

CAPITULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto de tesis sobre la producción de caudales y sedimentos en un área experimental en la cuenca del Río Guayas utilizando modelos hidrológicos, es fundamental contar con la información básica (*mínima*) necesaria para, definir el área experimental realizar la calibración y validación del modelo planteado. Una vez definida el área experimental de acuerdo a la información disponible y ayuda del instituto auspiciante de la beca, se procedió a subdividir la cuenca experimental en subcuencas o microcuencas más pequeñas y homogéneas de tal manera de realizar una caracterización de ellas. Cada unidad hidrológica presenta características morfológicas propias que la diferencian de otras, sin embargo las leyes físicas que rigen en la naturaleza son aplicables a todas las cuencas del mundo. La interpretación y medición de estas leyes naturales, el conocimiento morfológico del área de estudio y la relación de estas en el ambiente permitieron, mediante la aplicación de técnicas de simulación (modelos), predecir el comportamiento hidrológico de la cuenca experimental.

Para el desarrollo de la presente tesis, se utilizó una computadora portátil Laptop HP modelo ProBook 4410, procesador Intel Core 2 DUO 2.1 Ghz, 2,9 GB de RAM y una impresora Epson TX135. En cuanto a los programas, para el tratamiento y procesamiento de la información geoespacial se trabajó con el programa ArcGIS 9.3 ® de ESRI ®. Para el cálculo del caudal líquido, se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS ® (Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System,), versión 3.5 de agosto del 2010. Para el análisis, interpretación y desarrollo de resultados se emplearon los utilitarios de Microsoft ® como la hoja de cálculo de Excel ®, Power Point ®, Visio ® y Word 2007 ®. Además se utilizó la red de internet de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata (F.C.A.F.) para bajar los programas de modelización y antecedentes disponibles.

4.1.- Recopilación de bibliografía y definición del área experimental

Se realizó la búsqueda de recopilación bibliográfica, estudios antecedentes, artículos técnicos-científicos del área de estudio disponibles en internet, así como datos de las instituciones oficiales encargadas de la captura, procesamiento y publicación de información topográfica, tipos de suelo, uso actual del suelo y cobertura vegetal, datos meteorológicos con registros diarios e históricos, datos de caudales y niveles diarios e históricos, imágenes satelitales, entre otros.

4.1.1 Definición del Área Experimental

Para la definición de la cuenca experimental se seleccionó la zona nororiental de la cuenca del Guayas como **área representativa** de interés debido a que no está afectada por la influencia de la marea, no existen estructuras de ingeniería que influyan en los caudales de los ríos y tiene la naciente de algunos ríos importantes de estudio. Para lo cual se tomaron en consideración aspectos técnicos, morfométricos y operacionales, como:

- Disponibilidad de información meteorológica, hidrológica, suelo y relieve.
- Semejanza u homogeneidad con el resto de la cuenca.
- Consultas con personal técnico experimentado.
- Áreas Protegidas o Proyectos importantes.

4.2 Morfometría de la Cuenca

La cuenca funciona como un colector que recibe agua de la precipitación (lluvia o nieve) y la transforma en escurrimiento. Durante esta transformación, se producen pérdidas de agua que están en función de las condiciones físicas de la cuenca y de las características climáticas de la zona. Desde el punto de vista hidrológico, interesa el volumen de escurrimiento (balance hídrico) y también el reparto en el tiempo (hidrograma), que son funciones de esas condiciones y características. (López Cadena de Llano *et al.*, 1998). Desde el punto de vista de su funcionamiento, la cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfometría, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal y uso del suelo.

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escorrentía es fácilmente intuible cualitativamente, siendo la dificultad en expresar estos factores mediante parámetros sencillos. Sin embargo es posible definir cierto número de índices, susceptibles de servir, por lo menos de referencia, en la clasificación de cuencas y facilitar los estudios de semejanza (*Gaspari et al.*, 2009).

Las características fisiográficas de una cuenca pueden ser expresadas a partir de ciertas medidas o parámetros que se consiguen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía del área de estudio. Los parámetros morfométricos son indicadores de la influencia que tiene la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia y permiten el análisis de las características morfológicas y funcionales de la cuenca hidrográfica. La forma de la cuenca controla la velocidad con que la gota de lluvia llega al cauce principal desde la divisoria hasta el punto de aforo o desembocadura y por lo general son invariables.

Los parámetros morfométricos se pueden caracterizar según (diferentes autores):

1. De relieve
2. De forma
3. Relativos a la red hidrográfica
4. Parámetros automáticos

De los cuales los tres primeros ítems corresponden a los análisis realizados a nivel cuenca en forma manual utilizando las fórmulas mediante el programa de análisis de datos numéricos.

Para facilitar la administración y manejo de las cuencas hidrográficas, y dependiendo del tamaño de estas, es recomendable dividir a la cuenca de estudio en subcuencas que determinan áreas homogéneas de paisaje y uso. Siendo subsecuentes con esta técnica, se aplicó la herramienta HEC-GeoHMS bajo plataforma SIG, la cual calcula, entre otros datos, algunos parámetros morfométricos a nivel subcuenca en forma automática que se presenta en la sección 4.2.4. También se presentan los demás índices que no fueron calculados en forma automática por esta herramienta, usando las fórmulas correspondientes a nivel subcuenca.

4.2.1 Parámetros de Relieve

La influencia del relieve sobre la cuenca de estudio tiene afectación directa en la duración del tiempo de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. A mayor pendiente corresponde menor duración de la concentración de la gota de agua. Los parámetros de relieve utilizados en el presente estudio a nivel cuenca, son los siguientes:

a.- Área (A)

Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. El área de la cuenca se considera como la superficie que contribuye con la escorrentía superficial y está delimitada por la divisoria topográfica. Es considerada como el parámetro físico básico que define a una cuenca, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc.

b.- Perímetro (P)

Es la longitud del límite exterior de la cuenca y depende de la superficie y la forma de la cuenca. Es la medición de la línea envolvente del área de la cuenca.

c.- Longitud Axial (La)

Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

d.- Ancho promedio (Ap)

Es la relación entre la superficie de la cuenca y su longitud axial. (Fórmula 24)

$$AP = \frac{A}{La}$$

Fórmula 24. Ancho promedio de la cuenca

Donde:

Ap: Ancho promedio de la cuenca (km)

A: Área (km²)

La: Longitud axial (km)

e.- Altura media (h)

Es la relación entre la diferencia de cotas (máxima y mínima) del área de estudio dividida para 2, se la expresa en metros o kilómetros. (Fórmula 25).

$$\bar{h} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{2}$$

Fórmula 25. Altura media.

