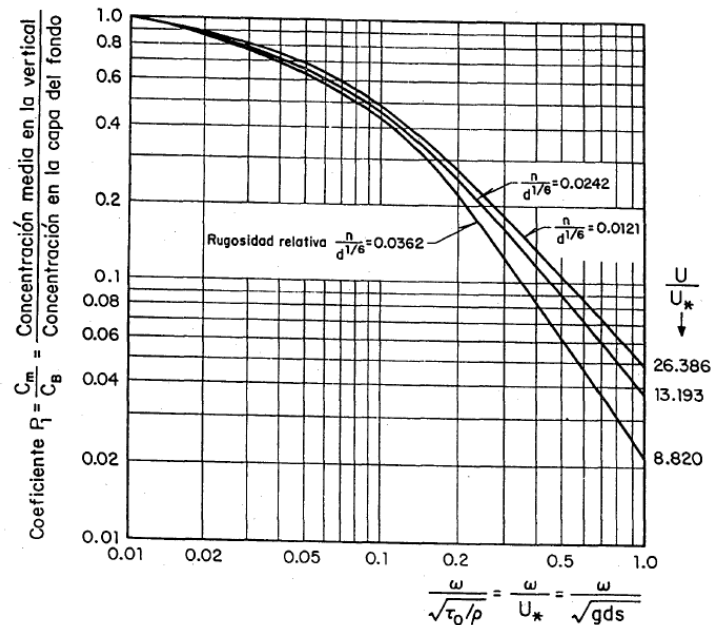


Figura 4. 1 Valores del coeficiente  $P_1$  en función de los parámetros mencionados

La integral de la ec. 4.14 también se puede valorar con ayuda de una computadora personal, utilizando algún programa de funciones matemáticas.

Al tener en cuenta a  $z$  dado por

$$z = \frac{2.5w}{U_*}$$

La ecuación 4.15 también se escribe como

$$g_L = qC_a e^{6zA} P_1 \quad (4.16)$$

Este método se comparó con mediciones en el río Mississippi, mostrando buena concordancia. Su uso se recomienda para ríos anchos con material arenoso.

#### 4.1.2 Método de Einstein

Este método fue presentado en 1950. Para integrar la ec. 4.6, Einstein utilizó la distribución de concentraciones de sedimentos de Rouse

$$C = C_a \left( \frac{d-y}{y} \frac{a}{d-a} \right)^z \quad (4.17)$$

En donde z está dado por

$$z = \frac{w}{kU_*} = \frac{2.5w}{U_*} \quad (4.18)$$

Las ecuaciones de distribución de velocidades del flujo, que él utilizó, fueron las propuestas por Keulegan, y que conjugó mediante el coeficiente  $x$ . Además introdujo otra modificación al considerar que la velocidad al cortante  $U_*$  debe cambiarse por la velocidad al cortante asociada a las partículas  $U'_*$ . Con ello, la expresión para valuar la distribución de velocidades quedó como

$$u = 5.75U'_* \log \left( 30.2 \frac{yx}{k_s} \right) \quad (4.19)$$

donde

$k_s$  altura de la rugosidad del fondo; Einstein supone que  $k_s = D_{65}$

$x$  factor que toma en cuenta la condición hidráulica del fondo: liso, rugoso o intermedio. Se obtiene de la figura 4.2, en función de  $k_s/d'_0$

donde  $d'_0$  el espesor de la subcapa viscosa pero asociada a  $U'_*$  y vale

$$\delta'_0 = \frac{11.64\nu}{U'_*} \quad (4.20)$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del flujo y  $U'_*$  está definida como  $\sqrt{gR'S}$

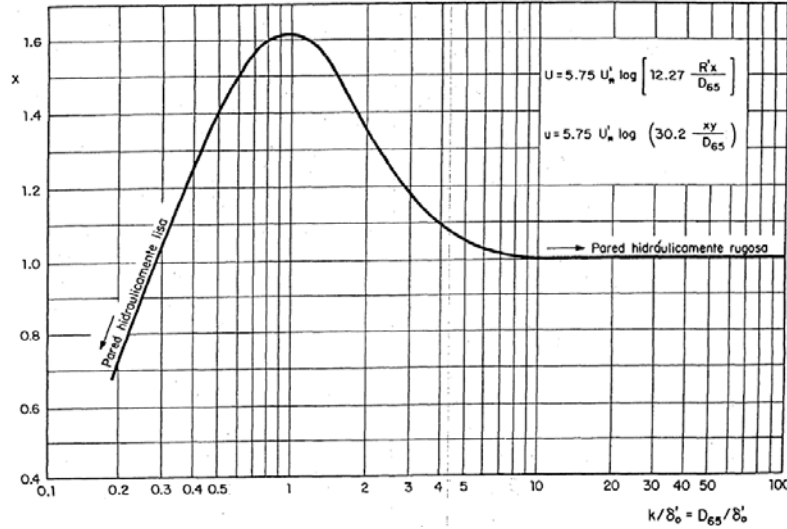


Figura 4. 2 Factor de corrección  $x$  en las fórmulas de velocidad media y distribución de velocidades, según Einstein (1950)

Sustituyendo las ecuaciones 4.17 y 4.19 en la ecuación 4.6 queda

$$g_L = \int_a^d C_a \left( \frac{d-y}{y} \frac{a}{d-a} \right)^z 5.75 U_*' \log \left( \frac{30.2 y x}{k_s} \right) dy \quad (4. 21)$$

Para efectuar su integración se efectúa el siguiente cambio de variables

$$A = \frac{a}{d}; E = \frac{y}{d}$$

Con ello la ecuación 4.21 se transforma en

$$g_L = \int_A^1 C_a \left( \frac{A}{1-A} \right)^z \left( \frac{1-E}{E} \right)^z 5.75 U_*' \log \left( \frac{30.2 x E d}{k_s / d} \right) dE \quad (4. 22)$$

Al desarrollar, Einstein escribió la ecuación 4.22 de la siguiente forma

$$g_L = 11.6 U_*' C_a a \left[ 2.303 \left( \log \frac{30.2 x d}{k_s} \right) I_1 + I_2 \right] \quad (4. 23)$$

O bien



$$g_L = 11.6U_*'C_a a [P_1 I_1 + I_2] \quad (4.24)$$

donde

$$I_1 = 0.216 \left( \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \right) \int_A^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z dE \quad (4.25)$$

$$I_2 = 0.216 \left( \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \right) \int_A^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z L_n E dE \quad (4.26)$$

y

$$P_1 = 2.303 \log \left( \frac{30.2}{k_s} \right) = L_n \frac{30.2 x d}{k_s} \quad (4.27)$$

Para aplicar la ec. 4.23, Einstein presentó figuras mediante las que es posible obtener  $I_1$  e  $I_2$  en función de  $A = a/d$  y  $z$ . Para elaborarlas, él previamente obtuvo el valor de las integrales mediante el método de Simpson. A las integrales las denominó  $J_1$  y  $J_2$ , es decir

$$J_1 = \int_A^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z dE \quad (4.28)$$

$$J_2 = \int_A^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z L_n E dE \quad (4.29)$$

Cuando se trabaja con una computadora y se dispone de un método o programa para calcular las integrales  $J_1$  y  $J_2$ , la ec. 4.24 se escribe como

$$g_L = 11.6U_*'C_a a \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \left[ 0.216 J_1 L_n 30.2 \frac{x d}{k_s} + 0.216 J_2 \right] \quad (4.30)$$

Las ecuaciones 4.23 y 4.30 permiten cuantificar el transporte de sedimentos en suspensión, desde una altura  $a$  sobre el fondo hasta la superficie del flujo.

### 4.1.3 Método de Brooks

En 1963, Brooks propuso su método para determinar el transporte de material en suspensión,  $g_L$ , el cual es similar al de Einstein, tanto en sus ecuaciones de partida como en sus resultados. Aunque resulta más sencillo de aplicar ya que requiere un solo diagrama.

Con objeto de valuar el transporte unitario en suspensión, Brooks partió de la expresión general 4.5

$$g_L = \int_{y_0}^d C_u dy \quad (4.31)$$

donde

$d$  límite superior de la integral, igual al tirante de la corriente

$y_0$  límite inferior de la integral, igual a la distancia sobre el fondo a la cual la velocidad del flujo es nula.

Para efectuar la integración se necesitan conocer las distribuciones de velocidades  $u$  y concentraciones  $C$  a lo largo de una vertical entre los límites señalados. Para valuar dichas distribuciones, Brooks utilizó las siguientes relaciones:

Distribución de velocidades

$$u = U + \frac{U_*'}{k} \left( 1 + \text{Ln} \frac{y}{d} \right) = U + \frac{U_*'}{k} \text{Ln} \frac{ey}{d} \quad (4.32)$$

donde

$y$  distancia medida sobre el fondo, a la cual se desea valuar  $u$

$k$  constante universal de von-Karman, igual a 0.4

$e$  base de los logaritmos Neperianos;  $e=2.718282$

Distribución de concentraciones

$$C = C_{d/2} \left( \frac{d-y}{d} \right)^z \quad (4.33)$$

donde

$C_{d/2}$  es la concentración a la mitad del tirante, expresada en peso,  $\text{kgf/m}^3$ . Para conocer esta concentración debe medirse en el punto  $y = d/2$ . Si se conoce en otro punto cualquiera se deberá valuar a la mitad del tirante, utilizando la expresión de Rouse.

Al sustituir las ecuaciones 4.32 y 4.33 en la ecuación 4.34 se obtiene

$$g_L = \sum_{i=1}^n g_{Li} \quad (4.34)$$

$$g_L = \int_{y_0}^d C_{d/2} \left( \frac{d-y}{y} \right)^z \left[ U + \frac{U_*}{k} \left( 1 + Ln \frac{y}{d} \right) \right] dy \quad (4.35)$$

Para efectuar la integración, Brooks propuso el siguiente cambio de variables

$$E = \frac{y}{d}; n_0 = \frac{y_0}{d}$$

Entonces la ecuación queda

$$g_L = UDC_{d/2} \left[ \left( 1 + \frac{U_*'}{kU} \right) \int_{n_0}^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z \left[ 1 + \frac{U_*'}{kU} (1 + LnE) \right] dE \right] \quad (4.36)$$

En esta última expresión, las integrales indicadas son las mismas que fueron obtenidas y presentadas por Einstein en su método para valuar el transporte en suspensión; es decir,  $J_1(z, n_0)$  y  $J_2(z, n_0)$  respectivamente. Esto es

$$J_1(z, n_0) = \int_{n_0}^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z dE \quad (4.37)$$

$$J_2(z, n_0) = \int_{n_0}^1 \left( \frac{1-E}{E} \right)^z LnEdE \quad (4.38)$$

Al sustituir las ecuaciones 4.37 y 4.38 en la 4.36 se llega a

$$g_L = qC_{d/2} \left[ J_1 + \frac{U_*}{kU} (J_1 + J_2) \right] \quad (4.39)$$

Donde q es el gasto unitario líquido y  $J_1$  y  $J_2$  son función de z y  $n_0$ .

La ec. 4.39 permite obtener, en toda la vertical, el transporte del fondo en suspensión dado en unidad de ancho y tiempo. En ella las integrales  $J_1$  y  $J_2$  se pueden valuar con ayuda de una computadora personal o con tablas; entre éstas últimas, las presentadas por Einstein (1950).

#### 4.1.4 Método de Chang, Simons y Richardson

Este método fue publicado en 1967, en el cual, además de los autores que aquí se mencionan, colaboró personal del U.S. Geological Survey y de la Facultad del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Colorado.

En el desarrollo del método utilizaron un canal de 2.44 m de ancho, 45.72 m de largo y 0.61 m de profundidad, con pendiente variable entre 0 y 0.015, por el que podía fluir un gasto líquido entre 0 y 0.62 m<sup>3</sup> /s. En los experimentos se utilizaron partículas con diámetro medio entre 0.19 mm y 0.93 mm.

Con este método, a diferencia de los demás, no se requiere dividir en fracciones la curva granulométrica del material que viaja en suspensión, sino que se trabaja con el diámetro medio de toda la muestra, lo que simplifica el cálculo.

La distribución de la concentración de sedimentos en suspensión utilizada en este método, es la desarrollada por Chang et al y que se muestra en la siguiente ecuación

$$\frac{C}{Ca} = \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - A}}{\sqrt{A}} \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1 - E}} \right]^{z_2} \quad (4.40)$$

$$\frac{C}{Ca} = A_1 \left[ \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1 - E}} \right]^{z_2} \quad (4.41)$$

Siendo

$$A_1 = \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - A}}{\sqrt{A}} \right]^{z_2} \quad (4.42)$$

y

$$A = \frac{a}{d}; E = \frac{y}{d}$$

$$z_2 = \frac{2we}{\beta k U_*} = \frac{2we}{1.5k U_*} = \frac{we}{0.75k U_*} \quad (4.43)$$

De acuerdo a Chang, Simons y Richardson, el gradiente transversal de velocidades del flujo está dado por la ecuación

$$\frac{du}{dy} = \frac{U_*}{ky} \sqrt{\frac{d-y}{d}} \quad (4.44)$$

Para obtener la distribución de velocidades del flujo se integra la ecuación anterior, considerando como condición de frontera que si  $E = 1$ , entonces  $u$  es igual a  $u_{\max}$ , donde  $u_{\max}$  es la velocidad máxima del flujo. Y se obtiene la expresión

$$\frac{k}{2U_*} (u_{\max} - u) = \left( \text{Ln} \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right) - \sqrt{1-E} \quad (4.45)$$

Por otra parte, la velocidad media se expresa como

$$U = \int_0^1 u dE \quad (4.46)$$

Al sustituir  $u$  dado por la ecuación en la ecuación anterior y efectuar la integral se obtiene que

$$U = u_{\max} - \frac{2}{3} \frac{U_*}{k} \quad (4.47)$$

Al reemplazar  $u_{\max}$ , resulta

$$\frac{k}{2U_*} (U - u) = \text{Ln} \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} - \sqrt{1-E} - \frac{1}{3} \quad (4.48)$$

El transporte unitario en suspensión en peso por unidad de ancho y tiempo entre un punto situado a una distancia  $a$  sobre el fondo del cauce y la superficie del mismo, está dado por la relación

$$g_L = \int_a^d u C dy = d \int_A^1 C u dE \quad (4.49)$$

Si se sustituye  $C$  dado por la ec. 4.40 y  $u$  dada por la ec. 4.48 en la anterior, y se extraen los términos constantes de la integral se tiene

$$g_L = dA_1 C_a \int_A^1 \left( \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right)^{z_2} \left\{ U - \frac{2U_*}{k} \left[ \text{Ln} \left( \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right) - \sqrt{1-E} - \frac{1}{3} \right] \right\} dE \quad (4.50)$$

Al integrar la ecuación anterior, los autores la presentaron de la siguiente forma

$$g_L = dC_a \left( UI_3 - \frac{2U_*}{k} I_4 \right) \quad (4.51)$$

donde

$$I_3 = A_1 \int_A^1 \left( \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right)^{z_2} dE \quad (4.52)$$

y

$$I_4 = A_1 \int_A^1 \left( \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right)^{z_2} \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{E}}{1 - \sqrt{1-E}} \right) - \sqrt{1-E} - \frac{1}{3} \right] dE \quad (4.53)$$

$I_3$  e  $I_4$  fueron calculadas numéricamente para diferentes valores de  $A$  y de  $z_2$ , y sus resultados graficados, para mayor información se recomienda consultar la referencia.

## 4.2 Metodologías consultadas en la literatura

Se han consultado diferentes artículos en los que si bien, la obtención del sedimentograma no es el objetivo final a alcanzar. Es una herramienta que sirve para mostrar los resultados obtenidos durante la investigación. En los trabajos consultados, destaca el uso del método de la curva tasa de sedimento "*Sediment Rating Curve*". En la que se utilizan gran cantidad de datos medidos, para calibrar el modelo utilizado. Lo que como ya se ha comentado, en algunos lugares es realmente imposible. Esto debido a la falta de información. Por supuesto tampoco es posible aplicar modelos calibrados en cierto lugar, a otra región. Ya que como también se ha indicado, el comportamiento del transporte de lavado es diferente para cada río. No obedece a características físicas definidas de la corriente y como se ha experimentado en este trabajo, quizás obedezca a una combinación entre casos específicos de infiltración y a una determinada tormenta.

También se ha encontrado una metodología con características similares a la desarrollada por este trabajo, pero también apoyada en una curva tasa de sedimento. Por otro lado, se ha observado la utilización de gráficos similares a los sedimentogramas en el área de estudio ambiental. Sólo que bajo el nombre de polutogramas. El estudio de dichos gráficos no es tratado a fondo en este trabajo, sin embargo, se hará mención de ellos y de las similitudes que guardan con los

sedimentogramas. A continuación se hará un bosquejo de las metodologías consultadas.

### 4.3 Curva tasa de sedimento

La curva de tasa de sedimento describe la relación promedio entre el gasto  $Q$  y la concentración de sedimento en suspensión, para una determinada región. Está basado en una relación empírica, usualmente exponencial (ec. 4.54).

$$L = aS^b \quad (4.54)$$

donde

L carga de sedimento en suspensión

S descarga del río

a, b parámetros calculados y ajustados por distintos métodos

Principalmente, la ec. 4.54 es usada para calcular la descarga de sedimentos en un corriente. Resulta particularmente útil en lugares en donde se tienen mediciones dispersas de gasto y concentraciones de sedimento. Lo cual implica que no son fácilmente relacionados con una recta u otro ajuste. Esta técnica no está limitada sólo al cálculo de sedimento en suspensión, también sirve para estimar transporte de fondo o descargas de sólidos disueltos. Usualmente es graficada en papel log-log.

#### 4.3.1 Caso desarrollado en Japón

Se realizó una reforestación extensiva en Japón, desde inicios de 1960. Esto con el objeto de cumplir las demandas nacionales y el control de erosión del suelo. En el 2004, se monitoreo una pequeña cuenca de aproximadamente  $0.048 \text{ km}^2$ . En dicha cuenca se recolectaron datos de las descargas de sedimento en forma automática; en la salida de la cuenca y en otras cinco estaciones ocupadas en el estudio. De acuerdo con los resultados estadísticos del estudio y después de la utilización de varios criterios de regresión y transformación de datos. Se encontró que una regresión por mínimos cuadrados con transformación cuadrática (Sadegui S.H.R. 2007) fue la de mejor ajuste para la relación entre el gasto del río y las descargas de sedimento. Entre varios resultados obtenidos por el estudio, uno de los más importantes fue la obtención de diferentes relaciones para las subcuencas. Lo que implica que dentro de la misma cuenca existen diferencias notables en cuanto a características locales, disponibilidad de sedimento, contribución de varios componentes del ciclo hidrológico, etc. Todo el estudio se encuentra reportado en *“Development, evaluation*

*and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed*” (Sadegui S.H.R. 2007).

La medición de la erosión, transporte y depósito, puede reflejar las características de la cuenca, su historia, desarrollo, uso y manejo (Lane et al, 1997). El estudio tuvo lugar en la cuenca de Hinotaku - ike (lat. 34°21'N, long. 136°25') que se encuentra localizada en la prefectura de Mie, Japón.

Como se había mencionado, las mediciones se realizaron en la salida de siete subcuencas, además de la salida principal Fig. 4.3. En estos lugares se tomaron datos de precipitación, gasto y concentración por medio de dispositivos electrónicos. De manera complementaria, también se tomaron muestras de sedimento por medio de botellas de leche.

