

## **CAPITULO 2**

---

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Cuenca Hidrográfica**

La cuenca hidrográfica, considerada como el territorio geográfico delimitado por una divisoria de aguas que está conformada por un sistema hídrico, presenta tres secciones bien definidas por las divisorias de aguas donde el nivel de actividad hidrológica es diferente, específicamente el impacto del agua, aunque mantienen una intrínseca interconexión e interacción, así:

- La zona alta o cabecera, donde se produce la mayor cantidad de precipitación, la temperatura es más baja que el resto de la cuenca y las acciones que se realicen aquí influirán en toda la cuenca, por ejemplo el riego. Su estabilización es nula y existe una alta producción de sedimentos líquidos y sólidos.
- La zona media, se comporta como zona de amortiguamiento entre las acciones de la cuenca alta y los efectos de la cuenca baja. En esta área se cumplen la mayor cantidad de actividades productivas ejerciendo presión hacia la parte alta. Su estabilización es baja produciendo más cantidades de sedimentos líquidos y sólidos.
- La zona baja o desembocadura, ubicada en tierras bajas, generalmente cerca de la costa, se caracteriza por presentar fenómenos de estiaje o inundación. En esta zona se expresa los impactos de las acciones que se realizan en la cuenca alta.

Las cuencas hidrográficas en su integridad, deben ser consideradas como unidades de planificación y gestión para el ordenamiento territorial y para el manejo de recursos naturales, ya que la disponibilidad de los recursos hídricos y edáficos no dependen de los límites políticos sino más bien dependen de la influencia de los tratamientos integrados de producción y protección regionales, según elementos sociales, económicos y, del grado de deterioro ambiental (Gaspari *et al.*, 2009).

Las actividades que realizan los habitantes en las diferentes partes de la cuenca, están íntimamente relacionadas debido al funcionamiento como un “sistema indivisible e interdependiente”, así por ejemplo cuando en la parte alta se tiene una cobertura forestal adecuada, ayuda a regular y controlar la cantidad de agua y sedimento (líquido y sólido) que escurren hacia las partes media y baja de la cuenca. Esto favorece a las poblaciones de la cuenca baja en calidad y cantidad de agua para consumo, así como también la ocurrencia de inundaciones y sequías (López y Delgado, 2009).

Para la presente tesis, se utilizará la herramienta HEC-GeoHMS, que trabaja bajo plataforma de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la delimitación de la cuenca y subcuencas, y para generar los valores de los parámetros morfométricos del relieve de la red hidrográfica.

## 2.2 Ciclo Hidrológico

El análisis hidrológico de una cuenca inicia con el conocimiento particular del movimiento del agua, conocido como “ciclo hidrológico” (Figura 3), de tal manera que permite organizar, ordenar y planificar la misma. Debido a ello, la caracterización del ciclo hidrológico crea un diagnóstico preliminar para todo estudio de esta unidad hidrológica.

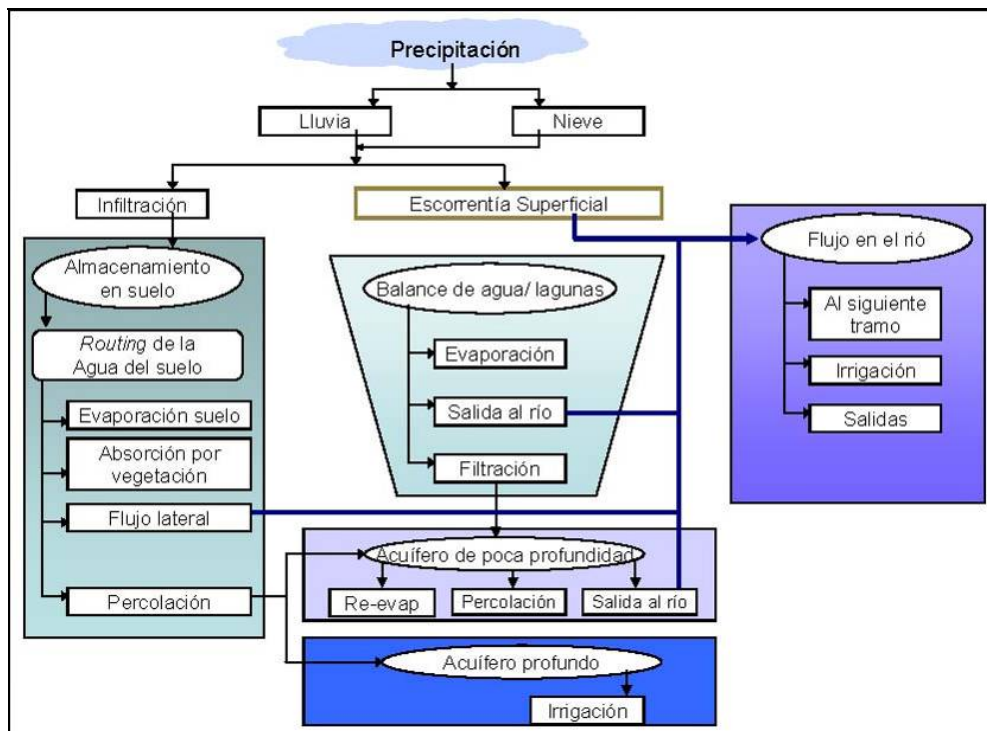


Figura 3. Esquema del ciclo hidrológico. Fuente: Neitsch et al., 2002. Modificado

El ciclo hidrológico es considerado como un ciclo compuesto por procesos continuos e interdependientes de transferencia y movimiento de agua entre la atmósfera, la tierra y los cuerpos de agua. Considerando el inicio del proceso en la precipitación, sea en forma de lluvia o nieve, una parte es interceptada por la vegetación, otra cae en los cuerpos de agua y otra va a la tierra, que dependiendo de las características físicas del suelo se infiltra o escurre superficialmente.

Durante el proceso de infiltración, una parte es retenida por el suelo cuya capacidad de almacenamiento depende de la porosidad del suelo. Una vez saturada la capacidad de almacenamiento, el agua ya no infiltra y se transforma en escorrentía superficial; otra parte se transforma en flujo subsuperficial y el resto percola alimentando los acuíferos profundos. El agua que se infiltra y percola tiene una continuidad horizontal convirtiéndose en escorrentía subsuperficial y subterránea cuyo destino final es un río o el mar. El escurrimiento superficial tiene como destino final un lago, una laguna o el mar.

La energía solar junto con los factores meteorológicos de temperatura, viento, radiación solar y humedad producen la evaporación en los cuerpos de agua y la evapotranspiración en las plantas y suelo. En ambos procesos se produce la pérdida de agua y la transformación del agua de estado líquido a gaseoso. El vapor de agua mientras sube a la atmósfera, pierde calor y se condensa alrededor de núcleos de condensación transformándose en pequeñas gotas de agua, las cuales se agrupan (nubes) y por su tamaño se precipitan a la tierra en forma de lluvia, granizo o nieve. El ciclo se repite sucesivamente.

### **2.3 Balance Hídrico**

El balance hídrico contabiliza las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escorrentía, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de aguas en el suelo. El conocimiento del balance hídrico permite determinar la duración y la magnitud a nivel macroclimático de los períodos con exceso o deficiencia de agua, y es de aplicación para definir la hidrología de una zona, realizar la clasificación climática de un área y para la planificación hidráulica.

El balance hídrico o balance de agua, es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios en un área determinada, o una cuenca, así como la interrelación entre ellos, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área, como lo representan López y Delgado (2009) en la Figura 4.

Al calcular el balance hídrico de un área o cuenca, el principal objetivo está en la determinación de las pérdidas totales de agua (o evapotranspiración): la evaporación de superficies de agua, suelo, nieve, hielo, y de cualquier otra superficie, más la transpiración. (Linsey *et al.*, 1993).

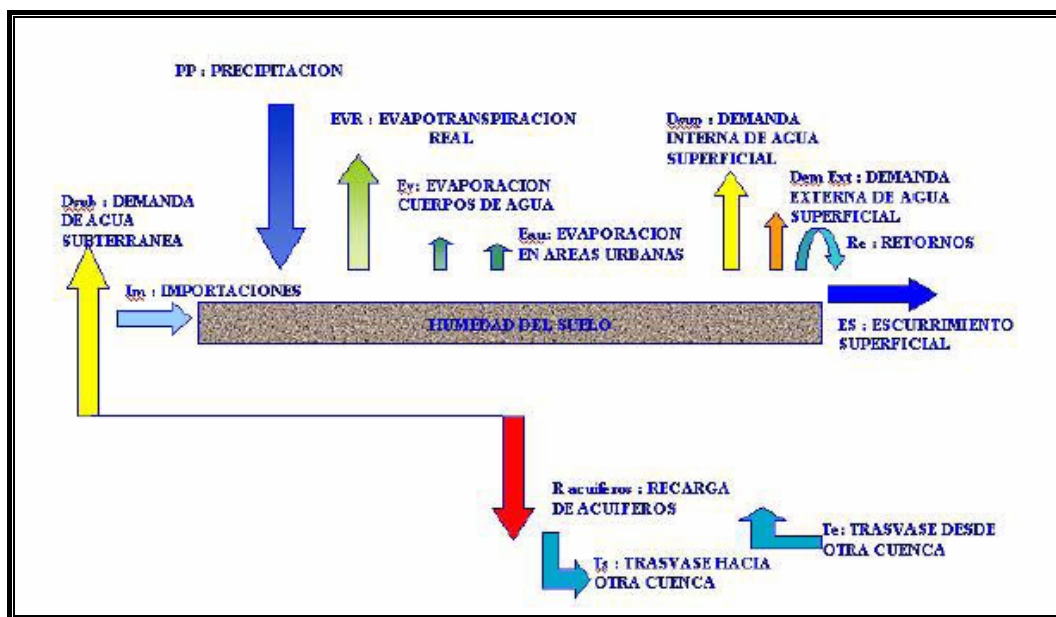


Figura 4. Balance Hídrico. Fuente: López y Delgado (2009)

El modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de continuidad la cual se fundamenta en la diferencia que se produce entre las entradas y las salidas de agua (Tabla 1), que se traducen en el agua que queda almacenada (Fórmula 1).