Donde:

\bar{h} : altura media (m)

Hmax: cota máxima (m)

Hmin: cota mínima (m)

f.- Pendiente Media de la Cuenca (PM) o Factor Topográfico

Es indudable el carácter decisivo que afecta el relieve en los fenómenos erosivos. El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca al igual que el caudal máximo, está muy influenciados por la *configuración topográfica*, ya que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos rangos de pendiente.

Mintegui Aguirre (1988) propuso una clasificación de la pendiente según seis rangos porcentuales que explican las diferentes clases de pendiente en estudio, las cuales fueron utilizadas para la confección de la cartografía en esta tesis (ver Tabla 14). A esta tabla se le dio una interpretación personal, en base de varios autores, del tipo de relieve según el rango de la pendiente.

Tabla 14. Rangos y tipos de pendiente, modificado.

Pendientes (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-12	Suave
12-18	Mediano
18-24	Levemente Accidentado
24-30	Accidentado
>30	Fuerte

El cálculo de la pendiente media para la cuenca se efectuó tomando como base el desnivel altimétrico de la cuenca de estudio sobre la longitud axial, obtenida a partir del modelo de elevación digital, aplicando la Fórmula 26:

$$PM(\%) = \frac{D}{La}$$

Fórmula 26. Pendiente Media de la Cuenca. (Factor Topográfico)

Donde:

PM (%): Pendiente media (%)

D: Desnivel topográfico (m)

La: Longitud axial (m)

4.2.2 Parámetros de Forma

La forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre el recorrido del hidrograma resultante de una lluvia (ver Figura 18). En una cuenca de forma alargada (cuenca A en la gráfica) con un solo cauce principal recolector con tributarios cortos y poco ramificados, tendrá un hidrograma de crecientes achatado ya que el agua que proviene de los tributarios presenta una larga circulación a través del canal principal. Además el agua de los tributarios cercanos a la cabecera tarda mucho más tiempo en llegar a la desembocadura de la cuenca que el agua de los afluentes más cercanos al punto de salida, que lo hacen más rápido atenuando el caudal de salida.

En cuencas de forma semicircular a circular (cuencas B y C en la gráfica) el tiempo de recorrido del agua dentro del perímetro de la cuenca es aproximadamente igual, se caracterizan por tener tributarios más abundantes y el cauce principal corto, por lo que el hidrograma de crecientes se presenta más elevado que las cuencas alargadas de similares condiciones, siendo la descarga más elevada y demora menos tiempo ante lluvias iguales. El caudal pico es menor en la cuenca alargada, pero se alcanza más rápido que en la cuenca circular, mientras que el retorno al nivel base es más lento en la alargada que en la circular (Busnelli, 2009).

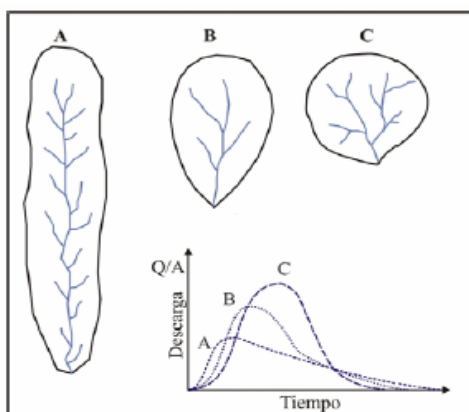


Figura 14. Formas de la cuenca de drenaje.

A continuación se detallan los principales parámetros que fueron utilizados para este análisis:

a.- Coeficiente de Gravelius (Cg) o Índice de compacidad (Kc)

Es la relación entre el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área similar al de la cuenca. Este coeficiente es igual a 1 cuando la cuenca es perfectamente circular. Es un índice adimensional y su expresión es la siguiente (Fórmula 27):

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 27. Coeficiente de Gravelius o Índice de compacidad.

Donde:

Cg: Coeficiente de Gravelius

P: Perímetro (km)

A: Superficie de la cuenca (km²)

Gaspari *et al.*, 2009, presenta una clasificación de este coeficiente que crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca, establecida en la Tabla 15:

Tabla 15. Clasificación del coeficiente de Gravelius.

Cg	Forma de la Cuenca
1,00	Redonda
1,25	Oval redonda
1,50	Oblonga
1,75	Rectangular oblonga

El índice de compacidad está relacionado con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en trasladarse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. Durante este tiempo ocurre la máxima concentración de agua puesto que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca.

Está ligado a la forma de la cuenca. Cuando más irregular es la cuenca, mayor será su Cg. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1, aumentando la circularidad en el cauce e incrementando una mayor probabilidad de producir avenidas máximas (eventos de torrencialidad), ya que sus tiempos de concentración para diferentes puntos de concentración serán iguales.

b.- Factor de forma (IF)

Este factor tiene relación con las crecidas en la cuenca, interpretando la tendencia de la cuenca hacia las crecidas de los ríos. Regula la concentración de la escorrentía superficial, relacionando el movimiento del agua y la respuesta de la cuenca a dicho movimiento, controlando la velocidad con que el agua llega al cauce. (Cellini, 2005)

Es un índice adimensional que formula la relación entre el ancho promedio a la longitud axial de la cuenca. (Fórmula 28)

$$IF = \frac{AP}{La}$$

Fórmula 28. Factor de Forma

Donde:

IF: Factor de forma (adimensional)

Ap: Ancho promedio (Km)

La: Longitud axial (km)

Una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocara crecidas más significativas (Gaspari *et al.*, 2009)

Cuando IF es similar a 1, se tiene una cuenca de forma redondeada, y cuando el IF es menor a 1 se caracteriza por ser una cuenca alargada.

4.2.3 Parámetros relativos de la red hidrográfica

Se refiere como red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal por el que fluyen las aguas de las escorrentías superficiales, su estudio es importante porque permite estudiar los escurrimientos sobre todo cuando no se dispone de información cuantitativa de los factores hidrometeorológicos.

La forma y densidad de la red de drenaje corresponde a la distribución de los afluentes que lo conforman. Esta distribución se ha venido creando a través de muchos años sobre la superficie terrestre y se expresa mediante índices o parámetros que describen de alguna manera la geometría de la red.

a.- Densidad de drenaje (D)

La densidad de drenaje representa la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. Se considera que la densidad de drenaje caracteriza

cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, definiendo el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante, los cuales permiten el escurrimiento y nos ponen de manifiesto el tipo de manejo que se debe aplicar sobre esa cuenca para evitar el deterioro de los cauces (Henao, 1988).