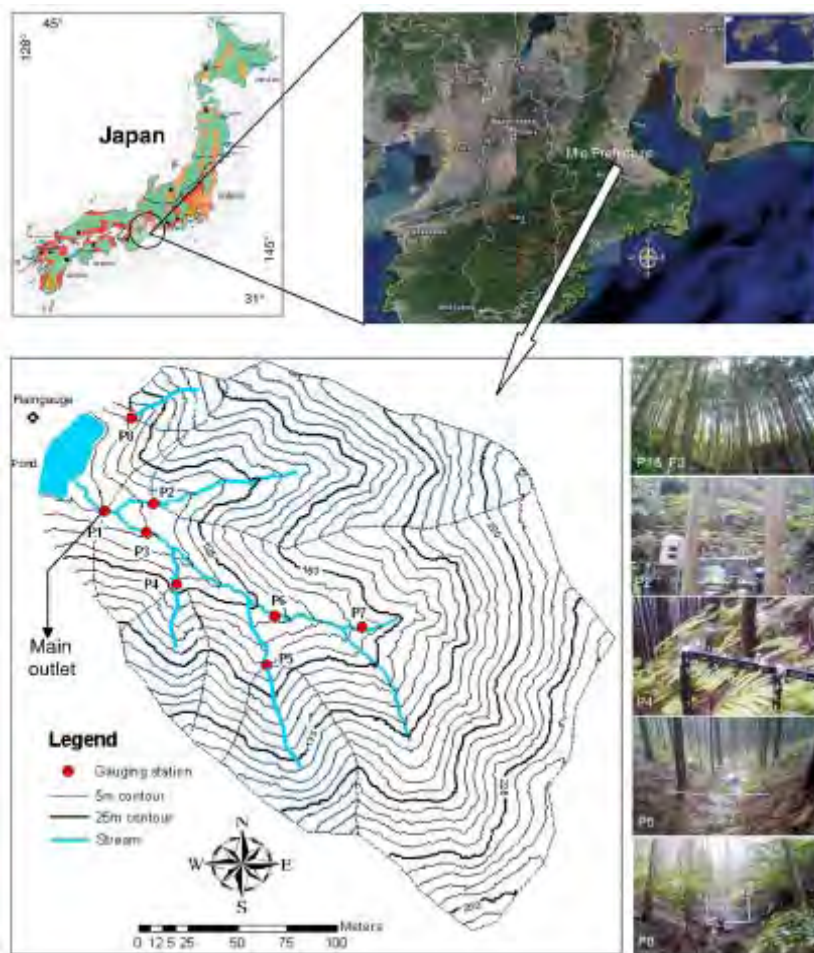


Figura 4. 3 Ubicación de las estaciones de monitoreo y localización de la cuenca



El análisis del sedimento suspendido fue estructurado en el sentido de:

- ▶ Obtener la mejor relación estadística (curva tasa) entre la concentración de sedimento en suspensión SSC y el gasto  $Q$ , para la cuenca entera y para las subcuencas medidas.
- ▶ Comparar el desarrollo de curvas e interpretarlas. Para encontrar la mejor curva tasa.

Se aplicaron diferentes tipos de regresión para justar los datos, como: Lineal, cuadrática, inversa, cúbica, logarítmica, sigmoide, etc. También se utilizaron diecisiete modelos con la forma general de la ecuación 4.55.

$$SSC = f(Q) + \varepsilon \quad (4.55)$$

donde

SSC la concentración de sedimento en suspensión, mg/l

$Q$  gasto de la corriente, m<sup>3</sup>/l

$\varepsilon$  es el error residual entre el dato observado y el medido

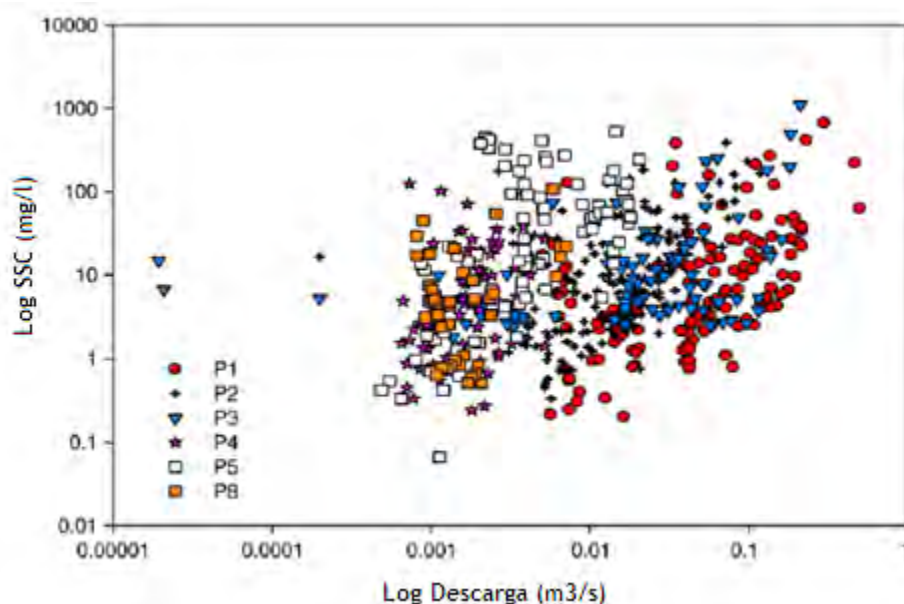


Figura 4. 4 Gráfico de la relación  $Q$ -SSC, que muestra la dispersión de los datos en todas las estaciones

Otro dato importante que se reporta en el estudio. Es que la subclasificación de la relación  $Q$  - SSC en temporadas mensuales o bases periódicas, de acuerdo a los componentes del flujo como son la media y el promedio de  $Q$  y SSC. Siguiendo el mismo procedimiento que el elaborado para el universo de datos, no genera mejores ajustes de las funciones generadas. Mientras que la división de los grupos de datos en

sus características hidrológicas de flujo, como son el flujo base (en caso de la estación 1), las ramas ascendente y descendente. Puede explicar la relación Q - SSC de mejor forma.

El modelo final obtenido, y que fue aplicado a la totalidad de los datos es el representado por la ecuación

$$SSC = (1 + \beta)aQ^b \quad (4. 56)$$

Los resultados obtenidos por el modelo se muestran a continuación, en la figura 4.5

Se ha visto en la figura 4.5 que la separación del grupo entero de datos de los hidrogramas en dos subgrupos, ascenso y descenso, mejoran la relación Q-SSC. Y también generan que el error en la estimación de datos, sea menor.

El comportamiento de la dispersión de datos en la relación Q - SSC, se ha interpretado en el estudio como un medio por el que se enfatiza el hecho de que la carga de sedimento en suspensión está controlada más por el suministro del mismo que por la capacidad de transporte de la corriente. Se observó que la producción de wash load está controlada por la concentración de sólidos suspendidos y la interacción con el escurrimiento. Se identificó la contribución de tres procesos del ciclo hidrológico que pueden controlar la relación Q - SSC. El proceso de interceptación de lluvia por las plantas, la fracción de lluvia que pasa a través de las plantas y el flujo subsuperficial. Por otra parte se menciona que los picos de los sedimentogramas obtenidos, son adelantados. Esta última característica se explicará con mayor detalle en este trabajo. Por último se encontró que el tamaño de la cuenca influye, en otras palabras, la relación Q - SSC es más estable para la cuenca entera y para cuencas con áreas grandes.

En otro trabajo similar al de Japón con el título "Estimation of suspended - sediment rating curves and mean suspended - sediment loads" (Crawford G. Charles, 1991). Se habla del desarrollo de curvas tasa por medio de dos tipos de modelo, lineal y no lineal. Un modelo lineal es en el que los parámetros que serán estimados aparecen de manera lineal (la derivada respecto a alguno de los parámetros es independiente a cualquiera de los parámetros). Mientras que un modelo no lineal es en el que por lo menos uno de los parámetros aparece de manera no lineal (al menos una de las derivadas con respecto de alguno de los parámetros, depende de algún otro).

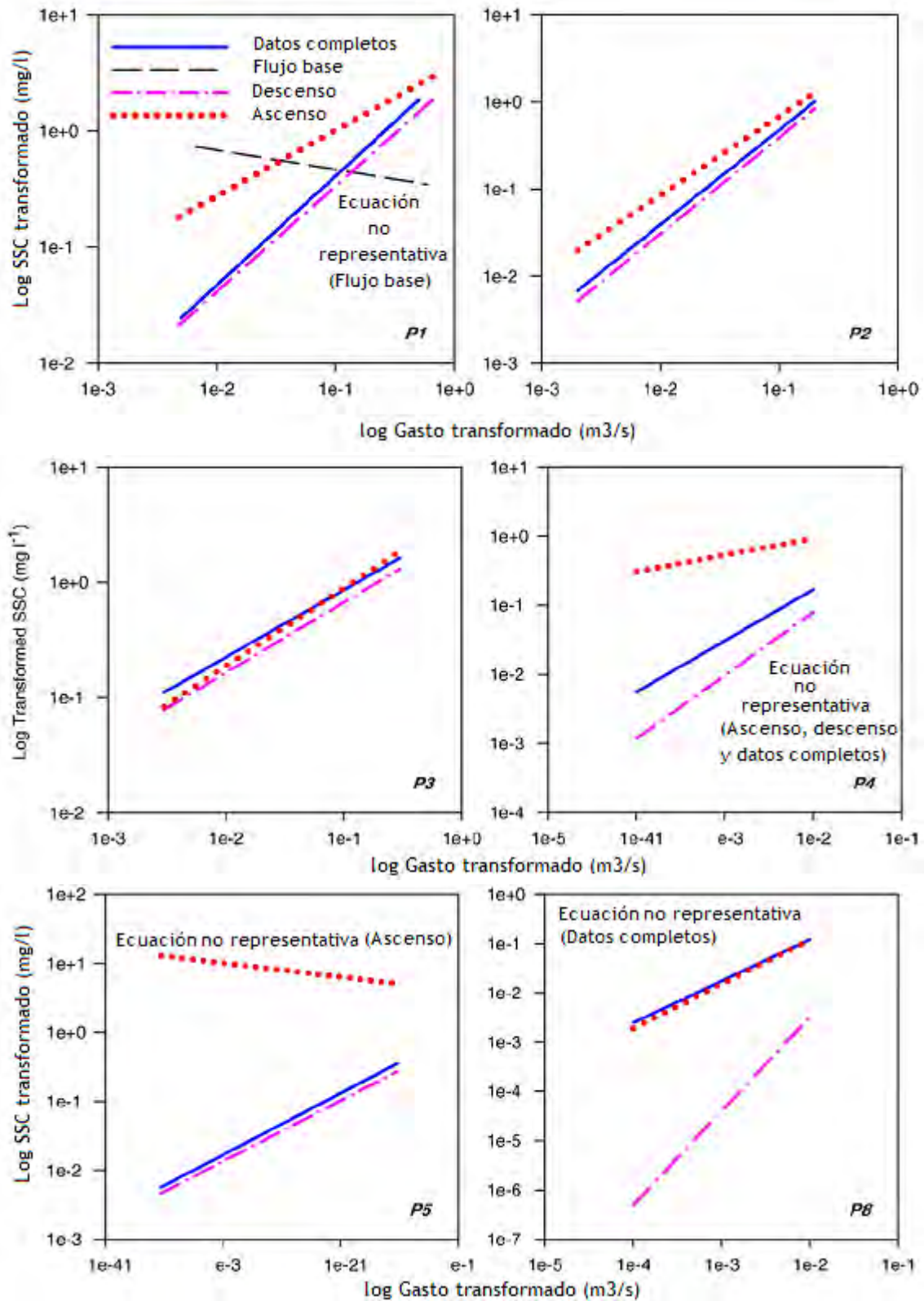


Figura 4. 5 Curvas tasa de sedimentos para la cuenca entera de la prefectura de Mie y sus subcuencas

En la literatura, abundan los casos de estudio en donde se ha tratado de mejorar el ajuste de las curvas tasa. Y no solo la estimación de los parámetros  $a$  y  $b$ , también los resultados de la relación  $S - L$ . Un trabajo que propone mejorar la relación obtenida a partir de un modelo de curva tasa es el titulado *“Development of streamflow-suspended sediment rating curves using a range dependent neural network”* (Kisi özgür, 2007). En dicho trabajo se utilizan las redes neuronales para mejorar la relación generada por el modelo y poder estimar concentraciones diarias de sedimento.

#### 4.3.2 Modelo de producción de sedimento

El método del número de curva (SCS-CN), desarrollado por el servicio de conservación de suelos ha sido usado para estimar el volumen de escurrimiento directo para una lluvia dada. Sobre todo para cuencas urbanas o de uso agrícola. De esta forma en el trabajo realizado por Tyaghi J. V. et al, se habla de un modelo basado en el método mencionado, con el propósito de calcular el gasto sólido de sedimentos a partir de un evento de lluvia.

El desarrollo del modelo está basado en:

1. La relación de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo con el parámetro de máxima retención del SCS-CN
2. Modelo de infiltración del SCS-CN
3. Asociación de la lluvia en exceso con la erosión producida en las partes altas de la cuenca
4. transitar el sedimento en exceso, para el cálculo de la producción de sedimento o el sedimentograma del evento

En el estudio se propone la ecuación 4.59, que permite calcular el sedimento en exceso, partiendo de las características de la cuenca.

$$y_t = \frac{Aq_t}{P_{\Delta t}} + \frac{A}{P_{\Delta t}} \left[ 1 - \frac{S^2}{(P + S - \lambda S)^2} \right] (f - fc) \quad (4.57)$$

donde

- $y_t$  es el sedimento en exceso (MT-1)
- $A$  es la máxima erosión potencial actual (M)
- $q_t$  Tasa de lluvia en exceso (LT-1)
- $P_{\Delta t}$  Dato de lluvia, en el intervalo  $dt$  (L)
- $S$  Potencial máximo de retención

P	lluvia total (L)
$\lambda$	valor estandar (0.2)
f	Infiltración (LT-1)
$f_c$	Infiltración para tiempos grandes(LT-1)

Finalmente para estimar el sedimentograma en la salida de la cuenca, el hidrograma es transitado por medio de alguna técnica simple de transito

$$I = O + \Delta V / \Delta t$$

$$V = KO$$

En estas ecuaciones O se calcula por medio de un proceso de diferencias finitas. En donde intervienen coeficientes de tránsito o coeficientes de peso. V es el almacenamiento de sedimento. K es el coeficiente de almacenamiento de sedimento. El modelo fue desarrollado y calibrado en cuencas completamente monitoreadas de la India y Estados Unidos.

#### 4.4 Polutogramas

En el área ambiental, se encontraron gráficos similares a los sedimentogramas. Dichos gráficos son utilizados para presentar información de contaminantes y elementos importantes para la calidad de agua. Desafortunadamente, el polutograma no es un gráfico al que se le dé una importancia como la que se le otorga en hidrología. Es por ello que no se han encontrado trabajos que hablen sobre alguna metodología matemática o explicación detallada de ellos. En un trabajo realizado en Santiago de Chile, se presentan los polutogramas medidos en el estudio y dan un ejemplo de su uso. Dicho estudio presenta la primera investigación realizada acerca de la calidad de las aguas de lluvias urbanas en Santiago de Chile. Se monitorearon 12 lugares durante 7 tormentas del invierno del 2001. En cada uno de los eventos registrados se obtuvo la concentración media por evento de 37 contaminantes. Estos contaminantes fueron 15 metales, 8 compuestos inorgánicos, 8 compuestos orgánicos y otros 6 parámetros típicos. También se midieron concentraciones instantáneas durante las tormentas. Se obtuvieron polutogramas (fig. 4.6) de sólidos suspendidos, sólidos disueltos, DQO, fierro, cobre, nitratos, sulfatos y cloruros.

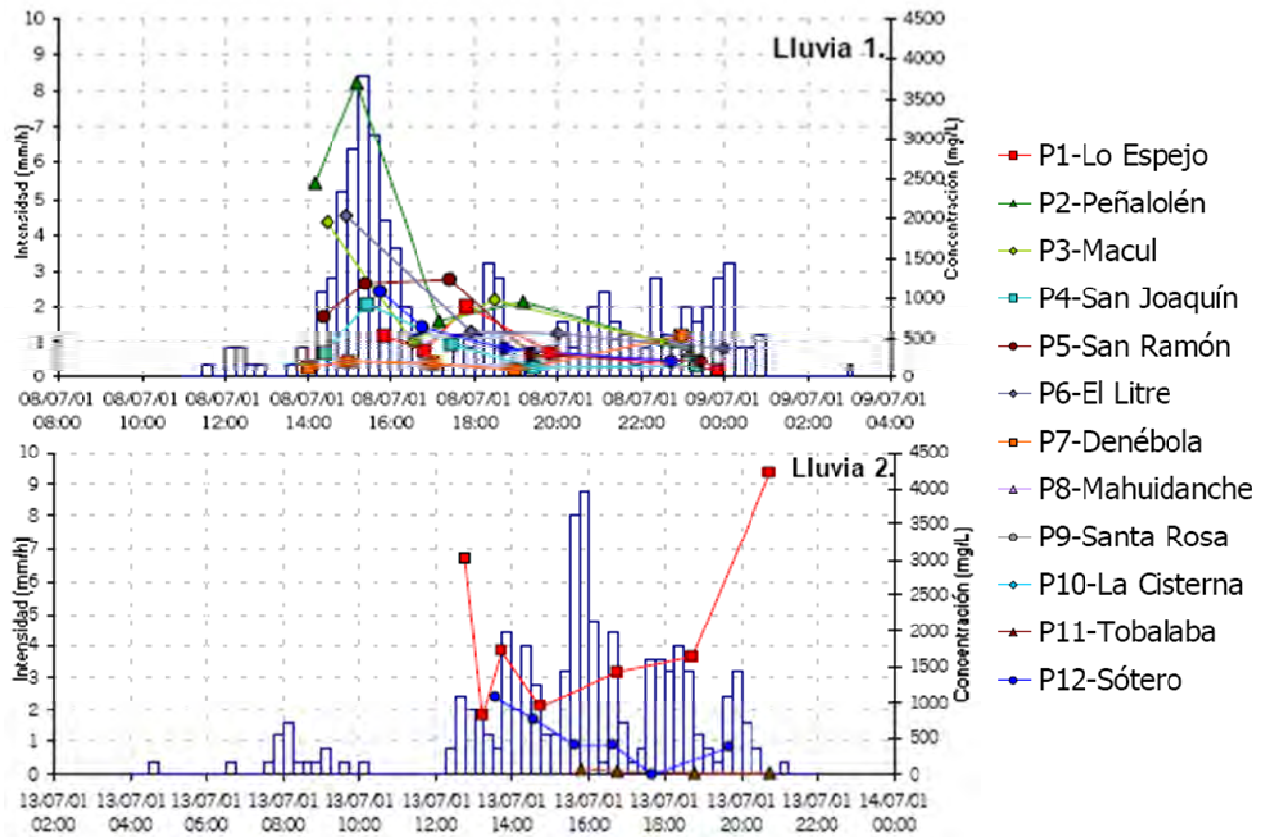


Figura 4. 6 Polutogramas observados en dos de las tormentas estudiadas

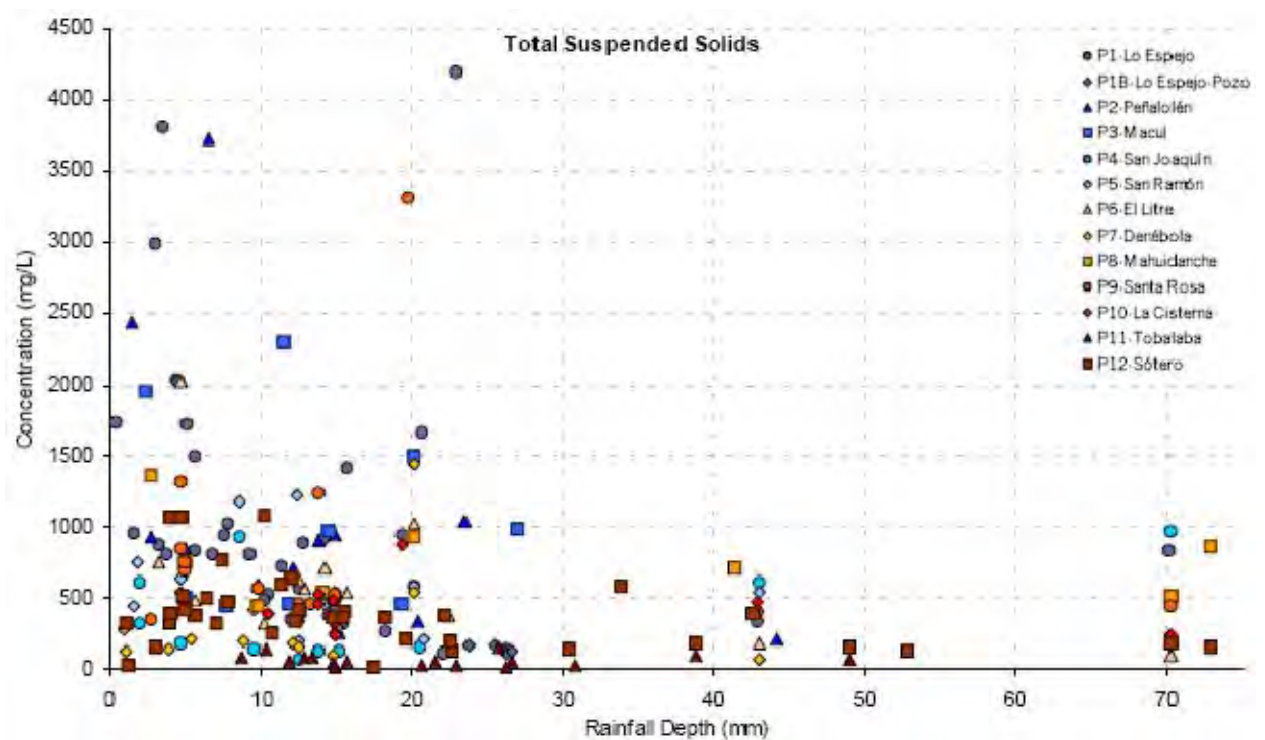


Figura 4. 7 Dispersión de datos de las concentraciones de sólidos suspendidos totales

#### 4.5 Generación sintética de sedimentogramas

En la literatura, no se han encontrado metodologías para la generación sintética de sedimentogramas. Las referencias más claras del tema son Chen V.J. (1986) y Gracia (1996). Particularmente, este trabajo se ha desarrollado a partir del segundo artículo.