**ENTRADAS – SALIDAS = VARIACION DEL ALMACENAMIENTO**

Fórmula 1. Ecuación del Balance Hídrico.

Tabla 1. Factores del Balance Hídrico.

Entradas	Salidas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitaciones (lluvia, nieve, granizo)</li> <li>• Importaciones superficiales de otra cuenca</li> <li>• Retornos de la demanda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evapotranspiración</li> <li>• Escurrimiento superficial</li> <li>• Evaporación de cuerpos de agua y zonas urbanas</li> <li>• Demanda interna y externa en la cuenca</li> </ul>

La precipitación constituye la principal variable del proceso hidrológico para un sistema hídrico, ya que representa la entrada principal de agua al mismo. Resulta importante cuantificar la magnitud y la distribución de las precipitaciones a fin de obtener una respuesta realista del área de estudio. La dificultad e incertidumbre en su evaluación se considera a menudo como la una de las principales fuentes de error en las predicciones de un modelo hidrológico.

La precipitación incluye la lluvia y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo, nieve, entre otros. La medición se efectúa por medio de pluviómetros o pluviógrafos; los segundos son utilizados principalmente cuando se trata de determinar precipitaciones intensas de corto período y alta intensidad.

La determinación de los valores precipitados para cada una de las modalidades mencionadas se efectúa con instrumentos especiales estandarizados y registrándose los valores en horarios preestablecidos, con la finalidad de que los valores indicados para localidades diferentes sean científicamente comparables. La altura de precipitación se expresa generalmente en milímetros (mm) e indica la altura del agua de lluvia que cubriría la superficie del suelo en el área de influencia de una estación pluviométrica si pudiese mantenerse sobre la misma sin filtrarse ni evaporarse.

Evapotranspiración se denomina a la evaporación de agua desde el suelo y la transpiración vegetal. La evaporación del agua por las plantas se debe a la necesidad de agua que tienen las plantas para incorporarla a su estructura celular, además de utilizarla como elemento de transporte de alimentos y de eliminación de residuos. La circulación del agua en la planta no es un circuito cerrado, sino que por el contrario es una circulación abierta. El agua penetra por la raíz, circula por la planta y gran parte de ella se evapora por las hojas.

### **2.3.1 Método para el cálculo del Balance Hídrico**

Entre los varios métodos para el cálculo del Balance Hídrico, detallaremos el “método directo”, el cual se caracteriza porque el agua del suelo se va perdiendo mes a mes hasta llegar a terminar la reserva para poder cubrir las necesidades de agua (fenómeno de evapotranspiración). El modelo con la información de la temperatura media mensual y precipitación media mensual calcula mes a mes los siguientes parámetros (mm):

- (ETP) evapotranspiración potencial, que será calculada con el método de Thornthwaite, el cual se describe en la sección 2.3.2.
- (P-ETP) diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial, es el balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua del suelo. La diferencia clasifica los meses en secos si  $P-ETP < 0$  y húmedos si  $P-ETP > 0$ , según las entradas superen o no a las salidas potenciales.
- (R) reserva de suelo, cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas ( $P > ETP$ ) el agua sobrante pasará a ampliar la reserva del suelo, por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas ( $ETP > P$ ) se reducirá la reserva del suelo. Sin embargo, el suelo tiene una capacidad de retención de humedad en función de sus características físicas y cuando se alcanza la *capacidad máxima de retención*, el agua añadida en exceso escurrirá superficialmente o percolará en profundidad.

En el balance hídrico, la reserva del mes se calcula agregando los incrementos (P-ETP) cuando estos son positivos. Así la reserva en el mes “i” (función de la del mes anterior “i-1”) será según la situación de acuerdo a la Fórmula 2:

$$R_i = \begin{cases} R_{i-1} + (P_i - ETP_i) & \text{si } 0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i) < R_{\max} \\ R_{\max} & \text{si } R_{i-1} + (P_i - ETP_i) > R_{\max} \\ 0 & \text{si } 0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \end{cases}$$

Fórmula 2. Cálculo de la reserva del mes "i".

Los valores de la reserva se irán acumulando mes a mes en el período húmedo, según los incrementos  $P-ETP > 0$ , y disminuirán al llegar el período seco, decreciendo mes a mes según los valores mensuales  $P-ETP < 0$ . Así la reserva nunca tendrá un valor mayor que la reserva máxima ni será negativo.

Como se muestra en la Fórmula 2, se necesita conocer la reserva del mes anterior para comenzar el cálculo de la reserva actual, por tanto, se asigna un valor hipotético a un mes y se realizan los ciclos anuales de cálculos hasta que la hipótesis se confirme al final del ciclo. A los efectos del cálculo, se suele suponer que después del período seco la reserva del suelo es nula, en consecuencia se empieza el cálculo de "R" con el primer mes húmedo y se asigna al mes anterior una reserva nula. Si después de los cálculos, al final del período seco hubiera agua en el suelo, se deberá recalcular la reserva agregando la existente al final del período seco a las reservas del período húmedo. Si de nuevo se modificase la reserva del último mes seco se volvería a calcular otra vez la reserva.

En el caso de que todos los meses sean húmedos se utilizan los supuestos anteriores, considerando que la reserva es igual a la reserva máxima para todos los meses. Por el contrario, si todos los meses son secos la reserva será nula en todo los meses.

- (VR) variación de la reserva, es la diferencia entre la reserva del mes en el que se está realizando el cálculo y la reserva del mes anterior (Fórmula 3):

$$VR_i = R_i - R_{i-1}$$

Fórmula 3. Cálculo de la variación de la reserva

- (ETR) evapotranspiración real, es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar a la ETP (por tanto, la ETP es siempre mayor o igual a la ETR). El agua disponible para evaporarse será la que cae como precipitación en el mes considerado y la existente en la reserva del suelo. En el período húmedo, al cubrir la precipitación la demanda potencial la ETR es igual a la ETP (Fórmula 4):

$$ETR_i = ETP_i$$

Fórmula 4. Cálculo de la evapotranspiración real para el período húmedo

En el período seco, el agua que se evapora será el agua de precipitación más la que extraemos del suelo o variación de la reserva (la reserva menos la del mes anterior, como tendrá signo negativo se toma el valor absoluto) (Fórmula 5):

$$ETR_i = P_i + |VR_i|$$

Fórmula 5. Cálculo de la evapotranspiración real para el período seco

- Déficit o falta de agua, es el volumen de agua que falta para cubrir las necesidades potenciales de agua (para evaporar y transpirar). Por tanto el déficit es (Fórmula 6):

$$\text{Déficit} = ETP_i - ETR_i$$

Fórmula 6. Cálculo del déficit de agua.

- Excedentes o exceso de agua, es el agua que excede a la reserva máxima y que se habrá perdido por escorrentía superficial o percolación profunda. (Fórmula 7):

$$\begin{aligned} \text{Excedentes}_i &= [P_i - ETP_i - VR_i] && \text{si } (P_i - ETP_i) > 0 \\ \text{Excedentes}_i &= 0 && \text{si } (P_i - ETP_i) \leq 0 \end{aligned}$$

Fórmula 7. Cálculo de los excedentes.

Solo puede haber excesos si la precipitación ha compensado previamente la ETP, es decir, en los meses húmedos.

### 2.3.2 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial

Con objeto de valorar la capacidad máxima de evaporación y transpiración de un suelo, con determinadas condiciones atmosféricas y de radiación, se define el concepto de Evapotranspiración Potencial como la cantidad de agua transpirada por unidad de tiempo, teniendo el suelo un cultivo herbáceo uniforme de 30–50 cm. de altura y siempre con suficiente agua. En esas condiciones se produce el máximo de transpiración y coincide con las óptimas condiciones de crecimiento de las plantas.

Los cálculos de Thornthwaite (1984) están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media mensual, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días al mes.