La densidad de drenaje está definida como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano, 1998). La ecuación utilizada para este cálculo fue la establecida por Horton y se expresa en km/km^2 o km^{-1} , se enuncia en la Fórmula 29.

$$D = \frac{\sum L_i}{A}$$

Fórmula 29. Densidad de drenaje.

Donde:

D: Densidad de drenaje (km^{-1})

$\sum L_i$: Sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca (km).

A: Superficie de la cuenca (km^2).

En principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad de la escorrentía es mayor; por tanto los hidrogramas en principio tendrán un tiempo de concentración corto (López Cadena de Llano, 1998).

b.- Pendiente media del cauce (J)

La pendiente media del cauce resulta del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (López Cadena de Llano, 1998). Se expresa en porcentaje, según la Fórmula 30.

$$J = \frac{(H \text{ max} - H \text{ min})}{L} \times 100$$

Fórmula 30. Pendiente media del cauce (%)

Donde:

J: Pendiente media del cauce (%)

H max: Cota máxima sobre el curso de agua (m)

H min: Cota mínima sobre el curso de agua (m)

L: Longitud del río más largo (m)

c: Tiempo de concentración (Tc)

Llamado también tiempo de respuesta o de equilibrio, López Cadena de Llano (1998) lo define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca.

Este parámetro tiene relación directa con el gasto pico y con el tiempo de recesión de la cuenca, ya que tiempos de concentración muy cortos tienen gastos picos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio, los tiempos de concentración más largos determinan gastos pico más atenuados y recesiones mucho más sostenidas en el tiempo (Gaspari *et al.*, 2009).

La ecuación usada para calcular el Tc fue la fórmula que propone Gaspari *et al.*, (2009), en función de la pendiente media del cauce (%) (Fórmula 31):

$$T_c = 0,3 * (L / J^{1/4})^{0,76}$$

Fórmula 31: Tiempo de Concentración

Donde:

Tc= Tiempo de concentración (horas)

L= Longitud del cauce (km)

S= Pendiente media del cauce (%)

4.2.4 Parámetros automáticos con HEC-GeoHMS

A partir del uso del programa ArcGIS 9.3 ® y la extensión HEC-GeoHMS ® se obtuvieron las características morfométricas del relieve de la cuenca experimental a nivel subcuenca.

Para que la herramienta HEC-GeoHMS ® pueda procesar los datos de entrada, fue necesario que estos hayan sido anteriormente preparados por el programa ArcGIS 9.3 ®. Los datos de entrada que se usaron para trabajar con esta herramienta fueron el modelo de elevación digital (MED) del área de estudio, la capa georreferenciada de los cauces y la estación de aforo.

Una vez ingresado estos datos, el HEC-GeoHMS ® arrojó una serie de información hidrológica que sirvió como datos de entrada para el programa HEC-HMS ® y estimar el caudal líquido (*sección 4.7.2*). Sin embargo para este estudio, se utilizaron los datos correspondientes a los parámetros morfométricos del relieve y de la red hidrográfica que se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros morfométricos generados con HEC-GeoHMS ®.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DEL RELIEVE	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA RED HIDROGRÁFICA
<ul style="list-style-type: none"> • Perímetro (m) • Área (m² y km²) • Pendiente media (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de los ríos (m) • Pendiente del cauce (m/m) • Cotas de cauce: máxima y mínima (m)

Se analizaron los parámetros de relieve de las subcuencas, las pendientes media de las subcuencas máximas y mínimas, la longitud de la red hidrográfica, la longitud de los ríos principales que atraviesan las subcuencas y la longitud total del río principal, las pendientes de los cauces y las cotas máximas y mínimas que presentan en cada caso.

Se generaron análisis gráficos del perfil longitudinal de los ríos, en el cual se representa la relación elevación altimétrica versus la longitud del río.

El resto de parámetros que no fueron calculados automáticamente por la herramienta HEC-GeoHMS ®, se realizaron en forma manual utilizando para esto una hoja de cálculo, de acuerdo a las fórmulas de las secciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3.

4.3 Análisis y procesamiento de datos meteorológicos

La entidad encargada del manejo de la información hidrológica y meteorológica es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)³, que opera la Red Hidrometeorológica Nacional, de la cual se obtuvo la información necesaria para los análisis que se detallan a continuación.

Para el desarrollo de estos estudios y dada la información hidrometeorológica disponible en el área representativa, se utilizó una metodología muy sintética de tal manera que, mediante la aplicación de cálculos simples poder presentar los parámetros más importantes y sus características hidrometeorológicas con una confiabilidad aceptable de una forma rápida y de buena calidad.

4.3.1 Precipitaciones

La precipitación es un fenómeno muy variable en el espacio y el tiempo. Es el resultado del enfriamiento de las masas de aire calientes saturadas de agua, las cuales al perder temperatura por el ascenso a niveles superiores, se condensan formando pequeñas gotas,

³ La instalación de las estaciones, así como la ubicación del instrumental para la toma y/o registro de los datos meteorológicos han sido realizadas de acuerdo a normas internacionales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

que se precipitan a la tierra en forma de lluvia. Se mide en altura de precipitación (en mm), que equivale a la altura obtenida por la caída de un litro de agua sobre la superficie en un metro cuadrado.

La medición de la precipitación en la cuenca, se efectuó por medio de pluviómetros y pluviógrafos del INAMHI, el cual define a estos como:

a) Pluviómetro

Instrumento destinado a medir las alturas de agua de las precipitaciones, cuya superficie receptora es un anillo de doscientos centímetros cuadrados de superficie, bajo la suposición que las precipitaciones están uniformemente distribuidas sobre una superficie horizontal impermeable y que no están sujetas a evaporación. Se mide las precipitación a una altura de un metro con veinte centímetros para evitar corrientes turbulentas a baja altura y salpicado en la superficie terrestre.

b) Pluviógrafo

Instrumento similar al pluviómetro que incluye un dispositivo para registrar gráfica y cronológicamente las alturas de las precipitaciones.

Para el análisis pluviométrico global del área representativa, se realizó el cálculo de la **precipitación media** por el método de las Isoyetas. Para lo cual se utilizó la información proporcionada por CLIRSEN (2009), en formato shape (.shp) con una red de Isoyetas medias anuales en intervalos de 100 mm para toda la cuenca del Guayas, en el período 1985-2006, en la cual los autores no consideraron los años 1997 y 1998, por tratarse de años excepcionales. Con la ayuda de la herramienta de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se procedió a recalcular la precipitación media anual para el área representativa.