El primer estudio, es un procedimiento para generar sedimentogramas sintéticos. Está basado en el sedimentograma unitario de una hora. El cual es definido como el sedimentograma directo resultado de una unidad de sedimento efectivo producido por una tormenta de una hora de duración, generada uniformemente e igualmente distribuida. El sedimentograma asociado a un hidrograma durante una tormenta provee información útil para estimar el aporte de sedimento, para diseñar estructuras de control de sedimento eficientes y para estudiar el transporte de partículas de polución que vienen con el sedimento.

Los factores de lluvia y escurrimiento que producen sedimento pueden ser tratados como entradas del sistema y la producción de sedimento se convierte en la salida del sistema. Las características geomorfológicas y los factores hidrológicos de la cuenca son considerados como un conjunto de parámetros que transformas las entradas en salidas a través del sistema.

Si se acepta a ER como el volumen de escurrimiento efectivo con dimensiones de longitud, ES como la tasa de sedimento efectivo o directo con dimensiones de fuerza, ERR como el escurrimiento efectivo ( $LT^{-1}$ ) y ESR el sedimento efectivo ( $LT^{-1}$ ). Entonces para una cuenca específica la relación ER - ES revela una gráfica en forma de línea recta en un papel log - log. En otras palabras, existe un transformador lineal logarítmico que relaciona ER y ES. Esto fue encontrado por Rendon-Herrero (1974) y probado por Kolar and Jicinsky (1975), Rendon-Herrero et al. (1980) y Singh and Chen (1981). La relación toma la forma  $ES = a (ER)^b$ , a y b son coeficientes calculados por medio de una regresión. Chen (1984) encontró que existe la misma relación de regresión entre ERR y ESR.

Se debe hacer notar que ERR responde de acuerdo a la variación de la intensidad de lluvia efectiva (ERI), mientras ESR responde de acuerdo a la variación de la intensidad de erosión efectiva (ESEI). En otras palabras, la lluvia efectiva produce el escurrimiento directo y el escurrimiento directo produce el sedimento directo. Por lo tanto, es conceptualmente establecido que la intensidad de lluvia efectiva genera a su homólogo, la intensidad efectiva de erosión. Que a través del sedimentograma unitario, resulta un sedimentograma. Esto se puede ver esquemáticamente en la siguiente figura 4.8, en donde se aprecia que ERI y ESEI son causas que producen ERR y

ESR. Los valores de ESEI no son registrados en campo, por lo que los coeficientes de correlación entre ESEI y ERI no pueden ser valuados a través de un análisis de regresión. Por lo tanto, se permite usar  $ESEI = \alpha(ERI)^\beta$  para evaluar ESEI para una aproximación. En donde  $\alpha$  y  $\beta$  son tomados como los mismos coeficientes utilizados para la relación ESR - ERR.

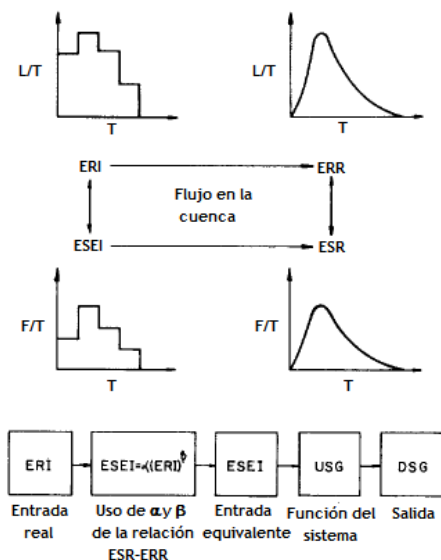


Figura 4. 8 Diagrama esquemático del desarrollo del modelo

Entonces para calcular el sedimentograma directo se debe utilizar la siguiente expresión

$$Q_s(t) = \sum_{i=1}^n USG[D, t - (i-1)D](ESEI)(D) \quad (4. 58)$$

donde

- Qs ordenadas del sedimentograma directo,  $F T^{-1}$
- USG ordenadas del sedimentograma unitario,  $T^{-1}$
- ESEI Intensidad de erosión efectiva,  $FT^{-1}$
- I enteros de 1 a n
- D intervalo de tiempo para cada pulso de ESEI, T

El sistema que se considera en el estudio mencionado, es el sedimentograma unitario sintético. La salida de interés es el sedimentograma directo en una determinada locación de una cuenca. Las entradas al sistema son la intensidad de erosión efectiva (ESEI), el cual es el homólogo de la intensidad de lluvia efectiva (ERI). Para lograr un modelo válido, muchos pares de hidrogramas y sedimentogramas deben ser usados en el desarrollo del modelo y el proceso de calibración. Para cada par mencionado los correspondientes ER y ES pueden ser evaluados, partiendo del conocimiento de ERR y ESR. Esto último por medio de los modelos de regresión logarítmica, funciones como  $ESR = \alpha(ERR)^\beta$  y  $ES = a(ER)^\beta$  pueden ser establecidos.



Como se ha comentado, la literatura no habla de demasiadas metodologías. Se debe hacer énfasis en que en las tratadas en este capítulo, requieren de datos para su calibración o aplicación. Shen (1979) presenta algunos casos aislados de mediciones de sedimentogramas, con comentarios generales. Crawford (1991) y Rendon - Herrero (1974) describen procedimientos para extrapolar sedimentogramas a partir de registros de campo para casos particulares. Gracia (1989) presenta un criterio de interpolación de mediciones en campo basado en el método de los esplines. El reporte que ofrece información más detallada respecto a mediciones de sedimentogramas es el trabajo de Jeje et. Al. (1991), donde se presentan las mediciones realizadas en tres cuencas de Nigeria. Sin embargo dicha referencia sólo presenta información descriptiva del fenómeno, sin proponer ningún criterio de cálculo.

#### 4.5.1 Clasificación de sedimentogramas

En 1989 Williams propone una clasificación teórica de la relación entre la concentración del sedimento y la descarga de agua, concluyendo que existen clases comunes de dichas relaciones.

Desde el punto de vista cualitativo, los sedimentogramas de concentraciones pueden clasificarse tomando en cuenta su posición respecto al hidrograma, en cuatro casos principales fig. 4.9:

- A. **Adelantados**. Ocurre cuando el pico del sedimentograma se presenta antes del pico de la avenida.
- B. **En fase**. Cuando ambos picos, el del sedimentograma e hidrograma coinciden en el tiempo.
- C. **Retrasado**. Cuando el pico del sedimentograma ocurre después del pico del hidrograma.
- D. **De picos múltiples**. Ocurren cuando la lluvia produce escurrimientos con varios picos y esto causa también varios picos en el sedimentograma.

Los casos antes señalados se presentan claramente en la información de campo reportada por Jeje et. Al. (1991). Es importante señalar que en una misma cuenca pueden presentarse todos los casos anteriores, aunque el tercero 3 es poco frecuente.

<i>Clasificación de sedimentogramas según los dos autores</i>	
<i>TIPO DE SEDIMENTOGRAMA</i> J. Gracia (1995)	<i>RELACIONES C - Q</i> Williams (1979)
A. Adelantado	Clockwise loop
B. En fase	Single valued
C. Retrasado	Counterclockwise loop
D. Múltiples picos	-----

Tabla 4. 1 Clasificación de sedimentogramas

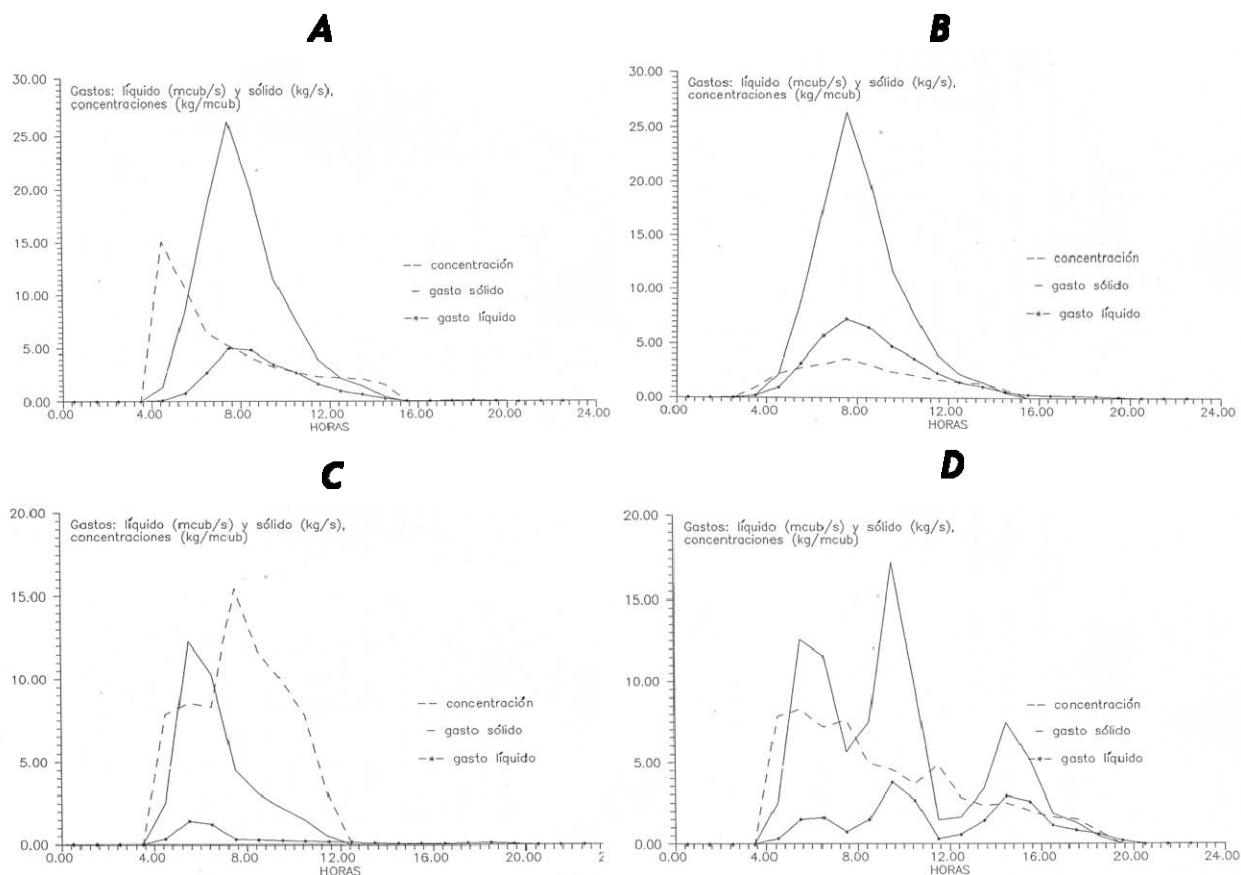


Figura 4. 9 Clasificación de sedimentogramas

## 5. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN SINTÉTICA DE SEDIMENTOGRAMAS

### 5.1 Base teórica

#### 5.1.1 Generación de hidrogramas

Un proceso convolutivo puede representarse en términos generales a través de la siguiente ecuación

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)U(t-\tau)d\tau \quad (5.1)$$

Donde  $x(\tau)$  es la distribución en el tiempo de la lluvia en exceso,  $U(t)$  es el hidrograma unitario y  $y(t)$  es la distribución en el tiempo del escurrimiento directo.

Anteriormente ya se había tratado este tema, ahora se retoma con la intención de presentar su forma discreta. Por medio de la cual se obtendrá el sedimentograma e hidrograma correspondiente.

En forma discreta, la ecuación 5.1 puede presentarse como

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^t x(\tau)U(t-\tau) \quad (5.2)$$

O bien para la computadora

$$y(t) = \sum_{j=1}^t x(j)U(t-j+1) \quad (5.2(a))$$

si  $k \leq np$

$$y(t) = \sum_{j=1}^{np} x(j)U(t-j+1) \quad (5.2(b))$$

si  $np < k \leq nu$

donde  $k = t-j+1$ ,  $np$  es el número de ordenadas de la representación discreta de la distribución de la lluvia en exceso  $x(j)$  (hietograma),  $nu$  es el número de ordenadas de la representación del hidrograma unitario  $U(t-j+1)$ , bajo la siguiente condición

$$U(k) = 0 \text{ cuando } k < 1 \text{ o } k > n_u$$

El problema principal para usar las ecuaciones 5.2(a) y 5.2(b), radica en definir las ordenadas del hidrograma unitario. Por tal motivo, se plantea un procedimiento que permite calcular tal hidrograma, en función únicamente de los parámetros físicos de la cuenca. Cabe señalar que las ecuaciones 5.2(a) y 5.2(b), consideran un desfase unitario entre hidrogramas para realizar la convolución. Por lo que se tendrá que hacer modificaciones a la fórmula para efectuar el proceso adecuadamente. Es decir, hacer el desfase para 30 min, que es la duración en exceso del hietograma.

Si se considera una cuenca como la mostrada en la figura 5.1 y se subdivide en diez subcuencas. Al seleccionar una de las subcuencas se pueden establecer los siguientes conceptos:

1. *Tiempo de concentración de la subcuenca (TCS)*. Es el tiempo que tarda en llegar el agua desde el punto más lejano de la subcuenca hasta su salida, ver figura 5.1.
2. *Tiempo de traslado de la subcuenca (TTS)*. Es el tiempo que tarda en llegar el agua desde la salida de la subcuenca, hasta la salida de la cuenca, ver figura 5.1.
3. *Tiempo total de concentración de la subcuenca (TTCS)*. Es el tiempo total que tarda un escurrimiento desde la parte más lejana de la subcuenca hasta la salida de la cuenca total, ver figura 5.1.

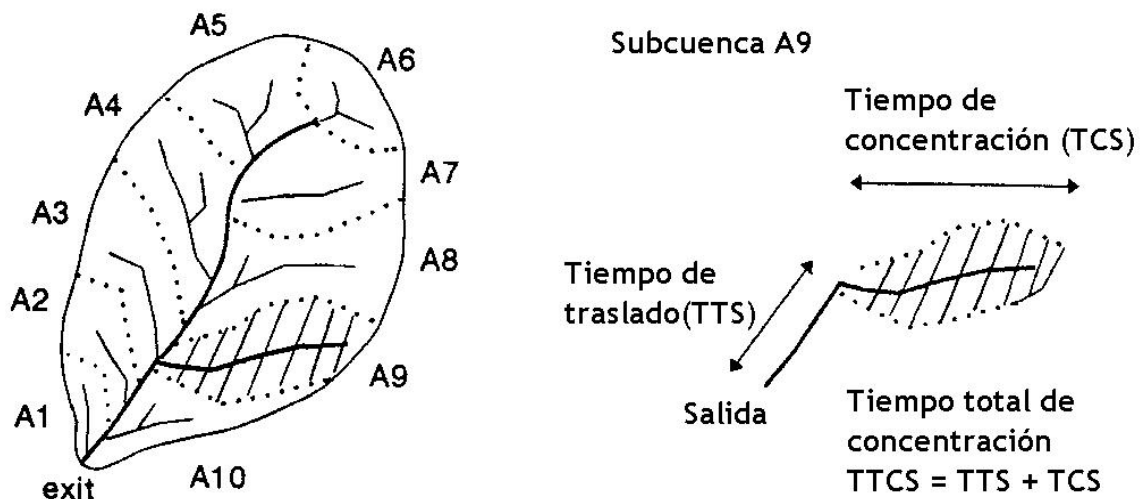


Figura 5. 1 División de una cuenca hipotética y parámetros de tiempo

Aceptando que la suma de los aportes de cada subcuenca puede representarse en forma similar a una convolución (pseudo - convolución), se propone entonces que el hidrograma unitario se calcule a través de la ecuación 5.3. Se le denomina "pseudo" porque simulará en el tiempo, los aportes que cada subcuenca hasta la salida. Para

construir el hidrograma unitario de la cuenca completa (fig. 5.2). A partir de este momento se le llamará primera convolución a la pseudo-convolución planteada.

$$U(t - j + 1) = \sum_{\tau=0}^{nc} \frac{A(i)}{TTCS_i - TTS_i} US_i(t - TTS_i + 1) \quad (5.3)$$

$$US_i(t - TTS_i + 1) = F \text{ si } TTS_i \leq t \leq TTCS_i$$

$$US_i(t - TTS_i + 1) = 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

donde  $nc$  es el número de cuencas,  $A(i)$  es el área de la subcuenca "i", en m.

Análisis dimensional de la ecuación 5.3

$$U = \frac{m^2}{s} \left( \frac{m}{mm} \right) = m^3/s/mm$$

En la ecuación 5.3 también aparece un parámetro "F", dicho parámetro es un aporte unitario (US) de la subcuenca "i" (fig. 5.2). En este trabajo, se le ha asignado el valor de 0.001(m/mm). Su significado, es el de una lámina de 0.001m de escurrimiento por 1mm de lluvia. Si se pone en consideración las unidades de la ecuación 5.3, se podrá notar que si el área está en m<sup>2</sup> y el tiempo en s; las unidades resultantes serán m<sup>3</sup>/s/mm.

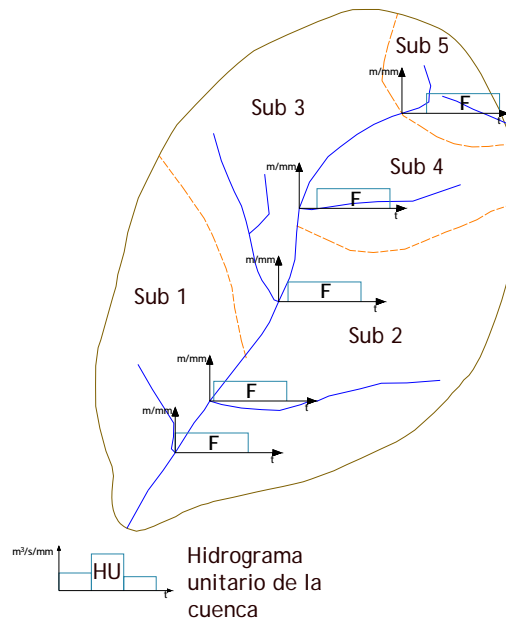


Figura 5. 2 Contribuciones "F" de las subcuencas y primera convolución para la obtención del hidrograma unitario de la cuenca

La comparación entre los tiempos  $TTS_i$  y  $TTCS_i$ , es la que determina el tiempo en que inicia y termina la aportación  $F$  de cada una de las subcuencas fig. 5.4. Dicha comparación garantiza que los aportes de las subcuencas se encuentren en la salida de la cuenca. Visto desde otra perspectiva, si una gota de lluvia cae en la salida de la subcuenca, el tiempo que tardará en llegar a la salida de la cuenca será el tiempo de traslado ( $TTS$ ); sin embargo, si una gota cae en la parte más alta y alejada de la subcuenca el tiempo que tardará será el tiempo total de concentración ( $TTCS$ ). Este proceso se encuentra esquematizado en la figura 5.3. De esta manera, al realizar la primera convolución con la ecuación 5.3, obtendremos el hidrograma unitario de la cuenca.