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración es proporcional a la temperatura media afectada por un coeficiente exponencial "a", donde Monsalve (2000) propuso la Fórmula 8:

$$E_j = 16 * (10^{*t_j} / I)^a$$

Fórmula 8. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial según Thornthwaite sin ajustar

Donde:

$E_j$  = Evapotranspiración potencial mensual sin ajustar en mm

$t_j$  = Temperatura media mensual en °C

I = Índice de calor anual

$$I = \sum i_j ; j = 1, 2, \dots, 12$$

Fórmula 9. Cálculo del Índice de calor anual.

Se calcula a partir del índice de calor mensual  $i$ , como suma de los doce índices de calor mensuales:

$$i_j = (t_j / 5)^{1,514}$$

Fórmula 10. Cálculo del índice de calor mensual.

$a$  = Parámetro que se calcula en función de I, según la expresión:

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239$$

Fórmula 11. Cálculo del factor “a”.

Para el cálculo de la ETP de Thornthwaite de un mes determinado es necesario corregir la ETP sin ajustar “ $E_j$ ” mediante coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la ETP sin ajustar ( $E_j$ ) para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes) (Fórmula 12).

$$ETP_{tho} = E_j * L_i$$

Fórmula 12. Evapotranspiración potencial de Thornthwaite ajustada.

Donde:

$ETP_{th}$ : Evapotranspiración potencial de Thornthwaite (mm)

$E_j$ : Evapotranspiración mensual sin ajustar (mm)

$L_i$ : Factor de corrección del número de días del mes ( $N_{d_i}$ ) y la duración astronómica del día  $N_i$  (horas de sol).

$$L_i = N_{d_i} / 30 * N_i / 12$$

Fórmula 13. Cálculo del factor de corrección solar.

Para obtener la información del número de horas de sol,  $N_i$ , existen Tablas diseñadas específicamente para este tema en función de la latitud. En el anexo se presenta la Tabla usada para este análisis.



## **2.4 Estimación del Caudal Líquido**

### **2.4.1 Generalidades**

El caudal líquido de una cuenca hidrográfica está constituido por el escurrimiento, al cual se lo puede definir como *“el agua procedente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca”* (Aparicio, 1992)

Las primeras gotas de la precipitación son interceptadas y almacenadas por las plantas, luego de un tiempo estas gotas llegan a la superficie del suelo donde se infiltran a través de las capas de restos vegetales o se almacena en depresiones para continuar el proceso de percolación hacia las capas subterráneas. Durante este proceso el agua va tomando diferentes escurrimientos, así tenemos el escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

Montoya (2010) en sus apuntes de clase de Hidrología, realiza una explicación de los diferentes escurrimientos, estableciendo que el escurrimiento superficial es el producto del agua de la precipitación que no infiltra y que escurre sobre la superficie del suelo y red de drenaje hasta la salida de la cuenca. Considera que su efecto sobre el escurrimiento total es “directo” y solo existirá durante una tormenta o inmediatamente después que esta haya terminado. La parte de la lluvia que contribuye al escurrimiento superficial se llama “precipitación en exceso”.

El escurrimiento subsuperficial está constituido por la parte de la precipitación que infiltró en el suelo pero que se mueve horizontalmente sobre el horizonte superior del mismo, debido a un estrato impermeable paralelo a la superficie del suelo, que dependiendo de las características de este, el efecto puede ser rápido considerándolo como escurrimiento superficial, y si es lento se los considera escurrimiento subterráneo.

El escurrimiento subterráneo viene del agua subterránea o zona saturada la cual es recargada por el agua de la precipitación que se infiltra por el suelo una vez que esta se ha saturado. En ocasiones este escurrimiento puede llegar a un río el cual para un análisis de escurrimiento total se denomina escurrimiento “base”. Se considera que el escurrimiento total está compuesto por el escurrimiento directo y el escurrimiento base.

### **2.4.2 Factores que influyen en el escurrimiento**

Gaspari *et al.*, (2009), indica que el volumen total del escurrimiento y sus valores máximos están influenciados directa o indirectamente por factores de naturaleza climática, de naturaleza fisiográfica y de naturaleza humana. Los mismos se pueden caracterizar de la siguiente manera:

- a) Factores climáticos: relacionado con la intensidad y duración de las precipitaciones que determinan el volumen total de agua escurrida en la cuenca, cuanto mayor intensidad más rápido el suelo cumple el proceso de infiltración y el exceso de lluvia producirá escorrentía superficial. Las lluvias de baja intensidad y larga duración

saturan la capacidad de retención del suelo. También está relacionada con la precipitación antecedente, ya que estando el suelo húmedo debido a una lluvia anterior, es más rápido la generación de escorrentía.

- b) Factores fisiográficos: relacionados con las características físicas de la cuenca, que pueden ser, el área, la forma y pendiente media de la cuenca, permeabilidad, geología, tipo de suelo, labores de cultivo, densidad de drenaje, capacidad de evacuación, entre otros.
- c) Factores humanos: relacionado con las actividades humanas, por ejemplo obras hidráulicas construidas dentro de la cuenca como represas que al acumular agua reduce los caudales máximo de escorrentía superficial; la rectificación de un río que puede aumentar la velocidad de la escorrentía superficial en el tramo rectificado.

### **2.4.3 Variables que caracterizan el escurrimiento**

- a) Caudal.- es el volumen de la escorrentía superficial por unidad de tiempo, se lo representa con la letra Q. Se expresa en  $m^3/seg$  o  $l/seg$ .

Caudal específico (q), se define como el caudal Q dividido por el área A de la cuenca. Se expresa en  $m^3/seg/km^2$  o  $l/seg/km^2$

Caudales máximos, medios y mínimos, es necesario conocer estos datos para realizar diferentes análisis de manejo, se miden en intervalos de tiempo determinados, como hora, día, mes y año.

- b) Coeficiente de escorrentía.- es la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitada en un período de tiempo específico. Se lo representa con la letra c.
- c) Tiempo de concentración.- es el tiempo que tarda en llegar al punto de aforo la última gota de lluvia que cae en el punto más lejano de la cuenca. Se mide en minutos u horas. Se expresa  $t_c$
- d) Período de retorno.- es el período de tiempo promedio en años en que un determinado evento vuelve a ocurrir. Se expresa con la letra T.
- e) Nivel.- es la altura que alcanza el nivel del río en relación a un nivel de referencia. Se mide en metros o centímetros y se representa con la letra h.

## **2.5 Modelos Hidrológicos**

Con el desarrollo de la tecnología, en la actualidad, el conjunto computadora-programa facilita simular un sin número de fenómenos y acontecimientos físicos o naturales. Para nuestro caso de estudio, permitirá reproducir todos los procesos que conforman el ciclo hidrológico, proporcionando de esta manera al investigador un modelo que permita simular

diferentes situaciones para determinar el grado de impacto sobre uno o varios de los procesos que conforman este ciclo, además de su bajo costo y la estimación razonable de sus resultados, aún cuando la cantidad de información no sea periódica y directa.

*“Un modelo es una representación simplificada de un sistema, por lo cual debe necesariamente desprestigiar variables del sistema real en función del objetivo para el cual, fue o será creado. Un modelo está compuesto por variables o elementos interrelacionados en un intervalo de tiempo, que actúan (procesos) sobre una entrada (materia, energía o información) de manera controlada bajo ciertas restricciones para producir una salida (materia, energía o información)”* (Gaspari et al., 2009).

Los modelos en general se dividen en tres categorías:

- 1.- Modelos físicos: representan el sistema real en una determinada escala.
- 2.- Modelos analógicos: analizan un sistema a partir de otro regido por leyes similares.
- 3.- *Modelos matemáticos*: el sistema se representa por *ecuaciones matemáticas* y sentencias lógicas que expresan las relaciones entre variables y parámetros.

La mayoría de los modelos utilizados en hidrología corresponden a los modelos matemáticos para lo cual requieren el uso de computadoras. Se dividen en dos grandes grupos:

- 1.- Modelos Determinísticos: cuando se tiene conocimiento suficiente sobre el fenómeno para poder describir su comportamiento por medio de una función matemática, se considera exacta y explica toda su variabilidad.
- 2.- Modelos Estocásticos: las variables son regidas por leyes del azar, por tanto la respuesta se obtiene en términos de probabilidad. Necesita la existencia de datos que permiten caracterizar las variables.

Los modelos de tipo determinísticos serán utilizados en este trabajo debido al alcance temporal y espacial, que respectivamente se clasifican en:

- 1.- Modelos Continuos: se caracterizan porque están enfocados hacia la estimación a corto y mediano plazo a partir de datos observados que pueden incluirse predicciones meteorológicas como datos de entrada. Un ejemplo de este es el modelo SWAT.
- 2.- Modelos Agregados: el alcance espacial de este tipo de modelos se limita a un punto, considera a las cuencas y subcuencas como unidades de trabajo, cada unidad es tratada como un promedio ponderado de la superficie real. Un ejemplo es el modelo HEC-HMS ®.

Los modelos hidrológicos de simulación son un instrumento de predicción basado en procesos de hidrología y erosión. Estos modelos son herramientas valiosas para evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre ambiente, escurrimiento, producción de sedimentos, erosión y productividad. La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la

predicción de fenómenos a largo plazo instantáneamente, también permite obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Torres-Benites *et al.*, 2004).