Luego, para realizar el análisis pluviométrico particular, se usó el programa de cálculo Excel®, con el cual se utilizaron tres pluviómetros ubicados en el área representativa de la siguiente manera:

- En el centro del área la estación meteorológica La Libertad-Río Blanco (MB89).
- En la zona alta la estación meteorológica Las Pampas (M362).
- En la zona baja la estación meteorológica Puerto Ila (M026).

La estación meteorológica Puerto Ila (M026) es una estación climatológica ordinaria permanente (CO) y las estaciones meteorológica Las Pampas (M362) y La Libertad (MB89) son estaciones pluviográficas permanentes (PG) todas pertenecientes al INAMHI.

Se efectuó un estudio de los datos pluviométricos de las tres estaciones en la cual se tuvieron en cuenta los valores medios de las precipitaciones anuales, mensuales y diarias en los períodos que se indican en la Tabla 17, junto con información general de las estaciones mencionadas. Los valores diarios fueron usados para ingresar en el modelo meteorológico del programa HEC-HMS® para la simulación hidrológica.

Tabla 17. Estaciones Meteorológicas usadas para el análisis pluviográfico.

Estación (código)	Posición (PSAD 56)	Altura (m)	Fecha de instalación	Zona Hidrológica	Período analizado
Puerto Ila (M026)	00° 28' 34" S 79° 20' 20" W	260	1-ENE-1963	130 - Cuenca del Río Guayas	1990-2010
La Libertad (MB89)	0° 31' 54" S 79° 07' 20" W	689	2-MAY-2005	130 – Cuenca del Río Guayas	2005-2010
Las Pampas (M362)	0° 26' 36" S 78° 58' 00" W	1640	1-ENE-1965	80 - Cuenca del Río Esmeraldas	1990-2010

Fuente (INAMHI. 2000-2008).

4.3.2 Temperatura

El INAMHI dispone de instrumental específico para medir la temperatura del aire, los cuales, para evitar la influencia de la radiación directa, reflejada y difusa, se ubican en un abrigo meteorológico (caseta) a dos metros de altura. Se mide en grados centígrados y décimas de grado. La temperatura del aire es importante medir por una serie de precauciones que hay que tomar en cuenta para el análisis hidrometeorológico. El instrumental lo define de la siguiente manera:

- a) Termómetro seco. Dispositivo que utiliza la diferencia de dilatación del líquido (mercurio en este caso), y el vidrio que lo contiene para poder medir la temperatura del aire. Junto con el termómetro de bulbo húmedo forma parte del Psicrómetro.
- b) Termómetro de mínima. Dispositivo de líquido (alcohol) en vidrio destinado a medir las temperaturas más bajas ocurridas en el día. El menisco de la columna de alcohol (extremo de la columna) arrastra un índice (metálico o de arcilla) conforme va reduciendo el tamaño de la columna al ir disminuyendo la temperatura, hasta llegar al menor valor de ese día, lo que por lo general sucede alrededor del momento anterior a la salida del sol. Al aumentar luego la temperatura el índice deja pasar el alcohol en su marcha ascendente. Pero queda en la posición de la temperatura mínima para su lectura a las 07:00 Hrs.
- c) Termómetro de máxima. Dispositivo de líquido (mercurio) en vidrio destinado a medir la mayor temperatura ocurrida durante el día. Tiene una pequeña estrangulación que permite que el mercurio fluya libremente mientras aumenta la temperatura, pero al principiar su disminución impide el regreso de la columna de mercurio, o sea queda marcando la temperatura más alta del día se lee diariamente a las 17:00 Hrs.

- d) Termógrafo. Aparato destinado a registrar de manera gráfica las variaciones cronológicas de la temperatura del aire durante un tiempo determinado, el INAMHI usa registro gráfico en fajas de duración semanal. Se utiliza este aparato ante la incapacidad del ser humano de estar observando de manera continua la variación de la temperatura en el tiempo. La parte sensible está constituida por una placa bimetálica que tiene dos capas metálicas, con metales de diferentes coeficientes de dilatación lo que permite una deformación del bimetálico debido a los cambios de temperatura y diferente grado de dilatación de los metales.

Se utilizará los datos provenientes de la estación meteorológica completa Puerto Ila (M026) que dispone de información histórica y de la estación pluviográfica Las Pampas (M362).

El análisis de datos que se presenta en este trabajo incluye valores de temperatura media, máxima y mínima a nivel mensual y anual, en los períodos que se indican en la Tabla 18 junto con información general de las estaciones consideradas para este estudio. De la estación Las Pampas solo se pudo obtener información desde el 2005 al 2010.

Tabla 18. Estaciones Meteorológicas usadas para el análisis de temperatura

Estación (código)	Posición (PSAD 56)	Altura (m)	Fecha de instalación	Zona Hidrológica	Período analizado
Puerto Ila (M026)	0° 28' 34" S 79° 20' 20" W	260	1-ENE-1963	130 - Cuenca del Río Guayas	1990-2010
Las Pampas (M362)	0° 26' 36" S 78° 58' 00" W	1640	1-ENE-1965	80 - Cuenca del Río Esmeraldas	2005-2010

Fuente: (INAMHI. 2000-2008).

4.4.- Análisis y procesamiento de datos hidrológicos

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es la institución rectora del manejo de la información hidrometeorológica a nivel nacional, para lo cual dispone de redes con estaciones hidrométricas o fluviométricas que sirven para definir el régimen de un río, de una cuenca, de una región o del país⁴.

A continuación se transcriben algunas definiciones que hace el INAMHI relacionadas con los estudios hidrológicos que se aplican en este trabajo:

⁴ La instalación de las estaciones, así como la ubicación del instrumental para la toma y/o registro de los datos hidrológicos, han sido realizadas de acuerdo a normas internacionales. Anuarios INAMHI.

a) *Estación hidrométrica o fluviométrica*

Es el lugar donde se realizan sistemáticamente mediciones de caudal, sedimentos, muestreo hidroquímico y/u observaciones del nivel de agua, lo que permite conocer el régimen en un río, canal o el nivel de un lago o embalse.

Caudal es el volumen de agua que pasa por una sección transversal de una corriente en la unidad de tiempo y se mide en m^3/s o en l/s .

Una sección hidrométrica está compuesta por:

- Sección de aforo
- Sección limnigráfica
- Sección limnimétrica

b) *Aforo*

Es la medición de un caudal o volumen de sedimento en suspensión.

c) *Altura Limnimétrica o nivel de agua*

Es la cota de la superficie de agua con relación a un punto de referencia que puede tener una cota arbitraria o el nivel del mar.