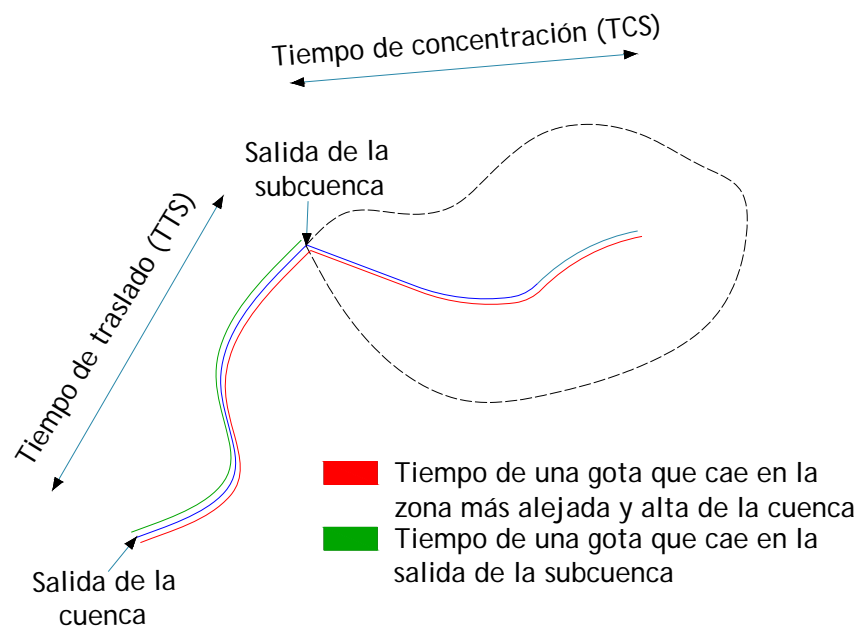


Figura 5. 3 Comparación de los tiempos de cada subcuenca  $TTS$  y  $TTCS$ , según la ecuación 5.3

Debido a que los tiempos de traslado y concentración, no son enteros y que tampoco son múltiplos exactos de los tiempos en que ocurre la lluvia. Se acumularán errores en la determinación del hidrograma unitario de las subcuencas ( $US(k)$ ). Esto quiere decir que si una subcuenca tiene un tiempo de traslado de 4.4min y nuestra escala de tiempo son min; el primer pulso del hidrograma unitario se generará en el minuto 5, según la ecuación 5.3. Lo que indica que si se reduce la escala del tiempo de cálculo, puede reducirse el error acumulado de manera notable.

En la figura 5.4, se presenta la contribución de dos subcuencas. Que al aplicar la primera convolución (ec. 5.3), genera el hidrograma unitario de la cuenca completa.

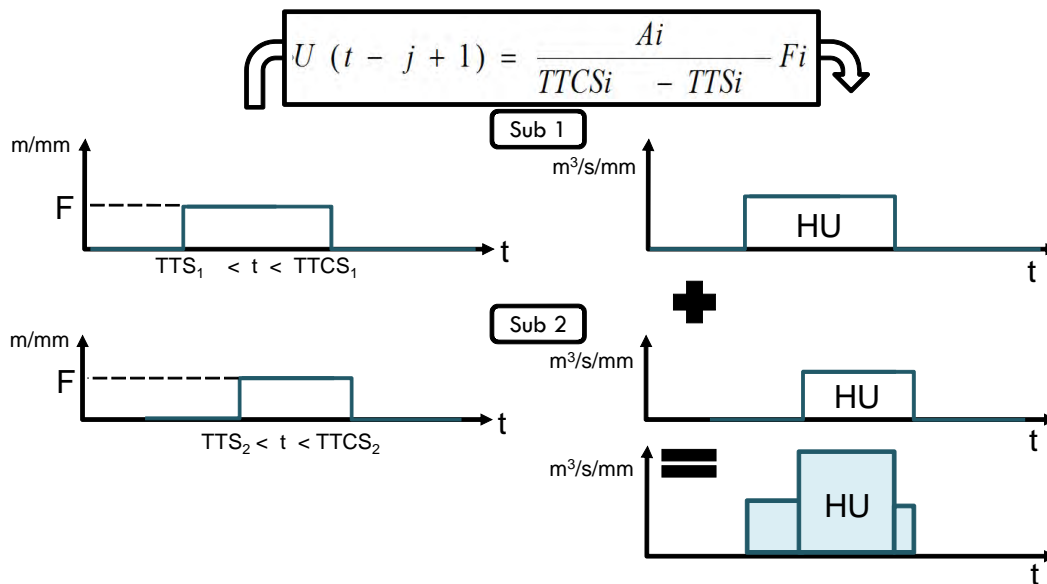


Figura 5. 4 Simulación de las aportaciones de las subcuencas y generación del hidrograma unitario de la cuenca

Proponer  $F$  igual a una constante, tiene la implicación de considerar que el hidrograma unitario de cada subcuenca es constante (fig. 5.4), evidentemente podría dársele cualquier otra forma, sin embargo, esta suposición simplifica el cálculo, y no tiene mayor importancia cuando el número de subcuencas es grande y los tiempos de cálculo son pequeños.

La esencia del procedimiento propuesto, consiste en definir, a través de una primera convolución (pseudo - convolución), hidrogramas discretos de cada subcuenca (en el espacio), y luego a través de una segunda convolución, realizando la suma en instantes predefinidos (en el tiempo), calcular el hidrograma de la avenida. El procedimiento está condensado en la figura 5.5.

Para verificar que el hidrograma de la tormenta es correcto, se propone comparar su volumen con el del hidrograma de lluvia efectiva. Este volumen es el área debajo del hidrograma. Si el hidrograma es correcto, el volumen debe ser igual.

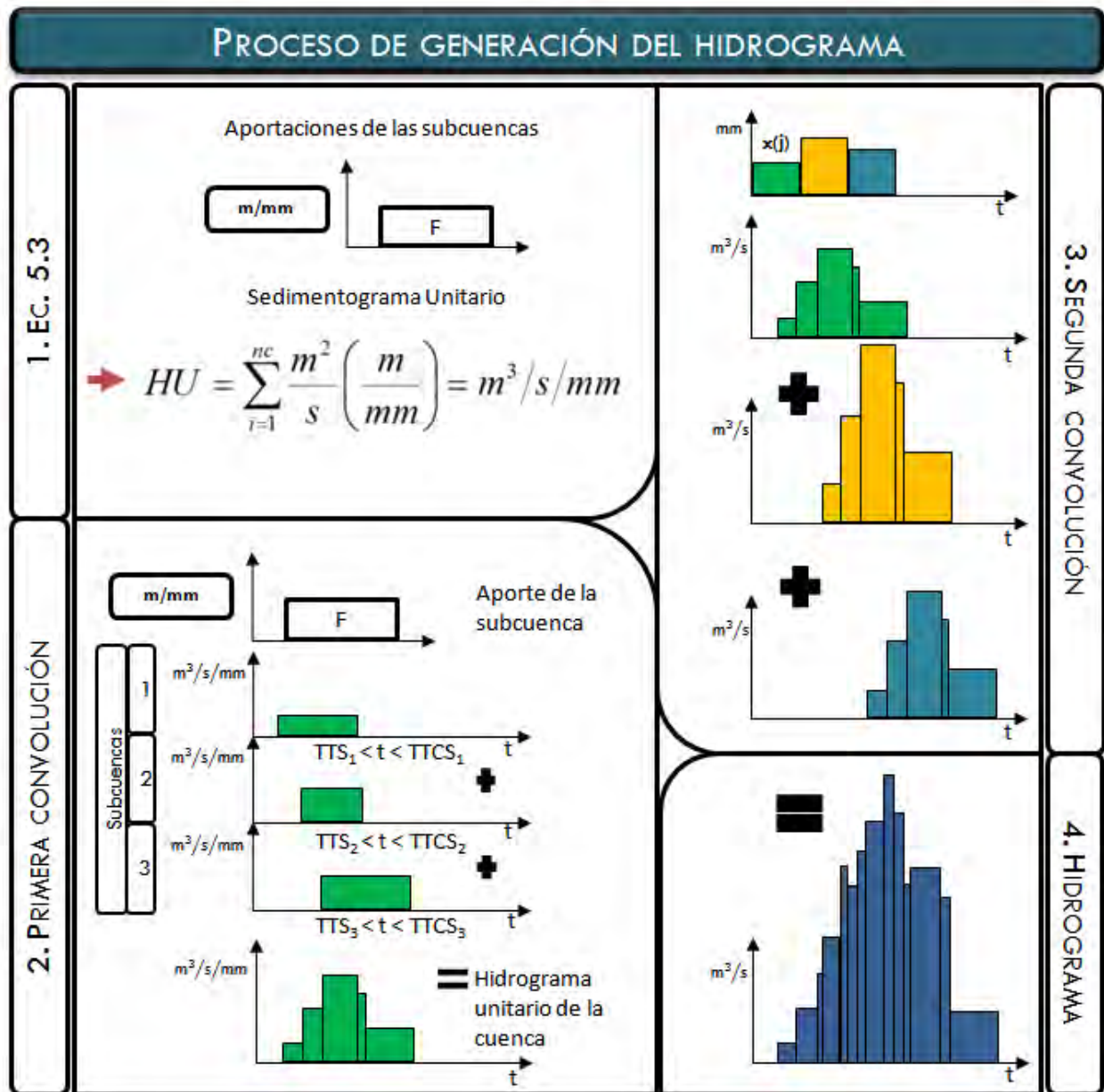


Figura 5. 5 Proceso de generación del hidrograma

### 5.1.2 Generación de sedimentogramas

Es necesario considerar que el cálculo de la erosión en la cuenca puede realizarse a través de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS), pero que en términos generales puede presentarse de la siguiente manera para efecto de realizar una convolución.

Supóngase que para una lluvia dada, es posible asociar a cada barra del hietograma un factor que toma en cuenta la erosividad de la lluvia en el tiempo  $R(\tau)$  y es aplicable en



toda la cuenca. Por otro lado, si se acepta a priori la existencia de un sedimentograma unitario  $SU(t)$  entonces es posible establecer para la cuenca una convolución que permite determinar el gasto sólido  $sy(t)$ . Por medio de expresiones similares a las que se mostraron para la obtención del hidrograma.

$$sy(t) = \sum_{j=1}^t R(j)SU(t-j+1) \quad (5.4)$$

*si  $j \leq np$*

$$sy(t) = \sum_{j=1}^{np} R(j)SU(t-j+1) \quad (5.4(b))$$

*si  $np < j \leq nu$*

donde  $np$  es el número de ordenadas de la representación discreta de la distribución de la erosividad de la lluvia  $R(j)$ ,  $nu$  es el número de ordenadas de la representación del sedimentograma unitario  $SU(t-j+1)$ , bajo la siguiente condición

$$SU(i) = 0 \text{ cuando } i < 1 \text{ o } i > n_u$$

En forma similar al procedimiento establecido para el hidrograma, para determinar el sedimentograma unitario se propone emplear la siguiente ecuación.

$$SU(t-j+1) = \sum_{i=0}^{nc} \frac{A(i)}{TTCS_i - TTS_i} SUS_i(t - TTS_i + 1) \quad (5.5)$$

$$SUS_i(t - TTS_i + 1) = SF_i \text{ si } TTS_i \leq t \leq TTCS_i$$

$$SUS_i(t - TTS_i + 1) = 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

donde  $nc$  es el número de cuencas,  $A(i)$  es el área de la subcuenca "i", y  $SF_i$  es el aporte de sedimento de la subcuenca  $SUS_i(t-TTS_i+1)$  (o genéricamente  $SU(k)$ ), que dependerá de las características de cada subcuenca, esto es, depende del tipo de suelo ( $k$ ), pendientes y la longitud de las mismas ( $SL$ ), cobertura vegetal ( $C$ ) y las prácticas de conservación de suelos ( $P$ ), es decir;  $SF_i = f(k, SL, C, P)$ . El procedimiento de convolución para el sedimentograma, se encuentra ilustrado en la figura 5.6. El término sedimentograma normalmente se refiere a la relación entre las concentraciones y el tiempo, sin embargo el término también puede emplearse para definir la relación entre gastos sólido y el tiempo.

La comparación de tiempos de las subcuencas se efectúa de la misma forma que se hizo para el hidrograma, es decir, se tomarán en cuenta las contribuciones a la salida de la cuenca. Al realizar la primera convolución, se obtendrá el sedimentograma unitario de la cuenca.

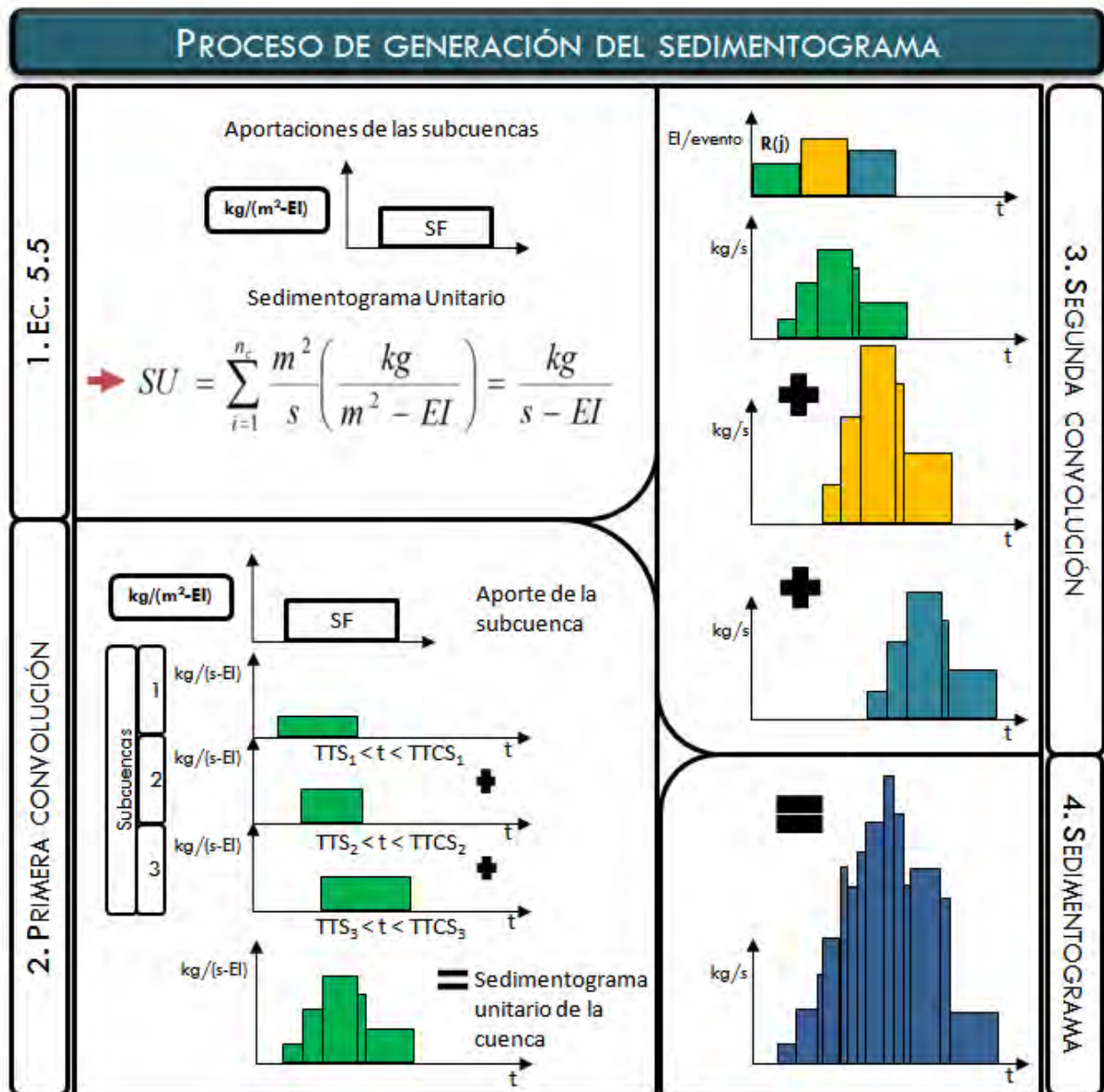


Figura 5. 6 Proceso de generación del sedimentograma

Para explicar el proceso de aporte de las subcuencas y la obtención del sedimentograma unitario para dos subcuencas se muestra la figura 5.7. Se puede notar que los sedimentogramas unitarios generados, son también constantes. Siguiendo las

observaciones hechas para el hidrograma, es posible generar un sedimentograma bien definido.

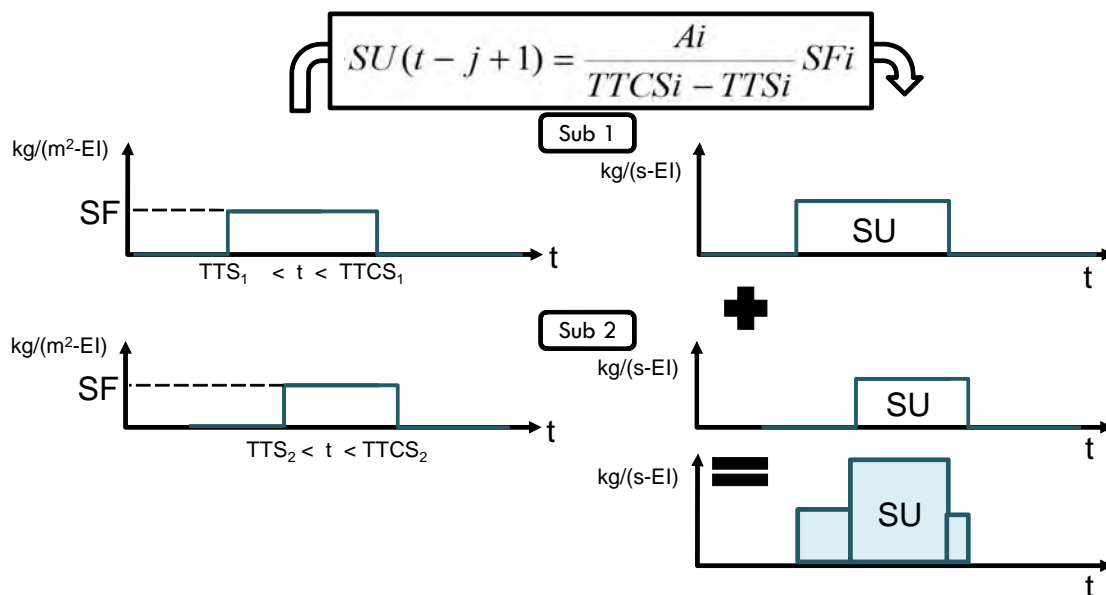


Figura 5. 7 Simulación de las aportaciones de las subcuencas y generación del hidrograma unitario de la cuenca

## 5.2 Integración del modelo

Los datos requeridos para la generación sintética de sedimentogramas son los siguientes:

- a. Área de la cuenca
- b. Área de las subcuencas
- c. Tiempos de concentración y de traslado de cada subcuenca
- d. Definición de parámetros de la Fórmula Universal de Pérdida de suelo para cada subcuenca (tipo de suelo, uso, pendientes, longitudes y obras de protección)
- e. Velocidad de infiltración promedio en la cuenca

### Procedimiento de cálculo, fig. 5.8

1. Se determina el hietograma de lluvia efectiva ( $x(j)$ ) para toda la cuenca, restando de la altura total de lluvia de cada barra del hietograma la infiltración en el suelo
2. Se determina el índice de erosividad de la lluvia ( $R(j)$ ), para cada una de las barras del hietograma empleando el criterio de la FUPS

3. Determinar el valor del hidrograma unitario ( $U(t-j+1)$ ), para cada subcuena, asignando previamente el valor de F según lo indicado
4. Determinar el valor del sedimentograma unitario ( $SU(t-j+1)$ ), para cada subcuena, calculando previamente el valor de SF según lo indicado
5. Efectuar la convolución planteada y obtener el hidrograma de la avenida
6. Efectuar la convolución planteada y obtener el sedimentograma de gasto sólidos de la avenida
7. Calcular el sedimentograma de concentraciones dividiendo los gastos sólidos obtenidos en (6) entre los gastos líquidos obtenidos en (5).