Debido a que los modelos hidrológicos son una representación simplificada e incompleta de la realidad, es importante a la hora de elegir un modelo considerar el objetivo para el que fue creado, la exactitud de la respuesta, las rutinas y subrutinas que los componen y las variables de entrada que utiliza, estas últimas son las más difíciles debido a la disponibilidad de datos, al costo y tiempo que lleva hacer el levantamiento (Gaspari *et al.*, 2009).

La mayor limitante de los modelos hidrológicos está representada por las técnicas de medición de los fenómenos del mundo real, para lo cual se diseñaron modelos de simulación de diferentes tipos los cuales proveen métodos de extrapolación cuantitativa o de predicción, permitiendo simular situaciones de un sistema hidrológico real cuando los datos son insuficientes.

## **2.5.1 Modelo Hidrológico HEC-HMS®**

### 2.5.1.1 Generalidades

El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Corps of Engineers) diseñó el *modelo computacional HEC-HMS® (Hydrological Engineers Center-Hydrologic Modeling System)* para simular procesos de precipitación-escurrimiento en cuencas con drenaje dendrítico, mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sean concentrados o distribuidos para tener como respuesta el tránsito de caudales. Esta característica del modelo permite flexibilidad combinando diferentes métodos de cálculo para cada parámetro que se desea obtener, logrando una mejor aproximación al sistema real.

El programa tiene una interfaz gráfica que facilita al usuario la visualización de la aplicación de la cuenca de estudio, introducir datos, añadir componentes y observar los resultados, además la posibilidad de conectarse a un Sistema de Información Geográfica.

El HEC-HMS® es utilizado para obtener, por medio de simulación, el escurrimiento de una cuenca hidrográfica. Para ello, el programa requiere la especificación de los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada, para crear corridas de precipitación o de la proporción de flujo. Los resultados de la simulación se pueden visualizar en pantalla, generar tablas de toda la información obtenida o por elementos que incluyen datos sobre el flujo máximo y el volumen total e imprimir.

Su aplicación es muy amplia, cuyos hidrogramas generados pueden ser utilizados directamente o con otros programas para el estudio de disponibilidad de agua, problemas relacionados a inundaciones, cálculo de drenaje urbano, pronósticos de flujo, impacto de futuras urbanizaciones, diseño de aliviaderos para represas, predicción de inundaciones, reducción de daños por inundaciones, entre otras. Su obtención es gratuita y se encuentra disponible en Internet en la dirección <http://www.hec.usace.army.mil/software/HEC-HMS/download.html>.

El programa utiliza cuatro procesos de simulación hidrológica (Silva *et al.*, 2005), que se describen a continuación:

- Las *pérdidas* por infiltración (Loss method). Separación de la lluvia neta, permite calcular que parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa. Pueden ser simuladas mediante diferentes métodos, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos de volumen de escurrimiento.

MODELO	CARACTERIZACIÓN
Inicial y de tasa constante	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Número de curva SCS (CN)	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
CN de malla SCS CN	Evento, distribuido, empírico, ajuste de parámetros
Green and Ampt	Evento, distribuido, empírico, ajuste de parámetros
Tasa constante y déficit	Continuo, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Contabilización de humedad del suelo (SMA)	Continuo, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
SMA de malla	Continuo, distribuido, empírico, ajuste de parámetros

- Las *transformaciones* (Transform method). Calcula la escorrentía directa producida por la lluvia neta. Utiliza varios métodos: Hidrogramas Unitario, incluye Clark, Zinder y SCS, así como incluir su propio Hidrograma Unitario, en la Tabla 3, se muestran algunos.

Tabla 3. Modelos de escurrimiento directo

MODELO	CARACTERIZACIÓN
Hidrograma unitario especificado por el usuario (HU)	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Hidrograma unitario de Clark	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Hidrograma unitario de Snyder	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Hidrograma unitario SCS	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
ModClark	Evento, distribuido, empírico, ajuste de parámetros
Onda cinemática	Continuo, concentrado, empírico, ajuste de parámetros

- El *Caudal Base* (Baseflow method). *Suma a la escorrentía directa la escorrentía base*, en la Tabla 4, se presentan los métodos.

Tabla 4. Modelos de Flujo Base.

MODELO	CARACTERIZACIÓN
Mensual constante	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Recepción exponencial	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Reservorio lineal	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros

- El *tránsito* en canales (Routing). Calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o a través de un embalse. Incluye los métodos de Lag, Muskingum, Muskingum-Cunge, Onda Cinemática, entre otros, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos de tránsito de caudales.

MODELO	CARACTERIZACIÓN
Onda cinemática	Evento, concentrado, conceptual, parámetro medido
Tiempo de retardo	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Plus modificado	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Muskingum	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Muskingum – Cunge. Sección estándar	Evento, concentrado, cuasi - conceptual, parámetro medido
Muskingum – Cunge. Sección de 8 puntos	Evento, concentrado, cuasi - conceptual, parámetro medido
Confluencia	Continuo, conceptual, parámetro medido
bifurcación	Continuo, conceptual, parámetro medido

El modelo, de acuerdo a los datos ingresados, identifica las subcuencas en las cuales ejecuta los análisis de las tres primeras fases indicadas. Posteriormente, suma todos los escurrimientos generados y transitados y genera el hidrograma de salida de la cuenca.

#### 2.5.1.2 Funcionamiento del Modelo

El programa tiene una interfaz gráfica que permite introducir la información necesaria para la simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico y obtener respuestas en formato de gráfico o tablas.

Para definir la estructura de las subcuencas, el programa dispone de los siguientes elementos hidrológicos:

- a) Subcuencas (subbasins)
- b) Cauces o tramos de tránsito (reach)
- c) Uniones o confluencias (junctions)

- d) Embalses o almacenamientos (reservoirs)
- e) Fuentes (sources)
- f) Sumideros o salidas (sinks)
- g) Derivaciones o tomas (diversions)

Los cálculos son realizados en una secuencia aguas abajo desde el punto más elevado, desde las subcuencas que conforman las cabeceras aguas arriba hasta el punto de salida de todo el caudal aguas abajo.

El programa funciona con tres modelos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación hidrológica de la cuenca en estudio:

### ***Modelo de Cuenca***

Representa a la cuenca física, se encuentran los parámetros de los elementos hidrológicos indicados anteriormente, el usuario manipula este modelo añadiendo y conectando elementos para simular el proceso de escorrentía

### ***Modelo Meteorológico***

Consiste en calcular la entrada de precipitación requerida por un elemento, se pueden introducir los datos de precipitación del evento a simular y puede modelar lluvia congelada o líquida junto con evaporación. Dentro de este modelo ingresamos los datos de los pluviógrafos que se van a utilizar y se asigna a cada subcuenca.

### ***Modelo de Control***

Se define el lapso de tiempo de la simulación, es decir, se especifica la fecha y hora de inicio y termino de la precipitación, con un intervalo de tiempo que puede variar según nuestra necesidad.

### **Datos de Entrada**

Los datos de entrada al modelo está relacionada con los métodos de cálculo que se van a operar. Así tenemos que son cinco grupos básicos de información que debe proveerse al modelo para realizar las simulaciones:

1. Precipitación histórica o de diseño.
2. Características del suelo.
3. Información morfométrica de las subcuencas.
4. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
5. Características hidráulicas de los tramos de canal y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

Para calibrar, validar y realizar el análisis de sensibilidad del modelo, además se necesitan:

1. Registros concordantes de precipitación y caudales de salida (hietogramas e hidrogramas).
2. Determinación de las condiciones iniciales de humedad en los suelos.

En la Figura 5 se representa la forma como el programa HEC-HMS® genera el escurrimiento.

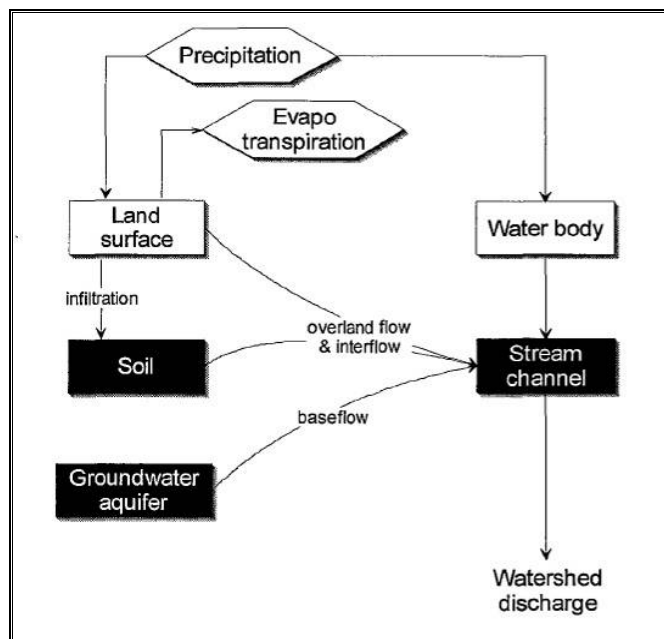


Figura 1. Representación del escurrimiento según HEC-HMS®. Según Feldman (2000)

## 2.6 Estimación del caudal sólido. Erosión hídrica superficial

Se entiende por erosión hídrica al proceso de disgregación y transporte de las partículas de suelo por la acción del agua. El proceso se inicia cuando las gotas de lluvia se precipitan sobre el suelo con suficiente energía para remover sus partículas siendo liberadas y transportadas por la escorrentía superficial hacia los flujos de drenaje. El proceso termina cuando los materiales transportados por las corrientes son acumulados en áreas de sedimentación impidiendo el flujo de las partículas de sedimentos previamente incorporadas al mismo (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990) (Michelena Roberto, 2011)

En la erosión hídrica deben distinguirse dos componentes:

- Acción de las precipitaciones.- cuando la gota de lluvia cae sobre el suelo desnudo golpea la superficie del suelo con tanto poder que produce la disgregación de los agregados del suelo y separación de las partículas individuales, proyectándolas al aire. Este efecto es conocido como “erosión por salpicadura”. Mientras mayor intensidad de la lluvia mayor su efecto erosivo.