El instrumento de medida se denomina limnómetros o piezómetro constituida por una regla con escala métrica de lectura directa. Además la estación hidrométrica puede tener un instrumento de registro continuo llamado limnógrafo o piezógrafo que realiza las lecturas de caudales por medio de registro gráfico continuo de los niveles de agua.

d) *Obtención de la información*

La toma de la información Limnimétrica se la obtiene mediante mediciones periódicas realizadas por el observador de la estación. Para el caso de la red hidrométrica se registra la lectura en la mañana a las 07:00 horas y otra en la tarde a las 17:00 horas.

Adicionalmente a la toma de datos por el observador y operador de la estación, también se dispone de registros gráficos (limnigramas), los cuales determinan la variación del nivel en el tiempo de una manera continua, pudiendo ser diarios, semanales o mensuales, dependiendo del instrumento registrador y del mantenimiento de la estación.

Las estaciones automáticas están compuestas por un sensor de nivel, sensor medidor de pH, sensor que mide la temperatura del agua y del aire, sensor pluviométrico y un sensor que mide la conductividad.

e) *Procesamiento de la información*

Para el cálculo de caudales a partir de las lecturas limnimétricas y/o limnigráficas, es necesario contar con la curva de gasto líquido (ecuación o curva de descarga), la que es obtenida mediante un ajuste de mínimos cuadrados a partir de los caudales obtenidos de los aforos de gasto líquido realizados en una estación.

Los caudales medios diarios se obtienen como un promedio aritmético ponderado de los valores parciales de caudales generados en base de los niveles observados, a través de su respectiva curva de gasto líquido.

4.4.1 Caudales

La estación utilizada para el estudio fue la estación limnigráfica (LG) H414 Toachi AJ Baba ubicada a la salida de la cuenca del Río Toachi, sobre el río del mismo nombre (ver Tabla 19), durante el período 2003-2010 debido a la mayor cantidad de datos disponibles.

La estación limnigráfica Toachi AJ Baba está localizada 4 km antes de la confluencia del Río Toachi con el Baba. La estación dispone de un limnógrafo y varios limnímetros instalados sobre la margen izquierda y los aforos se los ejecuta con el sistema cable-carro.

Tabla 19. Estación usada para el análisis hidrológico

Estación (código)	Posición (PSAD 56)	Altura (msnm)	Fecha de instalación	Zona Hidrológica	Período analizado
Toachi AJ Baba (H414)	00° 40' 44" S 79° 21' 09" W	107	1-MAY-84	130 - Cuenca del Río Guayas	2003-2010

Fuente: (INAMHI. 2000-2008).

La información hidrológica usada en este trabajo corresponde a datos de caudales diarios y caudales mensuales. Los datos a nivel diario fueron usados para la simulación hidrológica, y los datos mensuales para realizar los siguientes análisis: distribución de los caudales medios mensuales, variación mensual del caudal medio mensual y la distribución de los caudales mensuales durante el período 2003-2010.

Se presenta además el análisis de la relación caudal medio mensual (QMM) de la estación Toachi AJ Baba durante el período 2003-2010 versus la precipitación media mensual (PMM) de la estación La Libertad durante el período 2005-2010.

4.5 Análisis del Balance Hídrico

Para el presente análisis, partiendo del conocimiento de las lluvias medias mensuales y de la evapotranspiración potencial mensual (calculada con el método de Thornthwaite), se determinó el balance del agua en el suelo aplicando el método directo durante los períodos correspondientes.

4.5.1 Cálculo del Balance Hídrico

El método directo, descrito en la sección 2.3.1, se basa en que el agua del suelo va disminuyendo mes a mes hasta agotar la reserva para poder cubrir las necesidades de

agua. El modelo está dividido en dos partes: primero el cálculo de la evapotranspiración potencial y segundo el cálculo propiamente del balance de agua en el suelo.

- Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se aplicó el método de estimación de Thornthwaite (1944), el cual necesita como datos de entrada la temperatura media mensual, el número de días del mes y el número de horas de sol (de acuerdo a la latitud de las estaciones).

Se utilizó el programa Excel ®, en el cual se ingresó los datos de la temperatura media mensual de la estación meteorológica correspondiente y el número de horas de luz, de esta manera se obtiene la evapotranspiración potencial corregida (ETP corr).

- Una vez obtenida la ETP corregida y con la información de la precipitación media mensual se procede a ingresar en la hoja de Excel ® adecuada, obtenido de esta manera la evapotranspiración real (ETR), el Déficit, la Reserva y los Excedentes de agua para el suelo del área correspondiente a la estación meteorológica en estudio.

Para este trabajo se estableció como capacidad máxima de retención de agua en el suelo el valor de 300 mm para el cálculo de la estación Puerto Ila y de 200 mm para las estaciones La Libertad y las Pampas, valores sugeridos por CLIRSEN, 2009.

Con la metodología descrita, se calcularon los Balances Hídricos del área representativa de estudio, sin embargo como la estación La Libertad, ubicada en la zona media, no dispone de mediciones de temperatura y solo posee precipitación del período 2005-2010, se realizó un cálculo entre las temperaturas medias de las estaciones Las Pampas y Puerto Ila, parte alta y parte baja respectivamente, durante el período 2005-2010, según el siguiente procedimiento:

- Se utilizó la información proporcionada por el CLIRSEN y mediante el uso de los SIG, se verificó la ubicación y características climáticas de la estación la Libertad, como zona climática e intervalo de temperatura, luego se comparó con los rangos de temperatura de las estaciones Puerto Ila y Las Pampas para comprobar la variabilidad climática y obtener mediante el promedio aritmético los valores mensuales de la temperatura media para el cálculo del Balance Hídrico del suelo. En la Tabla 20 se presentan los datos de las estaciones utilizadas para el cálculo del Balance Hídrico en el área representativa, según la zona.

Tabla 20. Estaciones usada para el Balance Hídrico

ZONA	PERÍODOS		ESTACIÓN
	PRECIPITACION MEDIA MENSUAL	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	
BAJA	1990-2010	1990-2010	Puerto Ila (M026)
MEDIA	2005-2010	2005-2010	La Libertad (MB89)
ALTA	2005-2010	2005-2010	Las Pampas (M362)

Fuente: (INAMHI. 2000-2008).

4.6.- Integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG son una herramienta poderosa para coleccionar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para propósitos particulares, con la finalidad de contribuir con información para la toma de decisiones. (Flores *et al.*, 2003). La integración de los SIG en los análisis y presentación de resultados de la presente tesis permitió cumplir los objetivos propuestos inicialmente.