### 5.3 Definición de Parámetros para el modelo

#### 5.3.1 Tiempo de concentración

Como se mencionó en el capítulo 1, se considera el tiempo de concentración de la cuenca, como aquel que emplea el agua en llegar desde el punto más lejano hasta la salida. En la definición se presupone que el punto más alejado es el que emplea el mayor tiempo de recorrido. El criterio empleado está expresado por la siguiente ecuación (Ramser (1927) y Kerby (1959)):

$$T_c = 0.02L_c^{0.77} S_c^{-0.385} + \left| \frac{2nL_0}{\sqrt{S_0}} \right|^{0.467} \quad (5.6)$$

donde

- $T_c$  tiempo de concentración, en min
- $L_c$  longitud del cauce, en m
- $L_0$  longitud del flujo superficial (overland flow), en m
- $S_0$  pendiente de la ladera del flujo superficial (overland flow), en m/m
- $n$  coeficiente de rugosidad según Manning

El tiempo de concentración considerado es válido para las subcuencas y para la cuenca completa.

#### 5.3.2 Curvas de infiltración

Es necesario disponer de relaciones que asocien la velocidad de infiltración media en la cuenca con el tiempo, éste generalmente es un dato obtenido de mediciones en campo, sin embargo en su ausencia, existen criterios que permiten obtener dichas relaciones de manera aproximada. Se propone utilizar el modelo de Horton (1940):

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad (5.7)$$

donde

- $f_t$  velocidad de infiltración en cualquier instante  $t$ , en mm/hr
- $f_c$  velocidad de infiltración para tiempos ( $t$ ) grandes, en mm/hr
- $f_0$  velocidad de infiltración inicial en  $t = 0$ , en mm/hr
- $K$  constante que depende del tipo de suelo y de su superficie, en  $\text{min}^{-1}$
- $t$  tiempo desde el inicio de la lluvia, en min

### 5.3.3 Cálculo de la erosión

Para calcular la erosión de suelos se propone emplear el criterio de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS), a cual fue generada para calcular la erosión en parcelas agrícolas, en su versión original está dada en unidades inglesas; en unidades métricas toma la siguiente forma:

$$A = (0.224)RK(SL)CP \quad (5.8)$$

donde

- $A$  erosión de suelo en  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{-evento})$
- $R$  factor o índice de erosividad de la lluvia, en unidades EI
- $K$  factor de erosionabilidad del suelo, en  $(\text{ton}/\text{acre-EI})$
- $SL$  factor de pendiente y longitud
- $C$  factor de cobertura vegetal
- $P$  factor de protección de suelo

*Las unidades de EI son (100 ft ton/acre)(in/hr)*

Como se puede observar las unidades de "R" y "K" son un poco complicadas, sin embargo para los fines que aquí se persiguen, basta con saber que el resultado está expresado en  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{-evento})$ , y que "R" es quien determina el concepto de evento; esto significa que si "R" es valuada por tormenta, "A" indicará la erosión por tormenta, si "R" es valuada por minuto, "A" indicará la erosión por minuto, etc.

El valor de los factores K, SL, C y P depende de cada caso en particular, por lo que existen distintos criterios para su determinación.

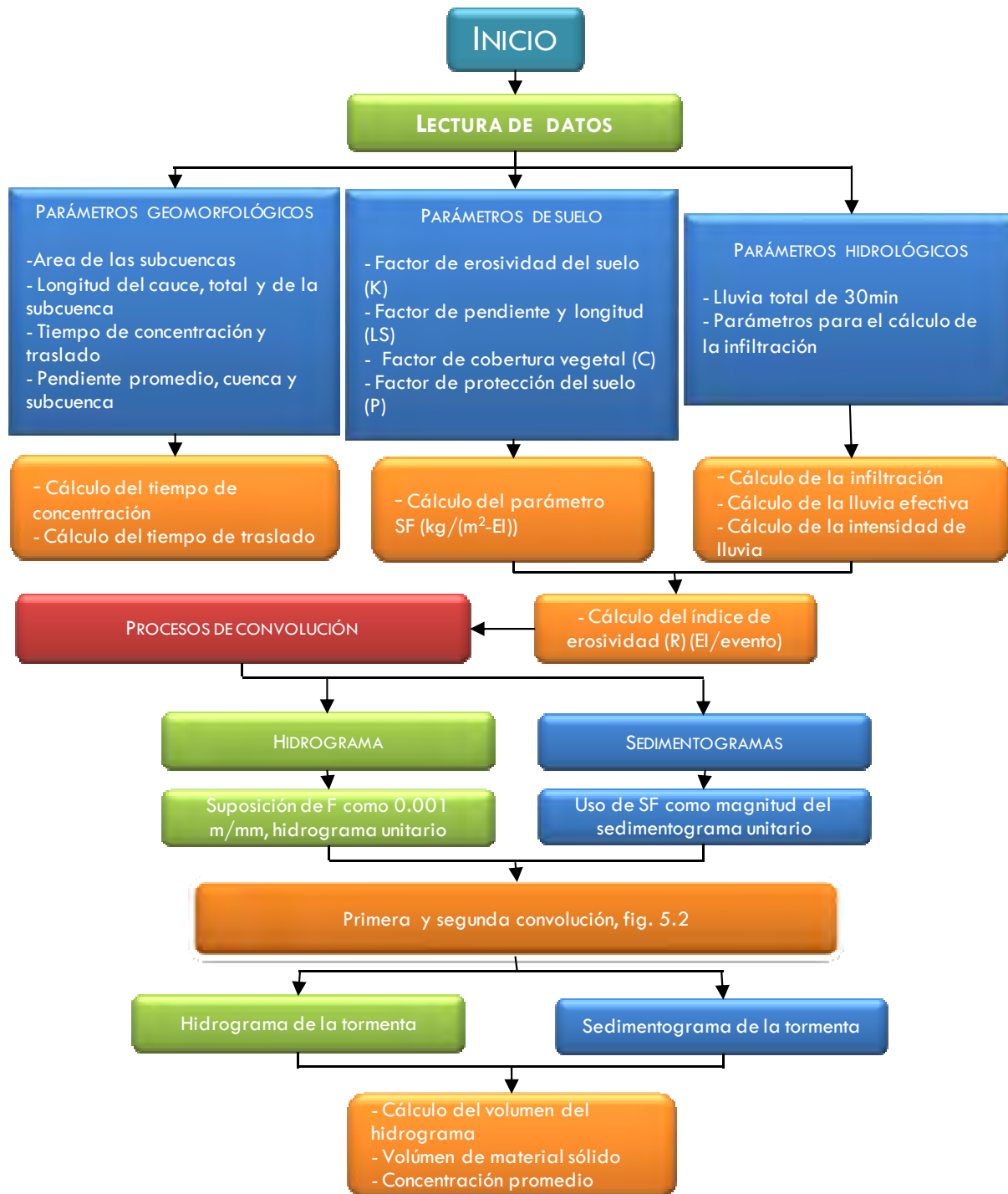


Figura 5. 8 Esquema de cálculo de la generación sintética

### 5.3.4 Índice de erosividad

$$R = \frac{\left[ \sum_{j=1}^n (1.213 + 0.890 \log_{10} I_j) (I_j T_j) \right] I_{30}}{173.6} \quad (5.9)$$

donde:

- R índice de erosividad de la lluvia (EI/evento)
- $I_j$  intensidad de la lluvia para un intervalo de tiempo de la tormenta, en mm/h
- $t_j$  intervalo de una parte de la tormenta en h
- $I_{30}$  intensidad máxima de la tormenta en 30 min, en mm/h
- $j$  número del intervalo
- $n$  número total de intervalos en que se dividió a la tormenta

Para determinar el índice de erosividad con la ecuación anterior, se requiere el hietograma de cada tormenta, y en especial la intensidad máxima en treinta minutos.

La ecuación anterior puede utilizarse de forma desagregada considerando que  $T_j = \Delta t$ , donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en que se dividió el hietograma. Por lo tanto la ecuación 5.9 se emplea de la forma:

$$R = \frac{\left[ \sum_{j=1}^n (1.213 + 0.890 \log_{10} I_j) (I_j \Delta t) \right] I_{30}}{173.6} \quad (5.10)$$

Para cada subcuenca se establecerá

$$SF_i = 0.224(K(SL)CP)_i \quad (5.11)$$

Cuyas unidades con  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{-EI})$ .

A diferencia de la F establecida para la generación del hidrograma, SF depende de los parámetros indicados en la ecuación 5.11. La fórmula 5.10 involucra la intensidad máxima en 30 minutos y la intensidad del intervalo. Esta intensidad es calculada con la lluvia total de la tormenta. En los inicios de la tormenta, el agua que cae no escurre a los canales, es decir, la infiltración será alta hasta que el suelo se sature y comience a escurrir el agua. Desde los inicios de la tormenta el suelo se erosiona, es necesario tomar en cuenta que el material será transportado a los canales, hasta que comience el escurrimiento. Para que el método tome en cuenta este fenómeno, en los primeros

instantes de la tormenta se calcula el aporte correspondiente a la intensidad de lluvia total; para que se acumule hasta que se inicie el escurrimiento. En dicho instante, se sumará al aporte de la lluvia correspondiente, todo el aporte de sedimento acumulado hasta ese momento.

### 5.3.5 Cálculo del aporte de sedimento en la cuenca

La FUPS, es una fórmula que fue planeada para calcular la erosión en parcelas agrícolas, por lo cual, cuando interesa conocer el aporte de material sólido en áreas más grandes, como es el caso de las cuencas, se presentan algunas dificultades ocasionadas por los siguientes factores:

- ▶ El material sólido que sale de una cuenca, no sólo proviene de la erosión en las parcelas, sino también de la erosión de los cauces.
- ▶ Magnitud y proximidad de las fuentes de material sólido respecto a la salida de la cuenca.
- ▶ Características de la red de drenaje (densidad, pendiente, longitud, etc.)
- ▶ Distribución espacial de la lluvia.
- ▶ Existencia de zonas de depósito.
- ▶ Características físicas de la cuenca (área, forma, etc.)

Tratando de tomar en cuenta estos factores, se ha propuesto el concepto del “porcentaje del aporte de sedimento” (“sediment delivery ratio”) (SDR), que intenta valuar la cantidad efectiva de material sólido que puede salir de la cuenca. El SDR ha sido determinado de manera empírica para algunos sitios. Para las cuencas del medio oeste en los EUA, se han propuesto las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 SDR &= 51.28A_c^{-0.1753} & 0.259 < A_c < 25.9 \text{ km}^2 \\
 SDR &= 56.87A_c^{-0.2071} & 25.9 < A_c < 259 \text{ km}^2 \\
 SDR &= 84.12A_c^{-0.2775} & 259 < A_c < 2590 \text{ km}^2
 \end{aligned}
 \tag{5. 12}$$

donde: SDR está en %, y  $A_c$  en  $\text{km}^2$

En síntesis, del material erosionado en una cuenca el SDR indica en por ciento, la cantidad que realmente sale de ella. El material restante quedará retenido dentro de la cuenca.



### 5.3.6 Tiempo de traslado

El concepto de tiempo de traslado empleado en las subcuencas, es el tiempo que tarda en viajar el agua desde la salida de la subcuenca hasta la salida de la cuenca principal. Para calcularlo puede emplearse la fórmula de Manning o algún otro criterio equivalente.

$$Q = \frac{A}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \quad (5. 13)$$

Como utilizar la fórmula de Manning implica suponer una sección transversal constante a lo largo de todos los cauces de la cuenca. Se propone utilizar el siguiente método para calcular el tiempo de traslado

$$T_t = \frac{L}{V} \quad (5. 14)$$

donde

- L es la longitud de traslado,
- V es la velocidad,

$$V = kS^{0.5} \quad (5. 15)$$

donde

- k Coeficiente que relaciona la velocidad con la pendiente, m/s
- S Pendiente promedio del cauce, %

<i>Coeficiente k (m/s)</i>	<i>Uso de suelo</i>
0.07620	Bosque con suelo denso(cubierto), prado de heno
0.15240	Barbecho o terreno cultivado de forma mínima; tierra recién cosechada
0.21336	Pasto pequeño
0.27432	Terreno cultivado con canales rectos
0.30480	Terreno casi desnudo
0.45720	Vía fluvial pastosa
0.60960	Área enpedrada; con pequeños barrancos

Tabla 5. 1 Coeficiente k, que relaciona la velocidad con la pendiente, m/s

### 5.4 Tormentas experimentales

Para mostrar la efectividad de la metodología planteada, se realizaron experimentos con 4 tormentas. Se utilizó una cuenca con las mismas características físicas. Con el propósito de simular un control sobre las variables que intervienen e identificar las condiciones que podrían generar sedimentogramas como los descritos al final del

capítulo4. Adelantados, retrasados, en fase y de múltiples picos. En la tabla 5.2 se observan los valores de los parámetros geomorfológicos y de suelo, utilizados para simular las tormentas.

Para realizar estos experimentos se elaboró un programa en Visual Basic 6.0. A continuación se muestran los resultados obtenidos con el programa. Los datos requeridos por el programa, están en el apéndice 1.

Se debe señalar que se ha tratado de mantener control sobre las variables del experimento. Desafortunadamente no ha sido posible mantener más parámetros como constantes.

Sub	Área (1)	LC (km)	LTS (km)	S cauce (1)	LO (km)	SO(1)	n	k	SL	C	P
1	0.05	0.4	0	0.005	4.606	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
2	0.05	0.4	0.4	0.005	4.606	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
3	0.07	0.49	0.6	0.005	4.606	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
4	0.09	0.57	0.83	0.005	4.606	0.009	0.03	0.3	1	0.3	1
5	0.1	0.6	1.07	0.005	4.606	0.009	0.03	0.3	1	0.3	1
6	0.1	0.6	1.3	0.005	4.606	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
7	0.11	0.64	1.51	0.005	4.606	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
8	0.13	0.71	1.72	0.005	4.606	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
9	0.15	0.77	1.94	0.005	4.606	0.009	0.03	0.2	1	0.2	1
10	0.15	0.77	2.18	0.005	4.606	0.009	0.03	0.2	1	0.2	1

Tabla 5. 2 Parámetros geomorfológicos y de suelo para las subcuencas

En la tabla 5.2 se solicita el área como un parámetro necesario, debe señalarse que está expresada como una proporción del área total de la cuenca. Tomando al área total de la cuenca como la unidad.

#### 5.4.1 Tormenta 1

Datos de lluvia

t (min)	hp T (mm)	t (min)	hp T (mm)	t (min)	hp T (mm)
0	0.5	180	10.5	360	5.8
30	1	210	7.5	390	5.2
60	1.5	240	7	420	5.1
90	3	270	6	450	5
120	8	300	5.9	480	5
150	8.5	330	5.8	510	5

Tabla 5. 3 Datos de lluvia, tormenta 1

Área de la cuenca y parámetros de infiltración

$Ac \text{ m}^2$	$f_c \text{ mm/h}$	$f_0 \text{ mm/h}$	$k \text{ 1/h}$	$t \text{ min}$
2900000	3.496	40.386	0.6	30

Tabla 5. 4 Datos para el cálculo de la infiltración

Resultados de la corrida con el programa

Hietograma y curva de infiltración

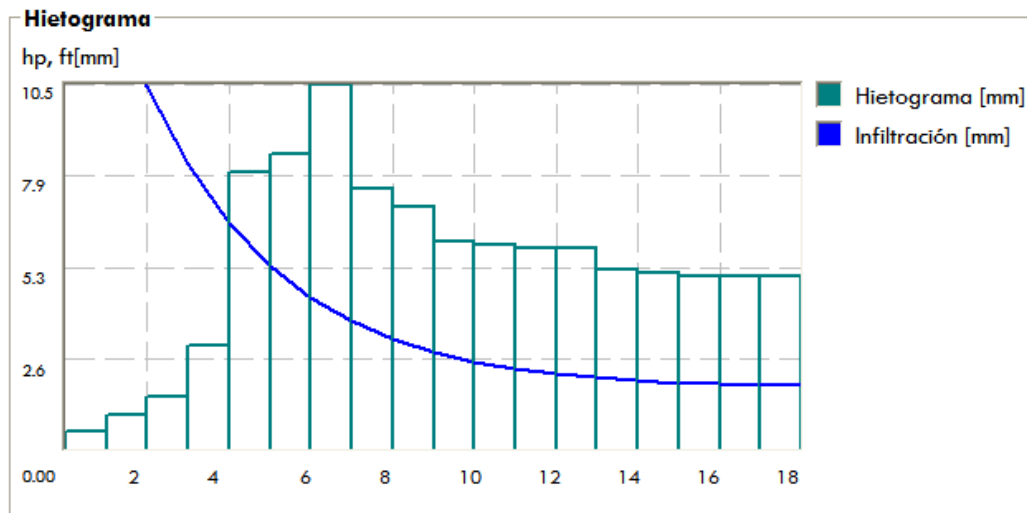


Figura 5. 9 Hietograma y curva de infiltración

Gráficas (se utiliza la misma escala para los tres gráficos)

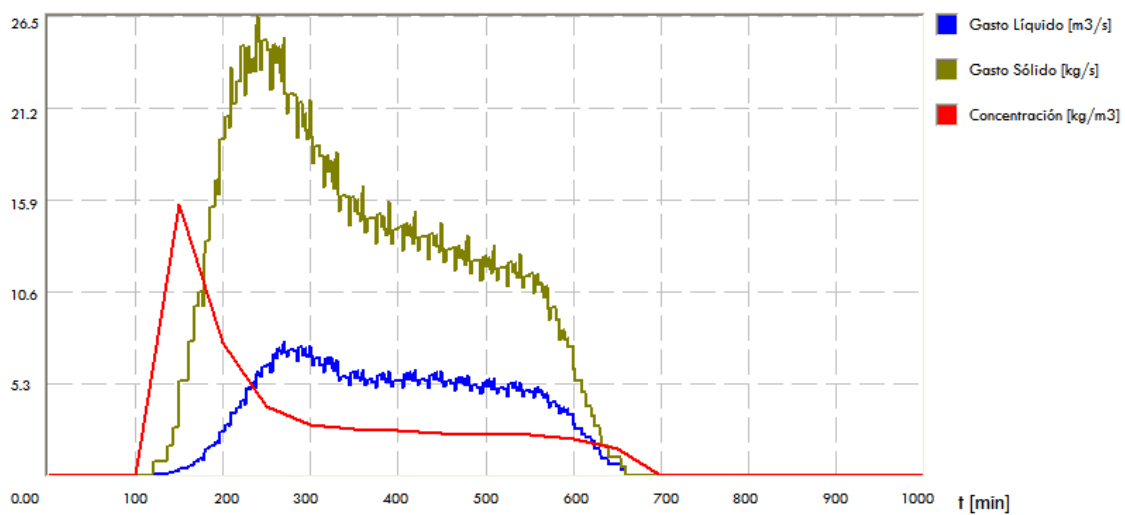


Figura 5. 10 Gráficas, tormenta 1

## Resultados adicionales

<i>Resultado</i>		<i>Unidad</i>
Volumen del hietograma	138202.400	m <sup>3</sup>
Volumen hidrograma	139656.792	m <sup>3</sup>
Error	-1.05	%
Volumen de material sólido	423576.354	kg
Concentración promedio	4.12	Kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 5. 5 Resultados adicionales, tormenta 1*

*Observaciones, tormenta 1*

En la tormenta 1 se observa un sedimentograma de concentraciones adelantado. El hietograma muestra que hay barras de lluvia antes de que comience el escurrimiento. Lo que indica que hay aportaciones de sedimento acumuladas y que probablemente se vieron manifestadas en el pico del sedimentograma. La lluvia y la infiltración fueron parámetros que se propusieron para obtener un sedimentograma con estas características. La principal razón del pico adelantado, surge de la diferencia que hay entre el gasto sólido y líquido en la rama ascendente de sus gráficos, ver fig. 5.9. Dicha diferencia, es muy amplia en esa rama. Los resultados adicionales mostrados en la tabla 5.5, verifican que el hidrograma es el correcto, ya que su volumen y el del hietograma de lluvia efectiva es parecido.