- Acción del escurrimiento.- esta acción presenta dos componentes: disgrega los elementos terrosos y al mismo tiempo transporta aquellas partículas que por su tamaño y forma son susceptibles al arrastre. Si a esta acción de disgregación le sumamos la acción de las precipitaciones más los diferentes procesos de meteorización, tendremos como resultado la primera fase de la erosión o formación de elementos susceptibles de ser arrastrados. El grado y longitud de la pendiente son muy importantes en la generación del escurrimiento.

La acción del escurrimiento superficial depende del régimen de las lluvias y de las características hidrológicas del suelo (capacidad de infiltración) ya que la precipitación que llega al suelo puede evaporarse, infiltrarse o quedar en almacenamientos superficiales para posteriormente ponerse en movimiento.

### **2.6.1 Factores físicos determinantes en la erosión hídrica**

Gaspari *et al.*, (2009), describen los factores físicos que condicionan el proceso de erosión hídrica, agrupándolos en 4 categorías principales:

#### 1.- Factores climáticos

Las precipitaciones, que al ser consideradas en el espacio y tiempo, se establecen como unidad natural el aguacero. La intensidad, duración y frecuencia son las características más importantes en la erosión.

La temperatura, influye en forma directa sobre la vida, las temperaturas altas descomponen rápidamente la materia orgánica, haciendo que el suelo pierda la capacidad de absorción de agua, resultando un mayor escurrimiento.

#### 2.- Factores edáficos.-

El suelo, los factores como la textura, la agregación del suelo, la distribución de las partículas, la permeabilidad del perfil, la humedad inicial del suelo y la pedregosidad superficial son importantes en la erodabilidad del suelo. Los suelos con estructuras bien desarrolladas, estables y son más resistentes a la erosión, absorbiendo las lluvias más rápidamente y reduciendo la magnitud de la acción del escurrimiento.

#### 3.- Factores topográficos.-

El grado de inclinación del suelo, tiene marcada influencia en la magnitud de la erosión debido a que las pérdidas de suelo son mucho mayores en los terrenos de pendientes pronunciadas. La erosión hídrica no se produce en zonas llanas. La longitud de la pendiente, toma importancia, teniendo en cuenta que la velocidad del escurrimiento responde a un movimiento uniformemente acelerado.

La orientación de las laderas, bajo algunas condiciones climáticas, y especialmente cuando las pendientes superan el 3%, existe una relación entre la magnitud de la erosión y la orientación del terreno. Las laderas con orientación al sur están expuestas a menor radiación solar, como consecuencia de ello el suelo posee un

mayor contenido de humedad provocando más escurrimiento que una ladera con exposición norte.

#### 4.- Cobertura vegetal.-

La parte superior de la cubierta vegetal intercepta la lluvia protegiendo al suelo del impacto directo de las gotas de lluvia, gracias al efecto de amortiguamiento de las gotas disminuyendo su energía cinética inicial. (Michelena Roberto, 2011)

La vegetación contribuye a la disminución de la escorrentía superficial y a decrecer los caudales máximos de avenidas, debido a que aumenta la permeabilidad del suelo incrementando la infiltración, y también disminuye la velocidad de la lámina de escurrido. Este último aspecto considera que la velocidad de agua en una ladera, cubierta de vegetación densa es del orden de la cuarta parte de la velocidad que existiría en esa misma ladera pero con suelo desnudo. (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Las raíces de las plantas protegen el suelo y mejoran su estructura, la infiltración y la capacidad de retención de agua, además de retardar el escurrimiento. La cubierta vegetal también influye en los efectos del sol y el viento sobre la superficie del suelo.

### **2.6.2 Formas de erosión**

Existen dos formas generales de erosión causadas por la acción del agua sobre el suelo: erosión superficial y movimientos en masa. En la Figura 6 se presenta un cuadro sinóptico de las formas de erosión según Gaspari *et al.*, (2009).

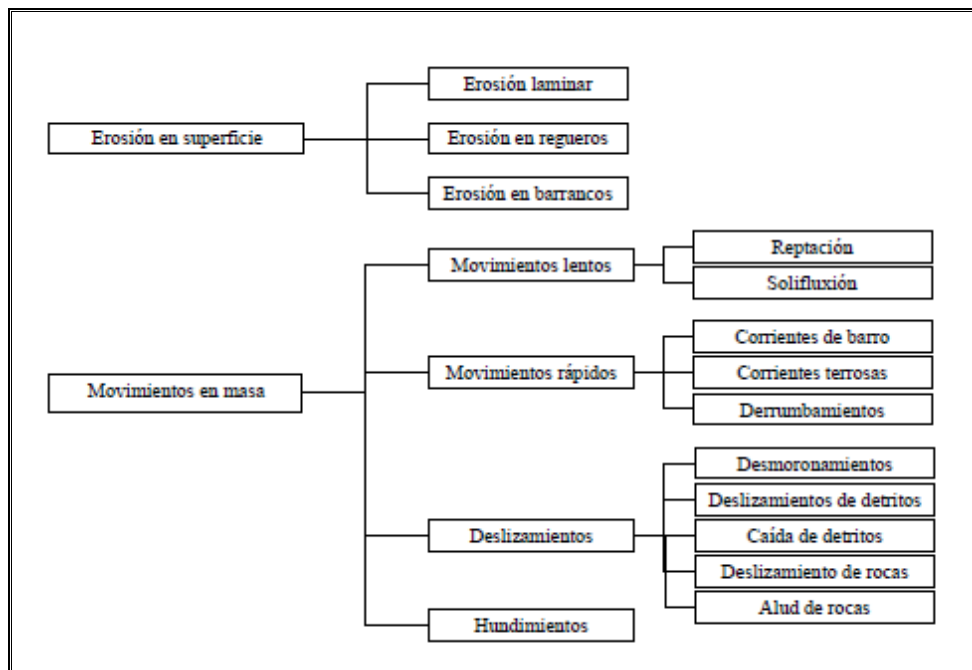


Figura 2. Cuadro sinóptico de los tipos de erosión hídrica.

A continuación se describe las principales formas de erosión en superficie:

1. Erosión Laminar

Es aquella en la que se presenta la remoción de delgadas capas de suelo extendidas más o menos uniformemente en toda la superficie. Se la considera como altamente perjudicial debido a las grandes cantidades de sedimentos que aporta a los cursos de agua, además afecta a las partículas más finas del suelo reduciendo la fertilidad de la tierra. Su presencia se manifiesta a través de los siguientes síntomas: plantas con sistema radical al descubierto, presencia de montículos en el suelo, pedregosidad e invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados, pérdida total o parcial del horizonte superior y afloramiento del subsuelo.

2. Erosión digital o pequeños surcos

Se forman pequeños surcos de menos de 20-30 cm de profundidad, producidos por el escurrimiento concentrado del agua, en pendientes suaves del terreno.

Su formación se encuentra asociada a las irregularidades y desnivel del terreno siendo favorecida por las lluvias de gran intensidad, lo que facilita identificarlas rápidamente permitiendo la implementación de medidas correctivas oportunamente.

3. Erosión en cárcavas.

Son profundas incisiones en el terreno originadas, generalmente, cuando existe una gran concentración de escurrimiento en una zona determinada. Su formación suele

estar precedida de fuertes erosiones laminares y en regueros que no fueron corregidas a tiempo, sin embargo pueden surgir también como producto de un solo evento pluvial de características torrenciales sobre suelos inestables. Sus perfiles pueden tener formas de U o V, dependiendo de la consistencia que presenta el perfil del suelo y la distribución de sus horizontes. Se originan en pendientes fuertes y largas.

### **2.6.3 Método de estimación del caudal sólido**

El fenómeno erosivo, según sea en superficie o por movimientos en masa, tiene diferentes mecanismos que lo originan y que se diferencian básicamente en sus variadas formas de manifestarse en cada caso. Sea la forma en la que se presente la erosión, lo común es que, tanto se produzca en el área de la cuenca vertiente, como se manifieste en los márgenes y lecho de los cauces efluentes, siempre será origen del caudal sólido arrastrado por las avenidas o por las simples corrientes que drenan por la cuenca.