La cartografía digital que se recopiló tanto del Instituto Geográfico Militar (IGM), del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) y del Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria del Ministerio de Agricultura (SIGAGRO), corresponden a la proyección WGS_1984_UTM, Zona 17S y los archivos digitales para trabajar con la herramienta SIG, están en formato .shp (shape file). El tamaño de la celda es de 100 x 100, de 455 columnas x 288 filas, en formato GRID, de tipo de fuente continuo y pixel de tipo flotante.

4.6.1 Generación del Modelo Cartográfico

El área representativa tiene tres zonas fisiográficas bien definidas que demuestran diferencias según el grado de pendiente y capacidad erosiva. Las mismas han sido analizadas y los resultados se presentan tanto a nivel cuenca de estudio como a nivel unidades hidrológicas.

Utilizando las cartas topográficas digitales y el modelo digital de elevación del IGM; información temática de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y CLIRSEN, imágenes satelitales y material bibliográfico disponible en internet (digital) y recibido por correo (papel, discos compactos) se construyó el "modelo cartográfico", el cual mediante la aplicación del programa ArcGIS 9.3 ® fue utilizado para la elaboración de los Mapas Temáticos.

Mapa Topográfico y Modelo de Elevación Digital (MED)

La cartografía base utilizada para realizar la delimitación de la cuenca experimental corresponde a las cartas topográficas digitales del IGM disponibles en la página web a escala 1:50.000, con una equidistancia altitudinal de 20 metros, las cuales se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Denominación de las cartas topográficas

79° 30' W	79° 15'	79° 00'	78° 45' W	
	LUZ DE AMERICA NIII-D1	SAN VICENTE DE AQUEPI NIII-D2	MANUEL CORNEJO ÑIII-C1	0° 20' S
	PATRICIA PILAR NIII-D3	STA MARIA DEL TOACHI NIII-D4	JATUNLOMA ÑIII-C3	0° 30'
	LOS VERGELES NIII-F1	PUCAYACU NIII-F2	SIGCHOS ÑIII-E1	0° 40'
				0° 50' S

Utilizando las capas de las curvas de nivel correspondientes, con cotas sobre el nivel del mar, y mediante el programa ArcGIS 9.3 ® se elaboró el mapa topográfico manteniendo la equidistancia original de la cartografía base.

El Modelo de Elevación Digital (MED) SRTM de 30 metros x 30 metros fue proporcionado por el CLIRSEN, con el datum WGS_1984_UTM_Zona_17S, al cual, mediante el programa ArcGIS 9.3 ®, se realizó el tratamiento correspondiente para su presentación.

A continuación se detallan los mapas generados bajo el esquema del modelo cartográfico:

4.6.1.1 Red de Drenaje

Para la elaboración del mapa de drenaje se utilizó como base las cartas topográficas digitales, de las cuales se extrajeron las respectivas capas de ríos (shape). Los ríos corresponden a cursos de agua permanentes. Este mapa se superpuso con las imágenes satelitales *Landsat 19870326 TM* y *19991114* para corroborar la distribución del drenaje en el espacio.

4.6.1.2 Delimitación de cuenca y subcuencas

Se definió el límite de la cuenca y subcuencas a partir de la divisoria de aguas, establecida por medio del modelo digital del terreno y la red de drenaje anteriormente mencionada. Posteriormente se corroboró la delimitación de la cuenca y subcuencas a partir del procesamiento con el programa HEC-GeoHMS ®.

4.6.1.3 Mapa de Orientaciones de ladera

El mapa de orientaciones o exposición del área de estudio se generó a partir del modelo de elevación digital (MED), con la aplicación del programa ArcGIS 9.3 ®. El cálculo se realizó a partir de la línea de máxima pendiente entre cada celda y las próximas. Los valores resultantes de la operación oscilan entre 0° y 360° siguiendo el sentido de las agujas del reloj, y representan la dirección de esta línea con respecto al norte (Moreno *et al.*, 2008). Este mapa representa la orientación del terreno con respecto al norte geográfico.

4.6.1.4 Mapa de Iluminación

Mediante el uso del programa ArcGIS 9.3 ®, se generó la cartografía que describe la iluminación o sombreado de las laderas con respecto a la dirección del flujo solar, considerando un azimut de 315°, que corresponde al Noroeste, y la altura del Sol a 45° de inclinación.

4.6.1.5 Mapa de Pendientes

A partir del MED se realizó un mapa de pendiente según su gradiente porcentual, mencionado en la sección 4.2.1.f. Se zonificó el área según intervalos de clases de pendientes empleando el programa ArcGIS 9.3 ®. Este mapa brinda información para establecer pautas de manejo de los suelos con el fin de minimizar los procesos erosivos.

4.6.1.6 Mapa de Suelos

Para la elaboración del mapa de suelos, se realizó a partir de la cartografía temática existente disponible en la página web del MAGAP⁵ (El mapa fue realizado por PRONAREG-ORSTOM en 1980). El MAGAP, para realizar la clasificación de los suelos utilizó el Sistema de Clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-2006) "Soil Taxonomy"⁶. Utilizando el programa ArcGIS 9.3 ® se procedió a extraer el área de estudio y con la hoja de cálculos Excel ® a realizar los gráficos.

4.6.1.7 Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo

El mapa de la cobertura vegetal y uso del suelo del área de estudio, se realizó a partir de la cartografía temática elaborada del CLIRSEN con la ayuda de la información disponible en la página web del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP), que comprende toda la cuenca del Guayas.

4.6.1.8 Mapa de Isoyetas

Para realizar el mapa de Isoyetas, se usó el mapa digital proporcionado por CLIRSEN de toda la cuenca del Guayas, el cual utilizó el período de 1985 a 2006, y mediante el programa ArcGIS 9.3 ®, se procedió a extraer la cuenca de estudio.

4.6.1.9 Mapa de Isotermas

Se utilizó el mapa digital proporcionado por CLIRSEN de toda la cuenca del Río Guayas, realizando para esto un estudio de correlación lineal temperatura-altura con los valores de las temperaturas medias registrados en las estaciones meteorológicas existentes en la cuenca. Se trazaron las isothermas de cada grado centígrado, con base en la topografía, aplicando para cada zona la correlación lineal más adecuada (CLISEN 2009 (2)). Luego con el programa ArcGIS 9.3 ®, se procedió a extraer la cuenca de estudio.

4.6.1.10 Mapa de Zonas Climáticas

Para realizar el mapa de las zonas climáticas de la cuenca de estudio, se usó el mapa climático de la cuenca del Guayas realizado por CLIRSEN. Para realizar esta selección de zonas, CLISEN 2009 (2) utilizó la clasificación climática propuesta por el Dr. Pierre Porrut, que está basada en parámetros simples y divididos en números limitados por categorías. Los parámetros utilizados para la elaboración del mapa climático son las precipitaciones totales anuales y sus regímenes, así como las temperaturas medias mensuales que, combinados dan los diferentes tipos de clima.