## 5.4.2 Tormenta 2

*Primer experimento*

## Datos de lluvia

<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>
0	0.01	180	7	360	4
30	0.02	210	8	390	3
60	1	240	13.5	420	2
90	4	270	10	450	1.5
120	5	300	8	480	1.5
150	6	330	6	510	1

*Tabla 5. 6 Datos de lluvia, primer experimento. Tormenta 2*

Área de la cuenca e infiltración

$Ac \text{ m}^2$	$f_c \text{ mm/h}$	$f_0 \text{ mm/h}$	$k \text{ 1/h}$	$t \text{ min}$
2900000	0.55	0.6	0.6	30

Tabla 5. 7 Datos para el cálculo de la infiltración

Resultados de la corrida con el programa

Hietograma y curva de infiltración

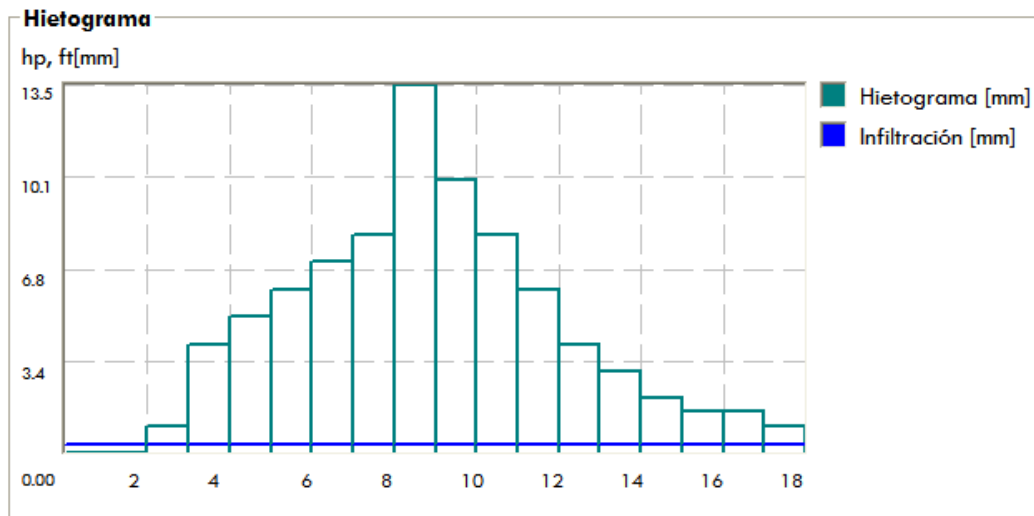


Figura 5. 11 Hietograma y curva de infiltración

Gráficas

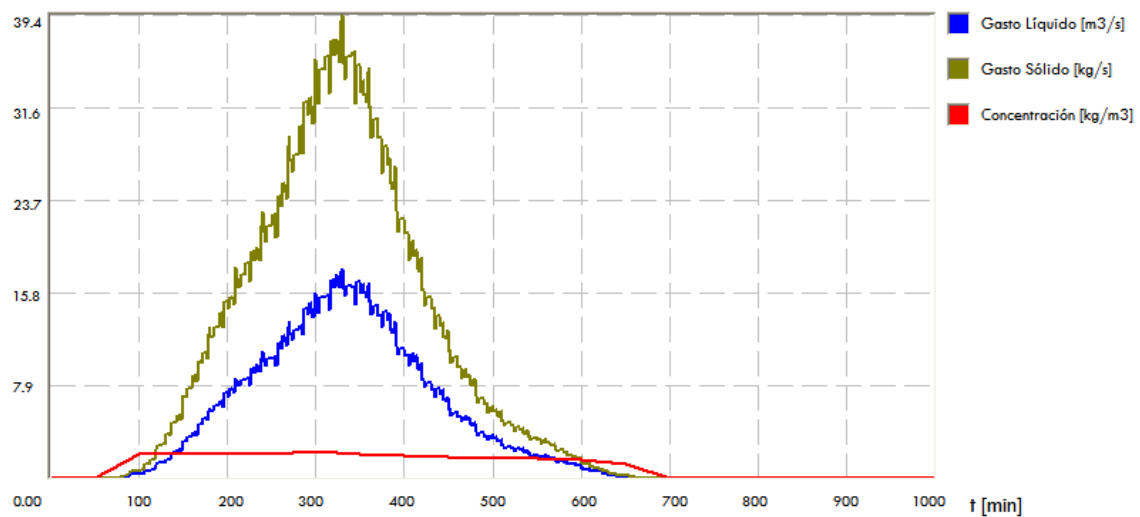


Figura 5. 12 Gráficas, tormenta 2

Resultados adicionales

<i>Resultado</i>		<i>Unidad</i>
Volumen del hietograma	223459.500	m <sup>3</sup>
Volumen hidrograma	225811.200	m <sup>3</sup>
Error	-1.05	%
Volumen de material sólido	464857.680	kg
Concentración promedio	1.92	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 5. 8 Resultados adicionales, experimento 1, tormenta 2

Segundo experimento

Datos de lluvia

<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>
0	0.05	180	4.3	360	3
30	0.5	210	5	390	1.3
60	1	240	12.5	420	1
90	1.3	270	6	450	0.5
120	3	300	5	480	0.4
150	4	330	4	510	0.3

Tabla 5. 9 Datos de lluvia, experimento 2, tormenta 2

Área de la cuenca e infiltración

<i>Ac m<sup>2</sup></i>	<i>fc mm/h</i>	<i>f0 mm/h</i>	<i>k 1/h</i>	<i>t min</i>
2900000	0.1	0.2	0.6	30

Tabla 5. 10 Datos para el cálculo de la infiltración

Resultados de la corrida con el programa

Hietograma y curva de infiltración

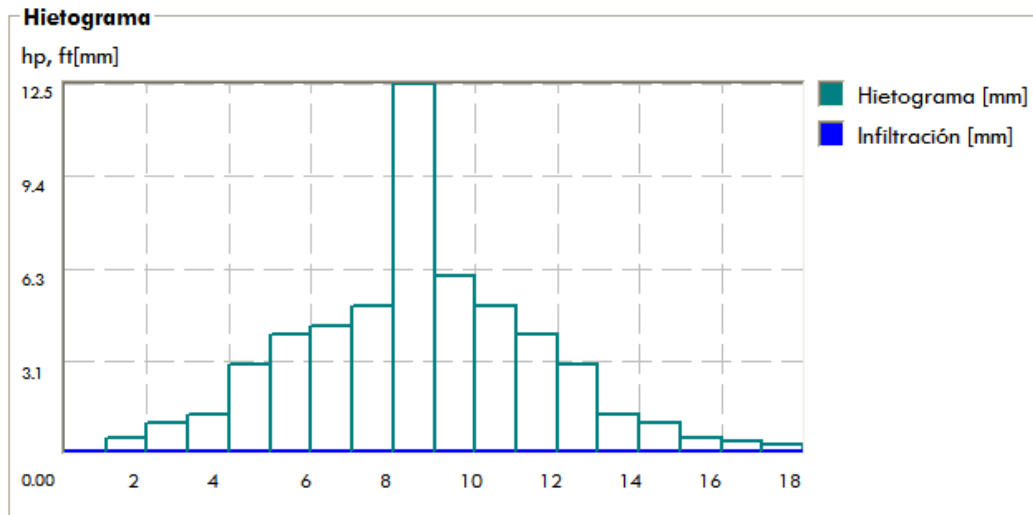


Figura 5. 13 Hietograma y curva de infiltración

Gráficas

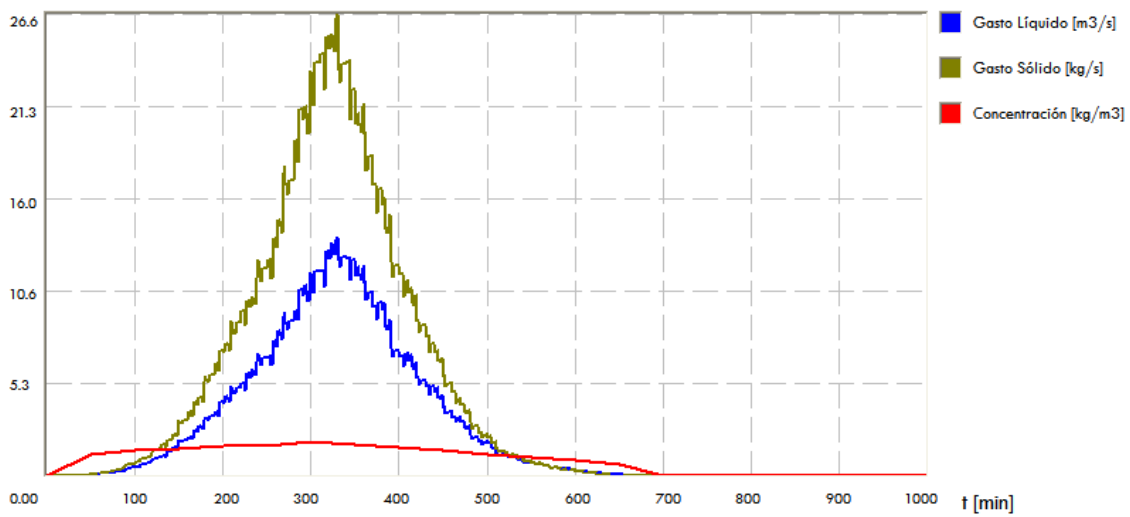


Figura 5. 14 Gráficas, tormenta 2

## Resultados adicionales

<i>Resultado</i>		<i>Unidad</i>
Volumen del hietograma	151171.200	m <sup>3</sup>
Volumen hidrograma	152762.256	m <sup>3</sup>
Error	-1.05	%
Volumen de material sólido	264579.000	kg
Concentración promedio	1.44	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 5. 11 Resultados adicionales, tormenta 2

*Observaciones, tormenta 2 (experimentos 1 y 2)*

Las figuras 5.12 y 5.14, muestran sedimentogramas en fase. La infiltración fue clave para su obtención. Se puede observar en ambas figuras que la infiltración es constante o nula. Si se incrementa o disminuye la lluvia, se obtiene la misma respuesta con los valores del gasto sólido y líquido. Si se incrementa demasiado, el valor del sedimentograma sale de los máximos valores que se presentan en campo (40kg/m<sup>3</sup>); por otro lado, si disminuye demasiado, se observa que las concentraciones para las ramas ascendente y descendente, se disparan. Esto puede deberse a que sin la acumulación de errores, estrictamente llegaríamos a una relación de gastos cero entre cero. Para lograr el sedimentograma en fase, es necesario que ambos gráficos en sus ramas de ascenso y descenso, tengan valores similares. Esto se observa en las figuras 5.12 y 5.14. Entonces, como la lluvia no es muy relevante, se observó que la infiltración constante o nula incrementa el escurrimiento directo, sin incrementar el gasto sólido. Por lo que la infiltración constante en una cuenca, propicia la aparición de este tipo de sedimentogramas.

## 5.4.3 Tormenta 3

## Datos de lluvia

<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>
0	1	180	5	360	2.3
30	1	210	4	390	2.2
60	4	240	4	420	2.1
90	6	270	3	450	2
120	10	300	2.8	480	2
150	6	330	2.5	510	2

Tabla 5. 12 Datos de lluvia, tormenta 3



Área de la cuenca e infiltración

$Ac \text{ m}^2$	$fc \text{ mm/h}$	$f0 \text{ mm/h}$	$k \text{ 1/h}$	$t \text{ min}$
2900000	3.496	40.3	0.6	30

Tabla 5. 13 Datos para el cálculo de la infiltración

Resultados de la corrida con el programa

Hietograma y curva de infiltración

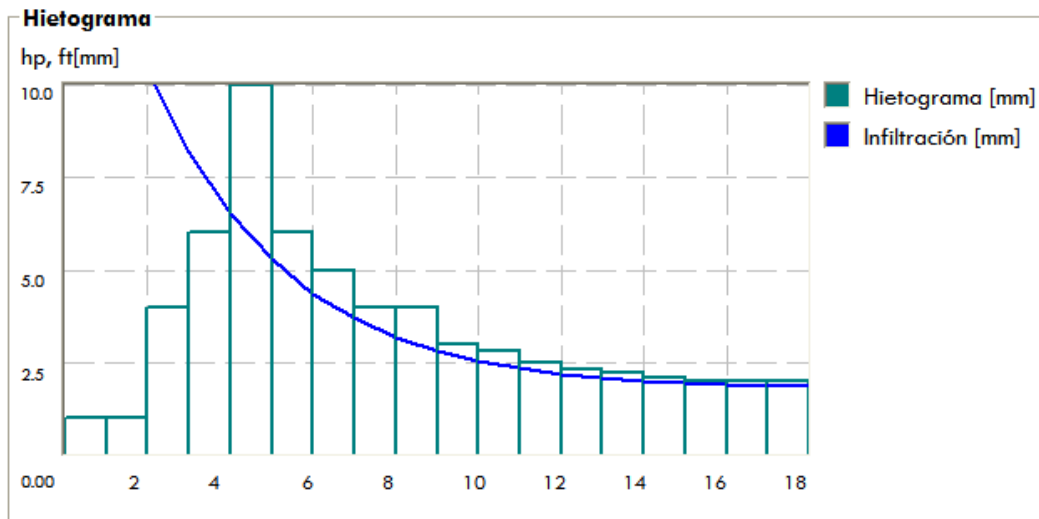


Figura 5. 15 Hietograma y curva de infiltración

Gráficas

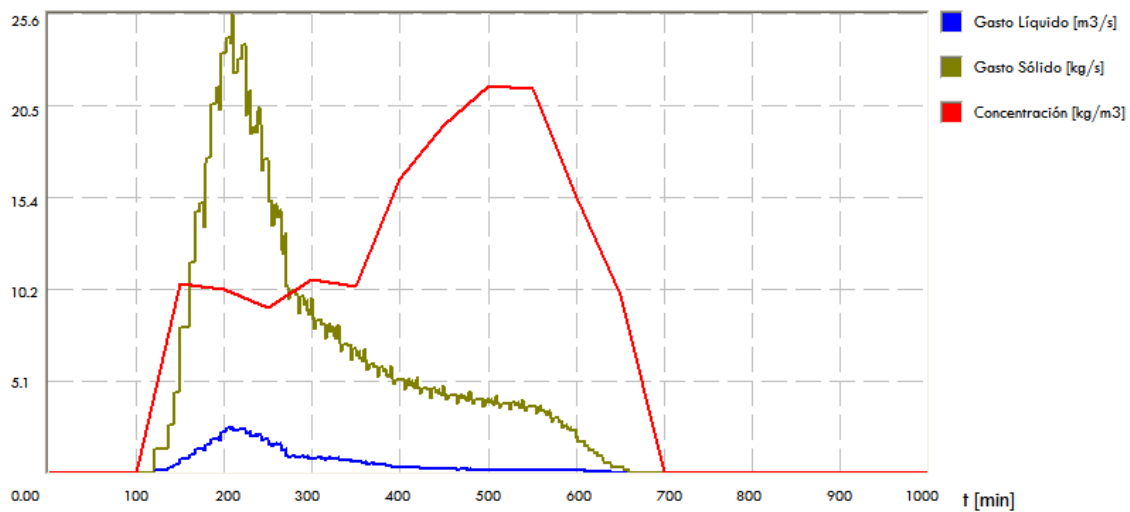


Figura 5. 16 Gráficas, tormenta 3

Resultados adicionales

<i>Resultado</i>		<i>Unidad</i>
Volumen del hietograma	21158.400	m <sup>3</sup>
Volumen hidrograma	21381.036	m <sup>3</sup>
Error	-1.05	%
Volumen de material sólido	240682.074	kg
Concentración promedio	14.04	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 5. 14 Resultados adicionales, tormenta 3

*Observaciones, tormenta 3*

La figura 5.16 muestra un sedimentograma retrasado, el sedimentograma de concentraciones se dispara para los valores de ambos gastos en la rama descendente. La figura 5.15 revela que de la parte media y hasta el final de la tormenta, el escurrimiento directo es mínimo, ya que la curva de infiltración es casi paralela al hietograma de lluvia. El hidrograma de gastos se mantiene menor a uno en esta zona y como se tiene un aporte de sedimento importante de la lluvia total, el sedimentograma de concentraciones se eleva. También cabe señalar que se tiene un aporte importante de sedimento en la parte del hietograma en donde no hay escurrimiento, este aporte de sedimento se ve reflejado en el pico del sedimentograma de gastos sólidos.

Ahora que ya se han analizado tres tormentas, se puede concluir algo sobre el sedimentograma de gastos sólidos. En los tres casos anteriores y durante el proceso de prueba de las tormentas, se observó que generalmente se mantiene en fase con el hidrograma de gastos líquidos. En algunos casos se adelanta y nunca se ha retrasado.

5.4.4 Tormenta 4

Datos de lluvia

<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>	<i>t (min)</i>	<i>hp T (mm)</i>
0	1.5	180	5	360	4
30	2	210	5	390	7.5
60	2.5	240	11.5	420	4
90	4	270	3	450	3
120	10	300	3	480	3
150	6.5	330	3	510	2.5

Tabla 5. 15 Datos de lluvia, tormenta 4

Área de la cuenca e infiltración

$Ac \text{ m}^2$	$f_c \text{ mm/h}$	$f_0 \text{ mm/h}$	$k \text{ 1/h}$	$t \text{ min}$
2900000	3.496	40.386	0.6	30

Tabla 5. 16 Datos para el cálculo de la infiltración

Resultados de la corrida con el programa

Hietograma y curva de infiltración

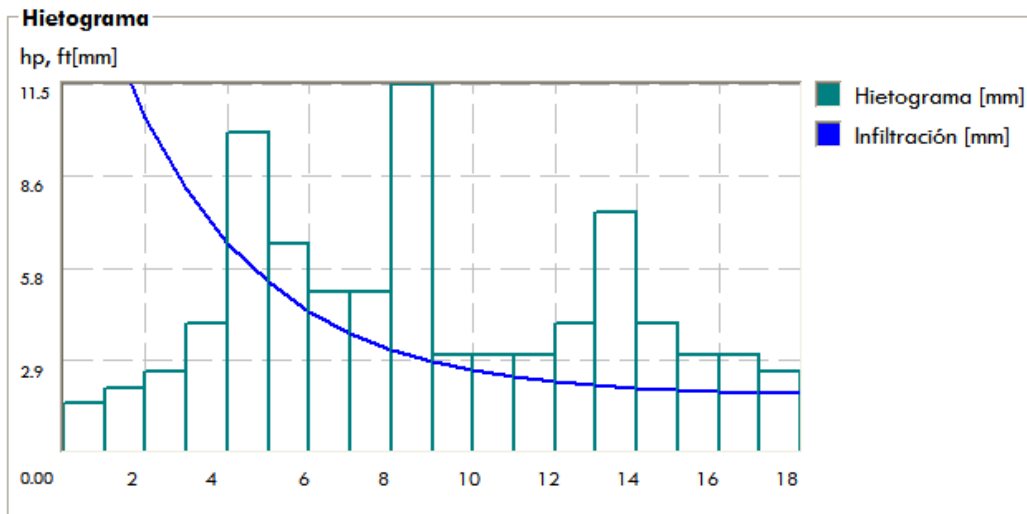


Figura 5. 17 Hietograma y curva de infiltración

Gráficas

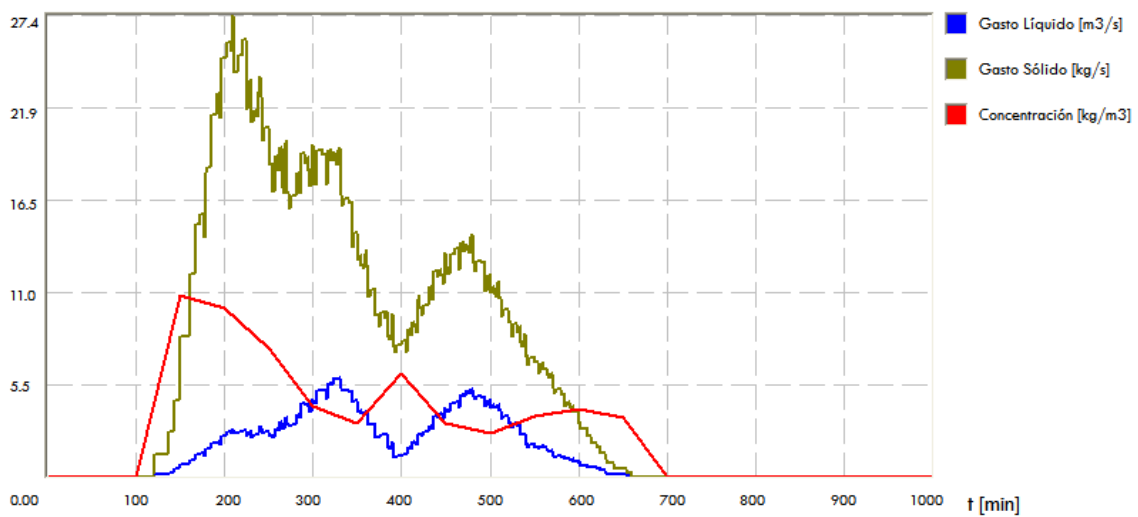


Figura 5. 18 Gráficas, tormenta 4

## Resultados adicionales

<i>Resultado</i>		<i>Unidad</i>
Volumen del hietograma	82232.400	m <sup>3</sup>
Volumen hidrograma	83097.798	m <sup>3</sup>
Error	-1.05	%
Volumen de material sólido	379494.306	kg
Concentración promedio	5.27	Kg/m <sup>3</sup>

*Tabla 5. 17 Resultados adicionales, tormenta 4**Observaciones, tormenta 4*

La figura 5.18 muestra un sedimentograma de concentraciones de múltiples picos. Se observa que responde a los picos de lluvia del hietograma. Y que presenta picos cuando los otros dos gráficos presentan valles.