Dentro de los fenómenos de erosión superficial en la cuenca vertiente, se destacan por su importancia y objeto del presente trabajo de investigación, la erosión laminar y digital, para los cuales se han desarrollado diferentes métodos de estimación del caudal sólido basados en la utilización de parámetros factoriales que intervienen en el proceso. Uno de esos métodos y que será aplicado en este trabajo, es el modelo paramétrico U.S.L.E. o Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (por sus siglas en ingles).

#### 2.6.3.1 Modelo U.S.L.E.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E.) por erosión laminar, que establecieron W.H. Wischmeier y D.D Smith en 1965, es el resultado de más de cuarenta años de investigaciones y experiencias sobre los parámetros que en ella intervienen, en base a los datos proporcionados por más de 10.000 parcelas año, repartidas por las principales áreas agrícolas de los Estados Unidos, contribuyendo a una mayor precisión su determinación y en consecuencia mejor definición del modelo (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Este modelo matemático de origen empírico, permite estimar la pérdida promedio anual del suelo en tierras agrícolas (tasa de erosión hídrica en Megagramos por hectárea de superficie durante un año) para diferentes sistemas de uso y manejo de unidades de suelos y poder compararla con las tasas de tolerancia aceptables de erosión para ese suelo, si la tasa de erosión es superior a la tasa aceptable, el sistema agropecuario no es sustentable y por lo tanto se debe mejorar algún manejo que permita un control adecuado de la erosión.

La expresión para el cálculo del modelo U.S.L.E. se la representa en la Fórmula 14:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Fórmula 14. Expresión matemática para determinar la pérdida de suelo según U.S.L.E.

Donde:

A: Pérdida de suelo promedio anual (Mg.ha/año)

R: Factor de erosión pluvial o de erosionabilidad de la lluvia (MJ.mm/ha.hr.año)

K: Factor de erodabilidad del suelo (Mg.ha.hr/ha.MJ.mm)

LS: Factor topográfico; L: factor longitud de pendiente, S: factor gradiente de pendiente.

C: Factor de ordenación de cultivos

P: Factor de prácticas de conservación de suelos

Nota: los cuatro últimos factores son adimensionales (L, S, C, P)

El producto de estas seis variables estima la erosión hídrica actual para una situación determinada de precipitación, tipo de suelo, topografía del suelo y manejo del suelo.

Mintegui Aguirre y López Unzú (1990), López Cadena De Llano (1998) y Gaspari *et al.*, (2009), describen a cada factor de la siguiente manera:

#### **R: Factor de erosión pluvial o de erosionabilidad de la lluvia.**

Representa la potencia del aguacero para erosionar superficialmente el suelo, se lo considera también un índice de su torrencialidad. Se lo obtiene a partir de tablas de intensidad de lluvia (mm/hr) y la energía cinética por unidad de lluvia (J.m<sup>2</sup>/cm) o puede calcularse a partir de los datos de intensidad del aguacero a intervalos fijos y la intensidad de la lluvia durante el aguacero.

Este factor es el producto de la energía cinética del aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido para 100, siendo su forma de cálculo como se expresa en la Fórmula 15.

$$R = \frac{EC \cdot I_{30}}{100}$$

Fórmula 15. Para cálculo del factor pluvial

Donde:

EC: Energía cinética

I<sub>30</sub>: Máxima intensidad en 30 minutos

También se puede calcular con la expresión de la Fórmula 16.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log D) \cdot (I \cdot T) \cdot I_{30}}{100}$$

Fórmula 16. Para cálculo del factor pluvial

Siendo:

T: Período de tiempo, en horas, para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I: Intensidad del aguacero en los intervalos citados, en cm/hr.

I<sub>30</sub>: Intensidad máxima en 30 minutos durante el aguacero, en cm/hr.

### **K: Factor de erodabilidad del suelo.**

Representa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la estabilidad estructural del mismo; se calcula a partir del porcentaje de las distintas fracciones granulométricas, el porcentaje de materia orgánica, la estructura y la permeabilidad del perfil del suelo. La expresión matemática para el cálculo del factor K se presenta en la Fórmula 17.

$$100 * K = 10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12-a) + 4,20 (b-2) + 3,23 (c-3)$$

Fórmula 17. Para cálculo del factor erodabilidad del suelo

Donde:

M: (% limo + % arena muy fina)\*(100 - %arcilla), también se puede expresar como:  
(% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) \* (%partículas entre 0,002 – 2,0 mm)

a: (% carbono \* 1,724) representa el % de materia orgánica

b: Indica la estructura del suelo:

1. Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo medio (1 – 2 mm)
3. Gránulo medio, grumo medio (2 – 5 mm) y gránulo grueso (5 – 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático columnar y muy grueso (>10 mm)

c: Clase de permeabilidad del perfil del suelo según Soil Survey Manual del U.S.D.A.

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápido
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy lenta

Nota: Este factor se puede estimar a partir de las curvas de conductividad hidráulica del suelo.

Con el fin de simplificar la Fórmula 17 se desprecian los factores b y c, obteniendo un K simplificado que se presenta en la Fórmula 18.

$$100 * K = 10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12-a)$$

Fórmula 18. Para cálculo del factor erodabilidad del suelo simplificado.

Para el cálculo del factor K, resulta imprescindible determinar en las muestras de suelo, los análisis de granulometría para la estimación del factor M y el contenido de materia orgánica para definir el valor de a. Con esta información se puede obtener el valor de K como una primera aproximación aplicando la fórmula simplificada 18.

### **LS: Factor topográfico.**

Está compuesto por la longitud de la pendiente (L) y el gradiente de la pendiente (S). Son valores adimensionales y teóricamente representan:

L, longitud de la pendiente, es la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo obtenidas en un campo de longitud de pendiente uniforme y dimensión variable, y el valor medio de las pérdidas correspondientes a una parcela de longitud de pendiente uniforme de 22,1 m, para un mismo tipo de aguacero, suelo y pendiente. En la práctica, la longitud de la pendiente L, es la distancia entre el punto más alto de caída de la gota de lluvia (origen de la escorrentía superficial) y el punto donde la pendiente disminuye hasta dar comienzo a la deposición de los sedimentos, o hasta el punto donde el escurrimiento entra a formar parte de un canal perfectamente definido.

S, gradiente de la pendiente, es la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo en un campo de pendiente cualquiera, con el que se obtendría en una parcela de 9% de pendiente uniforme, para las mismas condiciones en los restantes factores de lluvia, suelo y longitud de pendiente.

El factor topográfico (LS) como tal solo puede establecerse para laderas y su expresión, después de varias correcciones, quedo establecida en 1982, como se muestra en las Fórmulas 19 y 20:

$$LS = (\lambda / 22,1)^{0,3} * (0,43 + 0,3s + 0,043s^2 / 6,613)^{1,3}$$

Fórmula 19. Para cálculo del factor LS con pendientes menores al 9%.

$$LS = (\lambda / 22,1)^{0,3} * (s / 9)^{1,3}$$

Fórmula 20. Para cálculo del factor LS con pendientes iguales o mayores al 9%.

Siendo:  $\lambda$ : Longitud de ladera (m); y se calcula a partir de la ecuación presentada en la Fórmula 21.

s: Pendiente media de ladera

$$\lambda = 0,5 * DA / LCH$$

Fórmula 21. Longitud de la ladera

Donde:

DA = Área de la cuenca (m<sup>2</sup>)

LCH = Longitud total de los cursos que drenan por la cuenca (m).

Estas ecuaciones son estrictamente aplicables en el caso de laderas de pendiente uniforme con un mismo tipo suelo y vegetación en toda su longitud, debiendo utilizarse factores correctores, para el caso en que a lo largo del recorrido de la lámina de escurrimiento se produzcan cambios sensibles de pendiente o de alguno de los otros factores.

Con la ecuación presentada en la Fórmula 22 se obtiene el valor de la pendiente media de una subcuenca  $s_i$ .

$$s_i = [H * (LC_j + LC_{j+1}) / (2 * DA_i)] * 100$$

Fórmula 22. Pendiente media por subcuenca  $s_i$  en %

Siendo:

$s_i$ : Porcentaje medio de la pendiente para el área  $i$  entre los contornos  $j$  y  $(j+1)$

H: Diferencia de elevación entre contornos

$LC_j$ : Longitud del contorno  $j$

$DA_i$ : Área entre los contornos  $j$  y  $(j+1)$

Por tanto la pendiente media de la cuenca se determina por la Fórmula 23.

$$S = \sum (s_i * DA_j / DA)$$

Fórmula 23. Pendiente media ponderada para la cuenca.

Donde:

DA: Área Total de la cuenca



### **C: Factor de ordenación de cultivos.**

Se puede definir como la relación entre el valor medio de pérdidas de suelo en un campo cultivado o con vegetación y las pérdidas ocurridas en un suelo con *barbecho continuo* (suelo desnudo, máxima pérdida de suelo) bajo condiciones iguales de lluvia, suelo y topografía. El efecto que la vegetación proporciona al suelo se debe principalmente a:

- La protección aérea que la vegetación proporciona al suelo, creando una especie de pabellón cubierto (Canopy Cover).
- La protección que proporciona la vegetación a ras de suelo, y al efecto beneficioso que se produce en la defensa del suelo contra la erosión, cuando el crecimiento de las plantas es bastante denso (Much and Close Growing Vegetation).
- Los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo, tanto porque la cubren, como porque pueden variar algunas de sus propiedades físicas, por ejemplo, produciendo un aumento en la porosidad, siempre que estas no hayan sido consideradas en el factor K (Residual Effects of the Land Use).