5

http://www.maqap.gob.ec/sinaqap/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=397&view=viewcategory&catid=6

⁶ "Una clasificación de suelos en función de varios parámetros (y propiedades) que se desarrollan en niveles: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Desarrollada y coordinada internacionalmente por el Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)". Fuente: Internet.

4.7 Cálculo del caudal líquido

El cálculo del caudal líquido, está constituido fundamentalmente por el escurrimiento superficial, que es el agua procedente de las precipitaciones que corre por la superficie terrestre y luego se reúne en los cauces de los ríos.

4.7.1 Método del S.C.S. para las abstracciones

Para calcular la lluvia efectiva, se utilizó el método desarrollado, en el año de 1972, por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service-S.C.S.) denominado Número de Curva (NC), como una función de la lluvia acumulada, la cobertura vegetal del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad antecedente. Este método permite calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración, que por diferencia se establece el escurrimiento (Monsalve, 2000).

Se utilizó dicho método, porque es ideal para situaciones que se dispone de poca información de datos en sitios de aforo, pero se debe conocer el tipo de suelo y la cobertura vegetal, puesto que la asociación, suelo-vegetación, se comporta de una misma manera frente a la infiltración. Sin embargo, es conocido que para una tormenta se generan diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo (Gaspari *et al.*, 2009).

A partir de la combinación suelo-vegetación, se pueden obtener las curvas de escurrimiento superficial ante una tormenta particular, debiendo tener presente que durante la primera parte de la curva caudal-tiempo existe un “umbral” de precipitación denominado abstracción (Ia), en el cual toda la precipitación es interceptada por la asociación suelo-vegetación, por lo tanto, en esa situación, el escurrimiento superficial es nulo. Una vez que el suelo se satura, se supera el valor de Ia, y comienza la segunda parte de la curva en la que aumenta el escurrimiento en función que aumenta la precipitación (López Cadena de Llano, 1998).

Este método asigna un valor a la combinación “suelo-vegetación” en función de las características hidrológicas del suelo denominado Número de Curva o Número Hidrológico (NC). Cada valor fue tabulado y difundido en publicaciones a nivel internacional. Para determinar el valor de NC, se utilizaron las herramientas del SIG que tiene como datos de entrada el mapa geológico, el mapa del suelo y el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal.

4.7.1.1 Obtención del Número de Curva (NC)

Primeramente, en una planilla de cálculo, se realizó una clasificación de los suelos de acuerdo a la establecida por el *Soil Conservation Service (1972)*, la cual ordena a los suelos en “grupos” según el comportamiento ante un evento de lluvia, es decir, la capacidad infiltración o escurrimiento. De esta forma, se clasificaron los diferentes tipos de suelo según su textura, estructura y permeabilidad, en el grupo que corresponda dependiendo así también su comportamiento hidrológico, denominados “*grupos hidrológicos*”.

En la Tabla 22 se presentan una clasificación del suelo según los grupos hidrológicos elaborada de varios autores (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1998, Gaspari *et al.*, 2009).

Tabla. 22. Descripción de los Grupos Hidrológicos.

	GRUPO HIDROLÓGICO			
	A	B	C	D
ESCORRENTIA	Baja	Moderadamente baja	Moderadamente alta	Alta
NC	Bajo	Moderadamente bajo	Moderadamente alto	Alto
INFILTRACIÓN	Alta	Moderada	Lenta	Muy lenta
CLASE TEXTURAL	Arenosa Arenosa-Franca Franco-Arenosa	Franco-Limosa Franca-Limosa	Franco-Arcillo-Arenosa Franco-Arcillo-limosa Franco-Arcillosa	Arcillo-Arenosa Arcillo-Limosa Arcillosa
OBSERVACIÓN	Suelos profundos. Alta tasa de transmisión de agua. De 0 a 10% de arcilla. Más arena.	Mediana a buena profundidad. De 10 a 30% de arcilla. Granulometría entre gruesa y fina. Más arena.	Suelos generalmente poco profundos (0,5 a 1 m). Permeabilidad lenta. De 30 a 70% de arcilla. Menos arena.	Suelos poco profundos. Nivel freático alto permanentemente. Presencia de sales. De 70 a 100% arcilla. Coloración negra, fumíferos. Material casi impermeable

Elaboración: propia

Para la definición de los grupos hidrológicos (GH) del suelo en la cuenca en estudio, se basó en la información recopilada y proporcionada por las diferentes instituciones gubernamentales como CLIRSEN, SIGAGRO, entre otras. Esta información de base fue para la Cuenca del Guayas, el mapa geológico y el mapa de suelo. La interpretación que para la clasificación de los suelos, fue en función de la escala en la que están elaborados los mapas originales (1:250.000).

Conocido el grupo hidrológico al que pertenecen los tipos de suelo de la cuenca de estudio, y teniendo en cuenta el uso y la cobertura vegetal que tienen, se asignaron los Números de Curva en las diferentes áreas de la cuenca. Para ello se utilizaron las Tablas de NC correspondientes que se encuentran disponibles en la bibliografía consultada (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1998; Manual en internet⁷). Obtenidos los Números de Curva para cada una de las áreas de la cuenca, se utilizó la herramienta de

⁷ http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/nrcs_runoff_curve_number_methods.htm#i1026928

los SIG para realizar el entrecruzamiento de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo con el mapa de Grupo Hidrológico (GH). De esta manera se obtuvo el mapa del Número de Curva (NC) ponderado para cada subcuenca utilizando el programa ArcGIS 9.3 ® de ESRI.

4.7.2 Modelización Matemática con HEC-HMS ®

Para el cálculo del caudal líquido, se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS ®, que es un programa de simulación hidrológica de tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una o varias cuencas (subcuencas) a partir de diversas condiciones de lluvias. Para la simulación, se aplican diversos métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa (Silva, 2005).

Para el desarrollo de la presente tesis, se aplicó la modelación del programa HEC-HMS ® a nivel diario, seleccionando métodos de cálculo globales, lo cual implicó que las características fisiográficas y climatológicas se consideraran homogéneas en toda la cuenca.

En base al supuesto de homogeneidad, la cuenca de estudio se dividió en tres zonas que representan *similitud fisiográfica y climatológica*. Estas zonas se denominan *alta, media y baja*, permitiendo obtener resultados representativos a nivel regional.