## 6. CONCLUSIONES

### 6.1 Observaciones de la metodología

La metodología propuesta está basada en el planteamiento de convoluciones en el espacio y en el tiempo  $t$ , tanto para el agua como para el sedimento. Es escasa la información de artículos sobre el tema de la tesis.

Una ventaja de aplicar el método a subcuencas consiste en tomar en cuenta en cada una de ellas características del suelo y del cauce.

Los resultados de las pruebas en las cuencas experimentales contemplaron a los cuatro tipos de sedimentogramas estudiados.

Se demostró que en dos cuencas con las mismas características físicas podían presentarse distinta clase de sedimentogramas.

La relación entre los gastos sólido y líquido, es complicada. Las mediciones obtenidas en campo, muestran escasa correlación entre ellos. Por ello, pocas veces se les puede extrapolar para su uso en cuencas aledañas. Se considera que el tamaño de la cuenca influye en la correlación entre el gasto sólido y líquido. En cuencas de gran tamaño, el aporte de sedimento parece estar relacionado con el pido del escurrimiento.

Un factor de importancia en el método propuesto es la infiltración, al variar su valor, se obtienen sedimentogramas distintos. Se observan cambios en su forma y aparecen escalones en su rama ascendente.

Es necesario realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos con el método y mediciones de campo, o bien contrastarlos con los resultados de un procedimiento confiable.

Podría ser útil incluir dentro del modelo propuesto a las curvas de infiltración por subcuenca. En casos en donde el área sea notablemente relevante convendría usar hietogramas por subcuenca para considerar la distribución espacial de la lluvia.

La ausencia de datos se debe a las complicaciones de instrumentar una cuenca entera. Como se reporta en este trabajo, existen gran variedad de dispositivos para hacerlo, pero es difícil su operación, mantenimiento e instalación.

## 6.2 Hipótesis desarrolladas a partir de las pruebas

El estudio de los métodos indirectos requiere ser perfeccionado.

Se recomienda establecer la bondad del método, por medio de la experimentación.

Se considera útil desarrollar modelos a escala de cuencas pequeñas, en una mesa de simulación de lluvia o en un área mayor. En ambos casos deben colocarse sensores para medir la concentración de sedimento, ya que de esta manera se controlarían los factores físicos, climáticos y se obtendría una colección de datos importante para probar la metodología.

Otro tema que debe revisarse, es el tipo de sedimentogramas que se presentan en las cuencas y la descripción de las condiciones en las que se obtuvieron.

Las metas de la investigación conducen a verificar, ajustar y a la identificación de casos en los que funciona. De esta forma se llegará a una metodología calibrada y lista para ser utilizada en campo.

## Apéndice A

### A. MANUAL DE USO DEL PROGRAMA PARA LA GENERACIÓN SINTÉTICA DE SEDIMENTOGRAMAS

Cómo ya se ha se ha hablado se desarrolló un programa en Visual Basic 6.0 para mostrar la metodología planteada.

#### A.1 Datos

En primera instancia, el programa funciona con un archivo de Excel. Dicho archivo tiene como requisito número uno, mantener el mismo formato. Para hacer esto más fácil para el usuario, se ha incluido un archivo de nombre "Formato.xls". Que contiene el formato necesario para ingresar datos al programa. Los datos que solicita el programa son los siguientes

<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>
<i>Hoja 1</i>	
Subcuencas	(1)
Porcentaje de área de cada subcuenca, con respecto a la total	(1)
Longitud del cauce, para cada subcuenca (LC)	km
Longitud de traslado, para cada subcuenca (LTS)	km
Pendiente promedio del cauce, para cada subcuenca (S)	(1)
Longitud de la ladera, en donde se lleva a cabo el "overland flow"	km
Pendiente promedio de la ladera	(1)
n de manning	
k factor de erosionabilidad del suelo	(Ton/acre - El)
SL factor de pendiente y longitud	(1)
C Factor de cobertura vegetal	(1)
P Factor de protección del suelo	(1)
<i>Hoja 2</i>	
t tiempo de inicio de cada periodo de lluvia total	min
hp <sub>T</sub> Lluvia total en el intervalo	mm
<i>Hoja 3</i>	
Ac Área total de la cuenca	m <sup>2</sup>
fc Velocidad de infiltración para tiempos grandes	mm/h
f0 Velocidad de infiltración inicial en t=0	mm/h
K Constante que depende del tipo de suelo	1/h
t Tiempo desde el inicio de la lluvia	min

Cabe señalar que los datos están dispuestos en tres hojas de Excel, en el mismo libro. Por lo que es importante no modificar el nombre de estas tres hojas.

Las hojas de Excel están dispuestas de la siguiente manera

The image displays three screenshots of an Excel spreadsheet, likely representing different sheets in a workbook. Each screenshot shows a grid of data with columns labeled A through L and rows numbered 1 through 24.

**Sheet 1 (Top):** Contains a table with 13 columns (A-L) and 24 rows. The data is as follows:

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2	Sub	Área (t)	LC (km)	LTS (km)	Scauce (t)	L0 (km)	S0(t)	n	k	SL	C	P
3	1	0.05	0.4	0	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
4	2	0.05	0.4	0.4	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
5	3	0.07	0.49	0.6	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.3	1	0.2	1
6	4	0.09	0.57	0.83	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.3	1	0.3	1
7	5	0.1	0.6	1.07	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.3	1	0.3	1
8	6	0.1	0.6	1.3	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
9	7	0.11	0.64	1.51	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
10	8	0.13	0.71	1.72	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.2	1	0.3	1
11	9	0.15	0.77	1.94	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.2	1	0.2	1
12	10	0.15	0.77	2.18	0.005	4.6061264	0.009	0.03	0.2	1	0.2	1
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												

**Sheet 2 (Middle):** Contains a table with 13 columns (A-L) and 24 rows. The data is as follows:

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2	t (min)	hp T (mm)										
3	0	1.5										
4	30	2										
5	60	2.5										
6	90	3										
7	120	7.5										
8	150	9.5										
9	180	12.5										
10	210	8.5										
11	240	7.5										
12	270	6										
13	300	4										
14	330	3.5										
15	360	3										
16	390	2.2										
17	420	2.1										
18	450	2										
19	480	2										
20	510	2										
21												
22												
23												

**Sheet 3 (Bottom):** Contains a table with 13 columns (A-L) and 17 rows. The data is as follows:

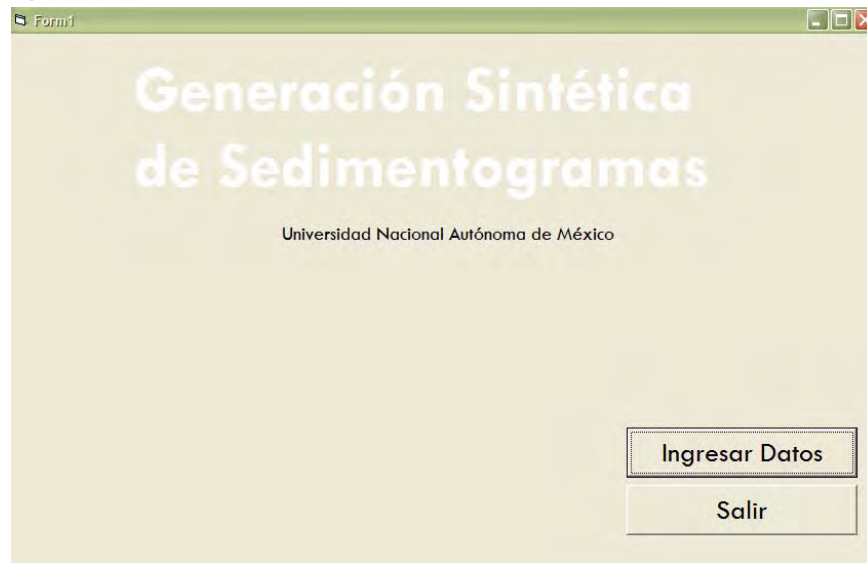
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	1	2	3						
3	Ac	2900000 m2							
4	fc	3.496 mm/h							
5	f0	40.386 mm/h							
6	k	0.6 1/h							
7	t	30 min							
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									



## A.2 Presentación del programa

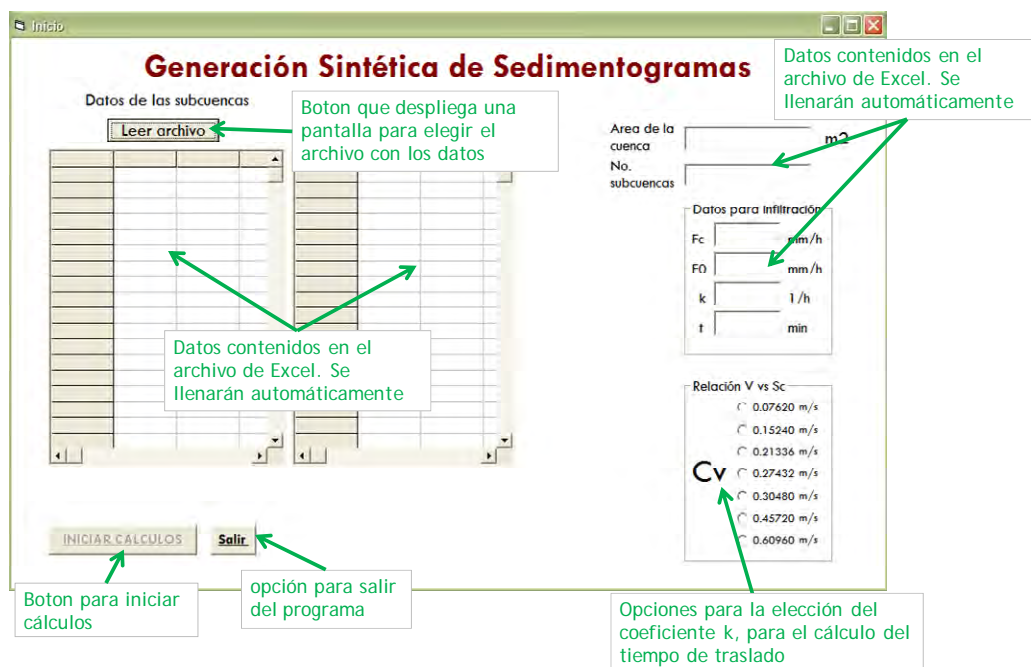
### Pantalla de presentación

En esta pantalla es sólo de presentación, por lo que sus opciones son de salida e ingresar datos para comenzar los cálculos



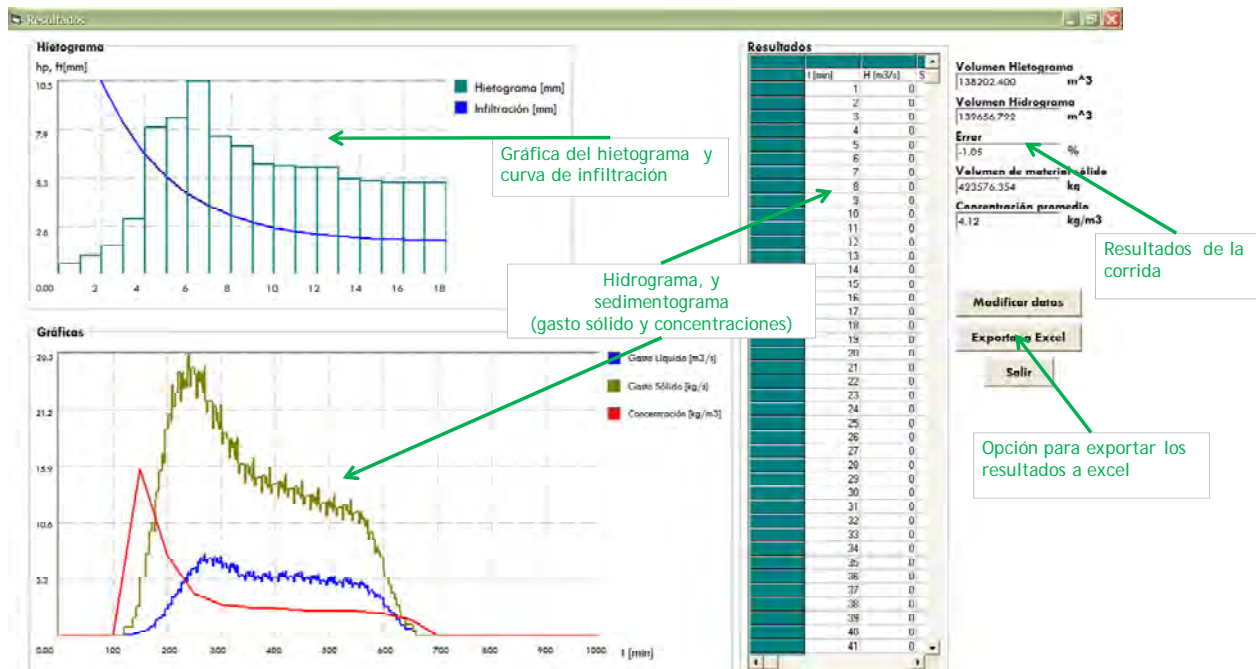
### Pantalla de ingreso de datos

En esta pantalla se elige el archivo de Excel a utilizar para realizar los cálculos. Las opciones de avance son salir e iniciar cálculos.



## Pantalla de resultados

Esta pantalla muestra los resultados de la corrida del programa, las opciones son salir e importar datos a Excel



Los resultados que muestra son:

- ▶ Volumen del hietograma de lluvia efectiva
- ▶ Volumen del hidrograma
- ▶ Error entre los dos volúmenes
- ▶ Volumen del material sólido
- ▶ Concentración promedio
- ▶ Hidrograma, sedimentograma de gastos sólidos y sedimentograma de concentraciones

## Apéndice B

### B. CÓDIGO DEL PROGRAMA

A continuación se enlista el código del programa desarrollado en Visual Basic 6.0

#### B.1 Código principal

'Variables para la infiltración

Dim Ft, Fc, F0, k1, t1, Ac As Double

'Variables para lluvia efectiva

Dim hpe As Double

'Tiempo de concentración

Dim TCS, Cv, TTS As Double

'Convolución

Dim t, NDH1, NDH2 As Integer

Dim F, US, U, H As Double

Dim Nc, i As Integer

'Volumen de los hidrogramas

Dim VH, VH2, VHi, VHi2, E As Double

'Gráficas

Dim MAXhiet, MAXhidro, MIN, Dx, Dy, lblx, lbly, hp As Double

Dim Dhp As Integer

'Sedimentogramas

Dim SF, R, Racum, Racum2, lhp, lhpMAX, SU1, SU2, SED, SDR As Double

'Concentraciones

Dim C, MAXsed, MAXconc, MAX, Dx2, VS, VS2, Cp, Cp2, NDHT As Double

Private Sub cdmCalcular\_Click()

'Cálculo de la infiltración

i = 1

While Me.msfg2.TextMatrix(i, 1) <> ""

Ft = (Fc + (F0 - Fc) \* Exp(-k1 \* ((Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 1)) + 15) / 60))) \* 0.5

frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 1) = Format(Ft, "0.000")

i = i + 1

Wend

'Cálculo de la lluvia efectiva

i = 1

While Me.msfg2.TextMatrix(i, 1) <> ""

hpe = Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 2)) - Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 1))

If hpe <= 0 Then

hpe = 0

frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2) = Format(hpe, "0.000")

Else

```

frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2) = Format(hpe, "0.000")
End If
i = i + 1
Wend
'Cálculo del tiempo de concentración
i = 1
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 1) <> ""
TCS = (0.02 * ((Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 3)) * 1000) ^ 0.77) * ((Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 5))) ^ -
0.385) + ((2 * (Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 8))) * (Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 6)) * 1000)) /
(Sqr((Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 7)))))) ^ 0.467) / 60
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 3) = Format(TCS, "0.000")
i = i + 1
Wend
'Cálculo del tiempo de traslado
i = 1
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 1) <> ""
V = Cv * (Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 5)) * 100) ^ 0.5
TTS = (Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 4)) * 1000) / (V * 60 * 60)
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4) = Format(TTS, "0.0")
i = i + 1
Wend
'Cálculo del tiempo total de concentración
i = 1
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 1) <> ""
TTCS = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4)) + Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 3))
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 5) = Format(TTCS, "0.00")
i = i + 1
Wend
'Primera convolución(hidrograma)
F = 0.001
For t = 1 To 1000
i = 1
U = 0
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 1) <> ""
If (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4)) * 60) <= t Then
If t <= (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 5)) * 60) Then
US = ((Ac * Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 2))) / ((Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 5)) -
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4))) * 60 * 60)) * F
U = U + US
i = i + 1
Else
US = 0
U = U + US
i = i + 1
End If
Else
US = 0
U = U + US
End If
End For
U = U + US

```

```

i = i + 1
End If
Wend
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 6) = t
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 7) = Format(U, "0.0000")
Next
'Conteo de elementos del hidrograma unitario, hietograma e hidrograma de la tormenta
NDH1 = 0
For t = 1 To 700
    If Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 7)) = 0 Then
        NDH1 = NDH1 + 0
    Else
        NDH1 = NDH1 + 1
    End If
Next
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(1, 8) = NDH1
NDH2 = 0
i = 1
While Me.msfg2.TextMatrix(i, 1) <> ""
    If Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2)) = 0 Then
        NDH2 = NDH2 + 0
    Else
        NDH2 = NDH2 + 1
    End If
    i = i + 1
Wend
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(2, 8) = NDH2
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(3, 8) = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(1, 8)) +
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(2, 8)) - 1
frmCalculo.msfg4.Rows = 1000 + Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(3, 8))
'Segunda convolución(hidrograma)
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 1
    i = 1
    H = 0
    While frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2) <> ""
        If Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 1)) < t Then
            H = H + (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix((t - Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 1))), 7)) *
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2)))
        Else
            H = H + 0
        End If
        i = i + 1
    Wend
    frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 9) = Format(H, "0.0000")
Next
'Cálculo del volumen del hietograma e hidrograma de la tormenta
i = 1
While Me.msfg2.TextMatrix(i, 1) <> ""