El factor C, llamado también de cobertura o de uso de suelo, es un valor adimensional y siempre menor a 1; este factor para el caso de cultivos agrícolas, no es constante a lo largo del año, por lo que se debe considerar cálculos experimentales para cada clase de cubierta. Por ello, su valor estará determinado por las características de la cobertura vegetal: porcentaje de cubrimiento, densidad de población, edad, época del año y estado sanitario.

A continuación se presentan las Tablas 6, 7 y 8 tomadas de Gaspari et al., (2009) con los valores medios anuales del Factor C. Para mayor información, se recomienda consultar el Agriculture Handbook Number 537 "Predictic Rainfall Erosion Losses" o publicaciones similares, debido a que la determinación de su valor esta en continua investigación y actualización.

Tabla 6. Valores de Factor C.

Cubierta vegetal	Valor de Factor C
Arbolado forestal denso	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral con buena cobertura	0,08
Matorral ralo y eriales	0,2
Cultivos arbóreos y viñedos	0,4
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Cultivos en regadío	0,04

Tabla 7. Valores de factor C para bosques.

% de cabida cubierta	% de cubierta en contacto con el suelo <sup>(1)</sup>	Tipo de ordenación <sup>(2)</sup>	
		C	NC
110 75	100 – 90	0,001	0,003 – 0,011
75 – 40	90 – 75	0,002 – 0,004	0,01 – 0,04
<sup>(3)</sup> 40 - 20	70 – 40	0,003 – 0,009	0,02 – 0,09

Donde (1): Formada por al menos 5 cm de restos vegetales o plantas herbáceas.

(2): C = montes con control estricto del pastoreo; NC = sin control del pastoreo.

(3): Para cubiertas en contacto con el suelo, inferiores al 40 %, o cabida cubierta menor del 20 %, usar valores de la tabla anterior.

Tabla 8. Factor C para pastizales, matorrales y arbustos. Valores de C x 10-3.

Cubierta vegetal		Cubierta en contacto con el suelo						
Tipo y altura de cubierta	% recubrimiento	Tipo	Porcentaje de cobertura del suelo					
			0	20	40	60	80	
Cubierta inapreciable y matorrales ( $\leq 0,5$ m)		G	450	200	100	042	013	003
		W	450	240	150	090	043	011
Plantas herbáceas y matorrales ( $\leq 0,5$ m)	25	G	360	170	090	038	012	003
		W	360	200	130	082	041	011
	50	G	260	130	070	035	012	003
		W	260	160	110	075	039	011
	75	G	170	100	060	031	011	003
		W	170	120	090	067	038	011
Matorral ( $\leq 2$ m)	25	G	400	130	090	040	013	003
		W	400	220	140	085	042	011
	50	G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
	75	G	280	140	080	036	012	003
		W	280	170	120	077	040	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable ( $\leq 4$ m)	25	G	420	190	100	041	013	003
		W	420	230	140	087	042	011
	50	G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011
	75	G	360	170	090	039	012	003
		W	360	200	130	083	041	011

Es conveniente el uso de los mapas en detalle para evitar generalizaciones, teniendo en cuenta siempre la escala de trabajo que se utiliza. Además se recomienda el uso de imágenes satelitales o fotografías aéreas para la interpretación, siendo fundamental el apoyo del trabajo de campo en la verificación.

**P: Factor de prácticas de conservación de suelos.**

Se define como la relación existente entre el valor medio de las pérdidas de suelo producidas en un campo donde se realizan las prácticas de conservación de suelo, y las que se originarían en el mismo suelo si se hicieran labores en la dirección de la máxima pendiente en iguales condiciones de lluvia, suelo, topografía y vegetación.

Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento, influyen directamente en la conservación del suelo. Se incluyen como prácticas el cultivo a nivel, el cultivo en fajas y las terrazas. Otras prácticas como la rotación con especies herbáceas, el empleo de fertilizantes, cubiertas artificiales, entre otras, se consideran dentro de los trabajos de cultivo, y por tanto incluidas en el factor C.

En la Tabla 9, elaborada por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, se presentan los valores de P obtenidos experimentalmente para cada situación según las medidas de conservación para diferentes gradientes de pendiente. Las parcelas empleadas para los ensayos fueron de 22,1 m de longitud y 9% de pendiente.

Tabla 9. Valores del factor P.

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
2 – 7	0,50	0,25	0,10	0,05
8 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 18	0,80	0,40	0,16	0,05
19 – 24	0,90	0,45	0,18	0,06

En general, los términos R, K y LS representan la influencia de los factores físicos del área geográfica, poco modificables por el hombre y constituyen el primer acercamiento para el análisis de erosión del suelo puesto que su producto representa la pérdida de suelo que ocurriría en esa zona si todo el año el suelo estuviera en barbecho continuo, por esta razón a este producto se lo denomina “erosión potencial”. En cambio los valores de C y P dependen del manejo que cada agricultor haga de su campo para disminuir esa erosión potencial.

**Tolerancia en las pérdidas de suelo (erosión tolerable)**

La evaluación de tolerancias de pérdidas de suelo en un terreno, depende de diversos factores como profundidad del suelo, propiedades físicas, desarrollo de los sistemas radicales de la vegetación, reducción de la materia orgánica, pérdida de nutrientes y sementeras, etc. Tratándose de suelos fértiles y profundos, las pérdidas de suelo tolerables se estiman en medio mm del perfil edáfico superior por año. Por tanto, con un peso específico del suelo en 2,0 tn/m<sup>3</sup>, las pérdidas se evalúan en 10 Mg/año. (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Según Wischmeier, pérdidas de 12,5 Mg.ha/año son admisibles como máximo en un suelo profundo, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable a la vida de las plantas. López Cadena de Llano (1998).

En 1981, FAO, PNUMA y UNESCO, presentaron la “Clasificación Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos” (ver Tabla 10) con los rangos de valores tolerables según pérdida de suelo por aplicación de la U.S.L.E. (Gaspari, et al., 2009).

Tabla 10. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial.

<b>Pérdida de suelo (Mg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
< 10	Nulo
10 - 50	Moderado
50 - 200	Alto
> 200	Muy alto

## **2.7 Integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los Modelos Matemáticos (HEC-HMS® y U.S.L.E.)**

### **2.7.1 Definición, componentes y funciones de los SIG**

*“Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención de información, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (Clair, 2011).*

Bajo este concepto general, se destaca que los SIG están constituidos por cinco elementos básicos: los componentes físicos, el programa, los datos, los procesos de flujo y los usuarios que juntos interactúan bajo ciertas reglas para desarrollar sus *potencialidades operacionales* que cada software debe estar en capacidad de cumplir, según su diseño y uso, las cuales son:

- a) Entrada de datos y control de calidad
- b) Almacenamiento de datos y gestión de bases de datos
- c) Modelización y análisis de datos
- d) Visualización y salida de datos

### **2.7.2 Modelo de datos en un SIG**

Los SIG sirven para representar del *mundo real* un *modelo de la realidad*, para analizar *propósitos particulares* con la finalidad de *contribuir con información, para la toma de decisiones y considerarse como una fuente para los sistemas expertos*. La materialización

de los elementos que conforman el mundo real (elementos reales) son representados en forma abstracta y discreta por *medio de entidades espaciales* (elementos gráficos simples), que básicamente son tres: puntos, líneas y polígonos o áreas. La representación de las entidades espaciales en el modelo de la realidad pueden ser caracterizadas mediante *dos modelos de datos: vectorial y raster*.

Clair (2011) y Moreno *et al.*, (2008) definen a los modelos de datos vectoriales y raster de la siguiente manera:

#### Modelo de datos vectorial

En este modelo la representación del mundo real es discreta, la forma de representar a las entidades espaciales: puntos, líneas y polígonos, se basa en los elementos vectoriales: vértices y segmentos. El punto está representado por un vértice, elemento vectorial más simple, que resulta del cruce de dos coordenadas X e Y. Es un objeto de cero dimensiones que solo representa la posición en el espacio del elemento real, no representa longitud ni superficie. La línea, es el conjunto de uno o varios segmentos articulados por vértices con sus respectivas coordenadas, a los vértices de los extremos se los denomina nodos y marcan el inicio y el final de la línea, estableciendo el sentido y dirección. Es un objeto de una dimensión, a más de la posición, representa la longitud del elemento real, no la superficie. El polígono, está formado por líneas cerradas donde los nodos de inicio y final coinciden, delimitando un área en su interior. Objeto de dos dimensiones, representan la longitud y superficie del elemento geográfico. El programa ArcGIS diferencia el desigual comportamiento con mucha claridad, a cada categoría descrita, separándolas siempre en capas (layers) distintas.