```

```

VH = (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 2))) / 1000 * Ac
VH2 = VH2 + VH
i = i + 1
Wend
frmResultados.txtVhieto.Text = Format(VH2, "0.000")
For t = 1 To (Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2)
VHi = (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 9)) + Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t + 1, 9))) * 60 / 2
VHi2 = VHi2 + VHi
Next
E = 0
frmResultados.txtVhidro.Text = Format(VHi2, "0.000")
E = 100 - ((100 / Val(frmResultados.txtVhieto.Text)) * Val(frmResultados.txtVhidro.Text))
frmResultados.txtError.Text = Format(E, "0.00")
'Graficas
'Hietograma
'Valor máximo de y
i = 1
MAXhiet = Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 2))
While Me.msfg2.TextMatrix(i, 2) <> ""
If MAXhiet <= Val(Me.msfg2.TextMatrix(i + 1, 2)) Then
MAXhiet = Val(Me.msfg2.TextMatrix(i + 1, 2))
i = i + 1
Else
i = i + 1
End If
Wend
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(4, 8) = Format(MAXhiet, "0.00")
'Valor máximo del hidrograma
i = 1
MAXhidro = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 9))
For i = 1 To (Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2)
If MAXhidro <= Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 9)) Then
MAXhidro = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 9))
i = i + 1
Else
i = i + 1
End If
Next
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(5, 8) = Format(MAXhidro, "0.00")
'Numero de datos de la lluvia
Dhp = 0
i = 1
While Me.msfg2.TextMatrix(i, 1) <> ""
Dhp = Dhp + 1
i = i + 1
Wend
frmResultados.picHietograma.ScaleWidth = Dhp
frmResultados.picHietograma.ScaleTop = MAXhiet

```

```
frmResultados.picHietograma.ScaleHeight = -MAXhiet  
frmResultados.picHietograma.ScaleLeft = 0  
frmResultados.picHietograma.Refresh
```

```
Dx = Dhp / 9  
Dy = MAXhiet / 4  
Iblx = 0  
Ibly = 0  
frmResultados.IblHiet_0.Caption = Format(0, "0.00")  
frmResultados.picHietograma.DrawWidth = 1  
frmResultados.picHietograma.DrawStyle = 1
```

```
For i = 0 To 8  
    Iblx = Iblx + Dx  
    frmResultados.IblHiet_X(i) = Format(Iblx, "0")  
    frmResultados.picHietograma.Line (Iblx, 0)-(Iblx, MAXhiet), QBColor(7)  
Next
```

```
For i = 0 To 3  
    Ibly = Ibly + Dy  
    frmResultados.IblHiet_Y(i).Caption = Format(Ibly, "0.0")  
    frmResultados.picHietograma.Line (0, Ibly)-(Dhp, Ibly), QBColor(7)  
Next
```

```
'Grafica del hietograma  
frmResultados.picHietocolor.BackColor = QBColor(3)  
frmResultados.picftcolor.BackColor = QBColor(9)  
Ft = 0  
Dx = 0  
hp = 0  
For i = 1 To Dhp  
    If i = Dhp Then  
        hp = Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 2))  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, 0)-(Dx, hp), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, hp)-(Dx + 1, hp), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx + 1, hp)-(Dx + 1, 0), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, Ft)-(Dx + 1, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 1))), QBColor(9)  
    Else  
        frmResultados.picHietograma.Refresh  
        frmResultados.picHietograma.DrawWidth = 2  
        frmResultados.picHietograma.DrawStyle = 0  
        Ft = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 1))  
        hp = Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 2))  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, 0)-(Dx, hp), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, hp)-(Dx + 1, hp), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx + 1, hp)-(Dx + 1, 0), QBColor(3)  
        frmResultados.picHietograma.Line (Dx, Ft)-(Dx + 1, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 1))),  
        QBColor(9)
```

```

Dx = Dx + 1
End If
Next
'Calculo de SF para cada subcuenca
SF = 0
i = 1
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 9) <> ""
SF = 0.224 * Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 9)) * Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 10)) *
Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 11)) * Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 12))
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 10) = Format(SF, "0.00000")
i = i + 1
Wend
'Calculo de la intensidad de lluvia total
Ihp = 0
For t = 1 To Dhpc
Ihp = Val(Me.msfg2.TextMatrix(t, 2)) / (Val(Me.msfg2.TextMatrix(2, 1)) / 60)
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 11) = Format(Ihp, "0.00")
Next
'Calculo de la intensidad máxima
t = 1
IhpMAX = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 11))
For t = 1 To Dhpc
If IhpMAX <= Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t + 1, 11)) Then
IhpMAX = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t + 1, 11))
Else
End If
Next
'Calculo de R para cada subcuenca
R = 0
Ihp = 0
Racum = 0
Racum2 = 0
For t = 1 To Dhpc
If Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 2)) = 0 Then
Ihp = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 11))
If Ihp = 0 Then
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 12) = 0#
Else
Racum = ((1.213 + 0.89 * Log(Ihp) / Log(10)) * (Ihp * Val(Me.msfg2.TextMatrix(2, 1)) / 60)) *
IhpMAX / 173.6
Racum2 = Racum2 + Racum
End If
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 12) = 0#
Else
Ihp = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 11))
R = ((1.213 + 0.89 * Log(Ihp) / Log(10)) * (Ihp * Val(Me.msfg2.TextMatrix(2, 1)) / 60)) * IhpMAX /
173.6 + Racum2
Racum2 = 0

```



```

    frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 12) = Format(R, "0.00000")
End If
Next
'Primera convolución del sedimentograma
For t = 1 To 700
SU2 = 0
For i = 1 To Nc
If (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4)) * 60) <= t Then
    If t <= (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 5)) * 60) Then
        SU1 = ((Ac * Val(Me.msfg1.TextMatrix(i, 2))) / ((Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 5)) -
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 4))) * 60 * 60)) * Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 10))
        SU2 = SU2 + SU1
    Else
        SU1 = 0
        SU2 = SU2 + SU1
    End If
Else
    SU1 = 0
    SU2 = SU2 + SU1
End If
Next
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 13) = Format(SU2, "0.0000")
Next
'Calculo del SDR
If (Ac / (1000 ^ 2)) > 0.259 And (Ac / (1000 ^ 2)) < 25.9 Then
SDR = 51.28 * (Ac / (1000 ^ 2)) ^ -0.1753
Else
    If (Ac / (1000 ^ 2)) > 25.9 And (Ac / (1000 ^ 2)) < 259 Then
        SDR = 56.87 * (Ac / (1000 ^ 2)) ^ -0.2071
    Else
        If (Ac / (1000 ^ 2)) > 259 And (Ac / (1000 ^ 2)) < 2590 Then
            SDR = 84.12 * (Ac / (1000 ^ 2)) ^ -0.2775
        Else
            SDR = 84.12 * (Ac / (1000 ^ 2)) ^ -0.2775
        End If
    End If
End If
End If
'Segunda convolución del sedimentograma
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 1
SED = 0
    For i = 1 To Dhp
        If Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 1)) < t Then
            SED = SED + (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix((t - Val(Me.msfg2.TextMatrix(i, 1))), 13)) *
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 12))) * (SDR / 100)
        Else
            SED = SED + 0
        End If
    Next
Next

```

```

frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 14) = Format(SED, "0.0000")
Next
'Calculo de concentraciones
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 1
  If Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 9)) = 0 Then
    frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 15) = 0#
  Else
    C = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 14)) / Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 9))
    frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 15) = Format(C, "0.00")
  End If
Next
'Calculo de los máximos valores del sedimentograma y de concentraciones
i = 1
MAXsed = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 14))
For i = 1 To (Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2)
  If MAXsed <= Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 14)) Then
    MAXsed = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 14))
  Else
    End If
Next
i = 1
MAXconc = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15))
For i = 1 To (Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2)
  If MAXconc <= Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 15)) Then
    MAXconc = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 15))
  Else
    End If
Next
'Calculo del volumen de material sólido
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2
  VS = (Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 14)) + Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t + 1, 14))) * 60 / 2
  VS2 = VS2 + VS
Next
frmResultados.txtVGS.Text = Format(VS2, "0.000")
'Calculo de la concentración promedio
NDHT = 0
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2
  If Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 15)) = 0 Then
    NDHT = NDHT + 0
  Else
    NDHT = NDHT + 1
  End If
Next

Cp = 0
Cp2 = 0
For t = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 2
  Cp = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(t, 15))

```

```

Cp2 = Cp2 + Cp
Next
Cp = Cp2 / NDHT
frmResultados.txtCprom.Text = Format(Cp, "0.00")
'Cálculo del valor máximo para escalar la gráfica
MAX = MAXhidro
If MAX >= MAXsed And MAX >= MAXconc Then
MAX = MAXhidro
Else
  If MAXsed >= MAXconc Then
  MAX = MAXsed
  Else
  MAX = MAXconc
  End If
End If
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(1, 16) = Format(MAXhidro, "0.000")
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(2, 16) = Format(MAXsed, "0.000")
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(3, 16) = Format(MAXconc, "0.000")
frmCalculo.msfg4.TextMatrix(4, 16) = Format(MAX, "0.000")
'Gráfica del hidrograma y del sedimentograma
frmResultados.picGraficas.ScaleWidth = 1000
frmResultados.picGraficas.ScaleTop = MAX
frmResultados.picGraficas.ScaleHeight = -MAX
frmResultados.picGraficas.ScaleLeft = 0
frmResultados.picGraficas.Refresh

Dx = 1000 / 10
Dy = MAX / 5
IbIx = 0
Ibly = 0
frmResultados.IbIGraf_0.Caption = Format(0, "0.00")
frmResultados.picGraficas.DrawWidth = 1
frmResultados.picGraficas.DrawStyle = 1

For i = 0 To 9
  IbIx = IbIx + Dx
  frmResultados.IbIGraf_X(i) = Format(IbIx, "0")
  frmResultados.picGraficas.Line (IbIx, 0)-(IbIx, MAX), QBColor(7)
Next
For i = 0 To 4
  Ibly = Ibly + Dy
  frmResultados.IbIGraf_Y(i) = Format(Ibly, "0.0")
  frmResultados.picGraficas.Line (0, Ibly)-(1000, Ibly), QBColor(7)
Next
Dx = 0
frmResultados.picGLcolor.BackColor = QBColor(9)
frmResultados.picGScolor.BackColor = QBColor(6)
frmResultados.picCcolor.BackColor = QBColor(12)

```

```
For i = 1 To 1000
  If i = 1000 Then
    'Hidrograma
    frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 9)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 9))), QBColor(9)
    'Sedimentograma de gastos sólidos
    frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 14)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 14))), QBColor(6)
    'Sedimentograma de concentraciones
    'frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15))), QBColor(2)
    Else
    frmResultados.picGraficas.Refresh
    frmResultados.picGraficas.DrawWidth = 2
    frmResultados.picGraficas.DrawStyle = 0
    'Hidrograma
    frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 9)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 9))), QBColor(9)
    'Sedimentograma de gastos sólidos
    frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 14)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 14))), QBColor(6)
    'Sedimentograma de concentraciones
    'frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15)))-(Dx + 1,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + 1, 15))), QBColor(2)
    Dx = Dx + 1
    End If
  Next
  'Grafica espaciada de las concentraciones
  Dx = 0
  Dx2 = 50
  i = 0
  While i <= 1000
    If i = 1000 Then
      frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15)))-(Dx + Dx2,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15))), QBColor(12)
    Else
      frmResultados.picGraficas.Line (Dx, Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15)))-(Dx + Dx2,
Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i + Dx2, 15))), QBColor(12)
    End If
    i = i + Dx2
    Dx = Dx + Dx2
  Wend
  'reporte de resultados
  frmResultados.msfg5.TextMatrix(1, 1) = "t (min)"
  frmResultados.msfg5.TextMatrix(1, 2) = "H (m3/s)"
  frmResultados.msfg5.TextMatrix(1, 3) = "SGS (kg/s)"
  frmResultados.msfg5.TextMatrix(1, 4) = "SC(kg/m3)"
  For i = 1 To Val(frmCalculo.msfg4.Rows) - 5
```

```
frmResultados.msfg5.TextMatrix(i + 1, 1) = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 6))
frmResultados.msfg5.TextMatrix(i + 1, 2) = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 9))
frmResultados.msfg5.TextMatrix(i + 1, 3) = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 14))
frmResultados.msfg5.TextMatrix(i + 1, 4) = Val(frmCalculo.msfg4.TextMatrix(i, 15))
Next

frmResultados.Show
'frmCalculo.Show
End Sub

Private Sub cmdLeer_Click()
If Me.optCv(0) Or Me.optCv(1) Or Me.optCv(2) Or Me.optCv(3) Or Me.optCv(4) Or Me.optCv(5) Or
Me.optCv(6) Then

With cdg1
    .DialogTitle = "Seleccionar Archivo Excel para cargar"
    .Filter = "Archivos XLS|*.xls"
    .ShowOpen
    If .FileName = "" Then Exit Sub

        'envía el path del libro con el que se llena el FlexGrid
    Call Cargar_Excel_FlexGrid(.FileName)
    Me.Caption = .FileName
    Call Cargar2_Excel_FlexGrid(.FileName)
    Call Cargar3_Excel_FlexGrid(.FileName)
End With
Me.txtArea.Text = Me.msfg3.TextMatrix(1, 2)
Me.txtInfiltracion(0).Text = Me.msfg3.TextMatrix(2, 2)
Me.txtInfiltracion(1).Text = Me.msfg3.TextMatrix(3, 2)
Me.txtInfiltracion(2).Text = Me.msfg3.TextMatrix(4, 2)
Me.txtInfiltracion(3).Text = Me.msfg3.TextMatrix(5, 2)
'Estimación del número de subcuencas
i = 1
While Me.msfg1.TextMatrix(i, 1) <> ""
Nc = Nc + 1
i = i + 1
Wend
Me.txtSubc.Text = Nc
Me.cdmCalcular.Enabled = True

Else

MsgBox "No has seleccionado un Cv para el cálculo de los tiempos de la cuenca"

End If

End Sub
```

```
'Carga la hoja 1 del archivo Datos de Excel
Sub Cargar_Excel_FlexGrid(path_XLS As String, Optional La_Hoja As String = "hoja1")
On Local Error GoTo Errsub
    With datDatos
        .DatabaseName = path_XLS
        'Se asigna el RecorSurce el control Data
        .RecordSource = La_Hoja & "$"
        msfg1.Redraw = False
        .Refresh
        msfg1.Redraw = True
    End With
'Error
Exit Sub
Errsub:
    MsgBox Err.Description, vbCritical
End Sub
'Carga la hoja 2 del archivo Datos de Excel
Sub Cargar2_Excel_FlexGrid(path_XLS As String, Optional La_Hoja As String = "hoja2")
On Local Error GoTo Errsub
    With datDatos2
        .DatabaseName = path_XLS
        'Se asigna el RecorSurce el control Data
        .RecordSource = La_Hoja & "$"
        msfg2.Redraw = False
        .Refresh
        msfg2.Redraw = True
    End With
'Error
Exit Sub
Errsub:
    MsgBox Err.Description, vbCritical
End Sub
'Carga la hoja 3 del archivo Datos de Excel
Sub Cargar3_Excel_FlexGrid(path_XLS As String, Optional La_Hoja As String = "hoja3")
On Local Error GoTo Errsub
    With datDatos3
        .DatabaseName = path_XLS
        'Se asigna el RecorSurce el control Data
        .RecordSource = La_Hoja & "$"
        msfg3.Redraw = False
        .Refresh
        msfg3.Redraw = True
    End With
'Error
Exit Sub
Errsub:
    MsgBox Err.Description, vbCritical
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()  
End  
End Sub
```

```
Private Sub optCv_Click(Index As Integer)  
Select Case Index  
Case 0  
Cv = Val(Me.optCv(0).Caption)  
Case 1  
Cv = Val(Me.optCv(1).Caption)  
Case 2  
Cv = Val(Me.optCv(2).Caption)  
Case 3  
Cv = Val(Me.optCv(3).Caption)  
Case 4  
Cv = Val(Me.optCv(4).Caption)  
Case 5  
Cv = Val(Me.optCv(5).Caption)  
Case 6  
Cv = Val(Me.optCv(6).Caption)  
End Select  
End Sub
```

```
Private Sub txtArea_Change()  
Ac = Val(Me.txtArea.Text)  
End Sub
```

'Asignación de las variables de infiltración

```
Private Sub txtInfiltracion_Change(Index As Integer)  
Select Case Index  
Case 0  
Fc = Val(Me.txtInfiltracion(0).Text)  
Case 1  
F0 = Val(Me.txtInfiltracion(1).Text)  
Case 2  
k1 = Val(Me.txtInfiltracion(2).Text)  
Case 3  
t1 = Val(Me.txtInfiltracion(3).Text)  
End Select  
End Sub
```

## Referencias

1. Gracia Sánchez Jesús, 1995. *"Generation of Synthetic Sedimentgraphs"*. Hydrological processes, Vol. 10, México, 1181 - 1191.
2. Rijn, L.C. van, 2007. *"Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas"*. Rijkswaterstaat/RIKS, Aqua Publications, The Netherlands, 500 p. 2.1 - 2.20, 5.1 - 5.157
3. Maza Álvarez José Antonio y García Flores Manuel. *"Transporte de sedimentos"*. Capítulo 10 del manual de Ingeniería de Ríos. 531 p.
4. Wischmeier W. H. and Smith D.D., 1978. *"Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning"*. U. S. Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook No. 537. 58 p.
5. López Cadenas de Llano F. y Blanco Criado M., 1976. *"Hidrología Forestal"*. 1ª. Parte, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid. 160 p.
6. Sadegui S. H. R., Mizuyama T., Miyata S., Gomi T., Kosugi K., Fukushima T., Mizugaki S. y Onda Y., 2007. *"Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed"*. Geoderma 144, 198 - 211.
7. Tyagi J.V., Mishra S.K., Singh Ranvir y Singh V.P., 2008. *"SCS-CN based time-distributed sediment yield model"*. Journal of Hydrology, 352, 388 - 403.
8. Kisi Özgür, 2007. *"Development of streamflow - suspended sediment rating curve using a range dependent neural network"*. International Journal of Science and Tecnology, Volume 2, No. 1, 49 - 61.
9. Crawford G. Charles, 1991. *"Estimation of suspended - sediment rating curves and mean suspended - sediment loads"*. Amsterdam, Journal of Hydrology, 129, 331 - 348.
10. CHEN V.J. and KUO C.Y., 1985. *"A study on synthetic sedimentgraphs for ungaged watersheds"*. Amsterdam, Journal of Hydrology, 84, 35 -54.
11. Montt M. José Pedro, Rivera I. Pedro, Fernández L. Bonifacio y Valenzuela R. Rafael, 2001. *"Caracterización de la calidad de las aguas lluvias en Santiago"*. Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. P. Universidad Católica de Chile.
12. Asselman N.E.M., 2000. *"Fitting and interpretation of sediment rating curves"*. Journal of hydrology, 234, 228 - 248.
13. McCuen H. Richard, 1989. *"Hydrologyc analisis and design"*. Prentice - Hall International, United States. 867 p.
14. Kirkby M. J., 1980. *"Soil Erosion"*. John Wiley and Sons, British Geomorphological Research Group. 312 p.
15. Owens P. N. and Collins A. J., 2006. *"Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments"*. CABI North American Office, London, UK. 328 p.
16. Wilson E. M., 1969. *"Engineering Hydrology"*. Macmillan press, London. 232 p.



17. Haan C.T., Johnson H.P. y Brankensiek D.L., 1982. *"Hydrologic modeling of small watersheds"*. Joseph, michigan: American Society of Agricultural Engineers. 533 p.
18. Gracia Sánchez Jesús, 1989. *"Determinación de sedimentogramas en la presa El Caracol"*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF. 42 -45.
19. Gracia Sánchez Jesús, 2002. *"Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje"*. Series del Instituto de Ingeniería, CI - 26, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF. 64 -76. 272 p.