Los elementos vectoriales se convierten en objeto cuando su representación (punto, línea, polígono) se asocia a elementos reales (edificio, río, cuenca hidrográfica). Se pueden guardar las propiedades (atributos) de los elementos reales (caudal, temperatura, precipitación, longitud, etc) en bases de datos (Tablas) y asociar, mediante identificadores (ID), cada objeto a sus atributos. Como los objetos son representados bajo un sistema de *coordenadas, es posible aplicar relaciones espaciales (topología) explícitas que mantienen entre si, como la proximidad, la conectividad o la inclusión. El programa ArcGIS, utiliza para este modelo, tres formatos diferentes: coberturas (coverages), archivos de formas (shapefiles) y bases de datos geográficas (geodatabase).*

#### Modelo de datos raster

En estos modelos, la representación de los elementos del mundo real es continua, mediante una superficie dividida en celdas regulares denominada malla o matiz, y donde cada una de las celdas son conocidas como píxel (pix), identificados por un número de fila y columna en la matriz. La posición de los datos se deduce del lugar en la matriz.

Los formatos raster siguen las normas generales de las imágenes digitales, por esto la estructura de una imagen raster es similar a una malla, normalmente regular, a cuyas celdas o píxel se les asigna un número o nivel digital (ND) que representa una cualidad identificable

de observación, la mínima, representada en cada locación mediante un tono o color, que finalmente conforma la apariencia visual de la imagen. En ocasiones los pixeles no podrán representar características visuales del espacio, sino información como la altura de cada pixel, la pendiente, la orientación o cualquier otra característica continua del terreno. Por ejemplo en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), los pixeles representan el valor de altitud.

Gaspari *et al.*, (2009) estable las diferencias de cada modelo, destacando sus características operacionales, como se presenta en la Tabla 11, donde se muestra un listado de las características de cada tipo de modelo y se indica su beneficio (+) o dificultad para su uso (-).

Tabla 11. Características de los modelos vectorial y raster.

<b>Características</b>	<b>Modelo Vectorial</b>	<b>Modelo Raster</b>
Precisión gráfica (espacial)	+	-
Cartografía tradicional	+	-
Volumen de datos	+	-
Topología	+	-
Operaciones de cálculo	-	+
Actualización	-	+
Variación espacial continua	-	+
Integración	-	+
Variación espacial discontinua	+	-

### **2.7.3 Fuente de captura de datos y tipos de información espacial**

Los principales métodos utilizados para introducir datos geográficos en el modelo seleccionado (vectorial o raster) encontramos a los equipos de percepción remota, fotografías aéreas, imágenes satelitales, datos capturados con GPS, digitalización manual escaneado de de mapas, encuestas y censos.

Durante todas las etapas del proceso SIG la calidad de los datos necesita ser revisada, para evitar no solo los errores de los datos originales e introducidos durante los procedimientos de entrada, sino también durante, los procesos de almacenamiento y gestión de datos, análisis y modelización, y presentación de resultados, para lo cual debe ser implementado un sistema de metadatos.

Un sistema de metadatos tiene por objeto posibilitar que los usuarios de información geográfica puedan, de forma distribuida, localizar datos geográficos con sus características y el acceso a los mismos con distinto grados de valor añadido, como un aporte de iniciativa regional para el establecimiento de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).

En la Tabla 12, elaborada por el suscrito, se presentan las diversas coberturas o capas de información geoespacial y sus fuentes de datos.

Tabla 12. Información geoespacial y fuente de datos. Fuente: Hammerly et al., 2006.

<b>Fuente de Datos</b>	<b>Información geoespacial</b>
Modelos Digitales de Terreno (MDT)	Información referente a la topografía: posición (X,Y), altura, curvas de nivel, pendiente, orientación, longitud de flujo, área de aportes, subcuencas y redes de drenaje.
Digitalización de mapas analógicos, fotografías aéreas o relevamiento de campo. MDT.	Cuencas y subcuencas hidrográficas y redes de drenaje, disponible como información digitalizada (proporcionada por organismo gubernamentales, comerciales o usuarios)
Digitalización o rasterización de de relevamientos de suelos originales o mapas analógicos	Datos de tipo de suelo disponible en formato analógico y digital (vectorial) en varias escalas (reconocimiento y semidetalle)
Combinación de imágenes de vuelos aerofotogramétricos y/o captura de datos desde satélites espaciales.	Datos de ortofotocartas digitales y cartas imágenes, con la calidad geométrica de un mapa.
Imágenes de sensores remotos	Precipitación, uso y cobertura del suelo, índices de vegetación, redes de drenaje y cuencas hidrográficas, temperatura de superficie, humedad del suelo y nieve/hielo, entre otros aspectos relevantes de la cubierta terrestre.

### **2.7.4 Modelación con los SIG**

Durante la última década el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han tenido un verdadero auge, no solo porque facilita la producción cartográfica y la evaluación de áreas de riesgos; permite la generación de bases de datos del medio físico, biológico, socioeconómico, catastro, marketing; sino que también constituye una herramienta muy útil en los procesos de modelación de diversa índole.

#### 2.7.4.1 Modelación en la hidrología

Según Hammerly *et al.*, 2006, los fundamentos de la integración de los SIG y los modelos hidrológicos fueron descritos por Bulhones Mendes, en 1996, enumerando las siguientes fases de desarrollo:



- 1.- obtención de datos de campo y digitales,
- 2.- operaciones y análisis de los datos de entrada,
- 3.- operaciones en los SIG,
- 4.- simulación hidrológica, y
- 5.- simulación visual de los resultados

El mismo autor manifiesta que en la práctica la integración entre la modelación hidrológica y los SIG puede ser ejecutada de dos maneras:

- a) Modelación interna en el SIG, es decir usando lenguaje de programación específico del software SIG a utilizar o diseñando la construcción de funciones internas del software SIG mediante algebra de mapas; esta manera de integración se circunscriben a modelos basados en funciones empíricas y demasiado simplificadas.
- b) Formatos idénticos en el modelo y en el SIG, actualmente la mayoría de modelos hidrológicos se desarrollan bajo plataforma SIG. La manipulación de los componentes, el ingreso de datos al modelo, las bases de datos, la visualización de la información en pantalla, la generación de resultados y elaboración de mapas se realiza en ambiente SIG, requiriendo la utilización de programas de conversión de formatos y mayor consumo de tiempo de procesamiento. (ver Figura 7)

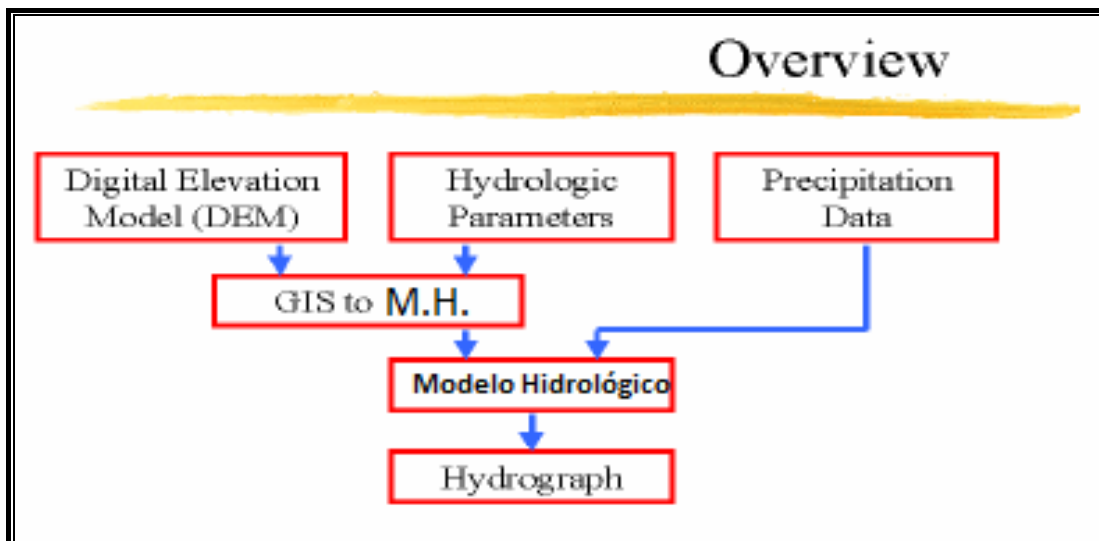


Figura 3. Esquema de integración Modelo Hidrológico y SIG. Modificado.

En cualquier caso, la utilización de un SIG en un proceso de modelación hidrológica tiene como propósito facilitar la adquisición y preparación de los datos espaciales y posteriormente la presentación y despliegue de resultados.

2.7.4.2 Modelación en el uso y manejo del suelo agrícola

La integración de los SIG en la planificación del manejo y uso de los suelos agrícolas, ha empezado a tomar importancia, pues esta *interrelación permite cuantificar* la pérdida de suelo de manera rápida a escala de cuenca, con un mínimo de trabajo de campo y con la complejidad de las escalas grandes (Flores *et al.*, 2003), a fin de proporcionar datos para el diseño de planes de conservación y reducir los efectos perjudiciales de la pérdida de suelo.