La zona alta desde la divisoria de aguas ubicada a 3640 msnm hasta una altura promedio de 1100 msnm, la zona media hasta 450 msnm promedio y la zona baja hasta 160 msnm, donde está ubicado el punto de aforo.

El modelo HEC-HMS ® tiene la capacidad de abrir automáticamente archivos con información topológica y topográfica obtenida a partir de un SIG, (Modelo Digital de Terreno), que facilita la entrega de los parámetros hidrológicos en forma distribuida para ser usados como inputs del modelo. La filosofía de este modelo con respecto a su integración SIG, es que ambas herramientas pueden utilizar información geoespacial, pero no dependen de ella para su ejecución.

Para este trabajo de tesis, el nexo entre el modelo HEC-HMS ® y los SIG, se utilizó la herramienta HECGeo-HMS, cuyos resultados descritos en *la sección 4.2.4* fueron utilizados como información de entrada para el modelo hidrológico.

En la Figura 19, se muestra el esquema de integración entre el modelo hidrológico HEC-HMS ® y SIG.

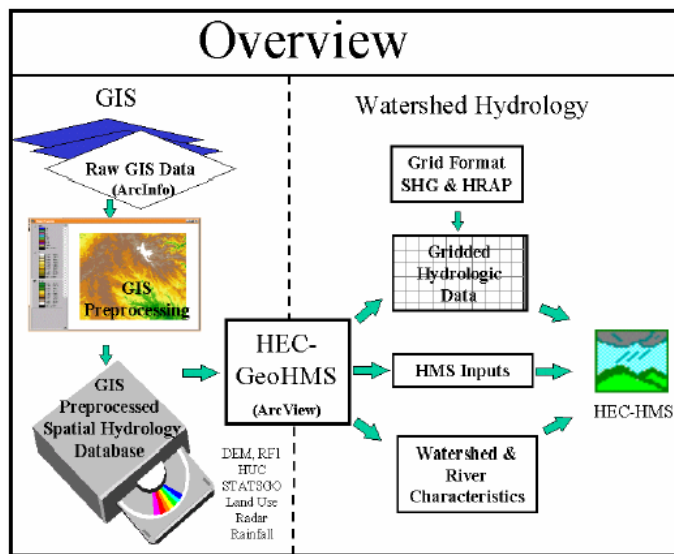


Figura 15. Esquema de integración entre el modelo HEC-HMS y SIG.
Fuente: Hammerly *et al.*, 2006

4.7.2.1 Selección de los Métodos de Cálculo en el programa HEC-HMS ®

Los métodos elegidos para simular las diferentes pruebas con el programa HEC-HMS ® son:

Modelo para Cálculo del Volumen de Esguerrimiento (Pérdidas por Infiltración)

Método Pérdida Inicial y Tasa Constante

Feldman (2000) indica que este modelo se basa en el concepto de que la tasa potencial máxima de pérdida de precipitación, f_c es constante a lo largo de un evento. De esta forma, si p_t es la intensidad de lluvia durante un intervalo de tiempo t a $t + \Delta t$, el exceso, pe_t , durante el intervalo es dado por la Fórmula 32:

$$pe_t = \begin{cases} p_t - f_c & \text{if } p_t > f_c \\ 0 & \text{otra condición} \end{cases}$$

Fórmula 32: Determinación del exceso durante el intervalo de tiempo.

Se suma una *pérdida inicial* (I_a), en el modelo para representar el almacenamiento por interceptación y depresión. El almacenamiento por interceptación es consecuencia de la absorción de la lluvia por la cobertura del suelo, incluyendo la vegetación de la cuenca. El almacenamiento en las depresiones esta dado por la topografía de la cuenca, el agua se almacena en estos lugares, una parte se infiltra y otra se evapora. Estas pérdidas ocurren previas al inicio del esguerrimiento superficial. Es decir, hasta que la precipitación acumulada en el área permeable exceda el volumen de pérdida inicial, no ocurre esguerrimiento. Entonces el exceso esta dado por la Fórmula 33:

$$pe_t = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum p_i < I_a \\ p_t - f_c & \text{si } \sum p_i > I_a \text{ y } p_t > f_c \\ 0 & \text{si } \sum p_i > I_a \text{ y } p_t < f_c \end{cases}$$

Fórmula 33: Determinación del exceso durante el intervalo de tiempo, según la.

Este método incluye el parámetro “tasa constante” que representa a las propiedades físicas del suelo de la cuenca y una condición inicial o “pérdida inicial” que representa al uso del suelo y condición de humedad antecedente.

La pérdida inicial (I_a) está determinada por el 20% a partir de la retención potencial máxima (S). $I_a = 0,2 * S$ (mm)

Se denomina S a la retención máxima de la lluvia caída absorbida por la cuenca. Para la obtención del valor de S se utiliza el Número de Curva (NC) del suelo para cada subcuenca, la ecuación usada se presenta en la Fórmula 34.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254, \text{ en mm}$$

Fórmula 34: Establecer la retención potencial máxima.

Si la cuenca está en una condición saturada, la pérdida inicial será aproximadamente cero. Si la cuenca está seca, la pérdida inicial se incrementará para representar la intensidad de precipitación máxima que puede caer en la cuenca sin producir escurrimiento; dependiendo del terreno de la cuenca, uso del suelo y tipo del suelo.

Silva *et al.*, 2005, manifiesta que a partir de estos antecedentes, se define tasa constante de pérdida, como la última capacidad de infiltración del suelo. El SCS (1986) clasificó los suelos en las cuencas en base a la capacidad de infiltración. Skagga y Khaleel (1982) publicaron estimaciones de tasa de infiltración para estos suelos, que se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Grupo de suelos y tasa de pérdidas de infiltración.

GRUPO DEL SUELO	RANGO DE TASA DE INFILTRACIÓN (mm/h)
A	7,62 – 11,43
B	3,81 – 7,62
C	1,27 – 3,81
D	0,00 – 1,27

Fuente: Silva et al., 2005.

Modelo de Transformación en Esgurrimiento Directo

Método del Hidrograma Unitario (HU) del SCS

En esta tesis, se utilizó el método propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos que está basado sobre los promedios de los hidrogramas unitarios (HU) derivados de los pluviógrafos y escorrentía para un extenso número de pequeñas cuencas agrícolas. Estos estudios encontraron que en hidrogramas unitarios de diversas cuencas, el tiempo de retraso (Tlag) es aproximadamente igual al 60% del tiempo de concentración (Tc) de la cuenca (Feldman. 2000).

La ecuación usada para calcular el Tlag fue la fórmula que propone Feldman 2000, en función del tiempo de concentración de la cuenca. Para calcular el tiempo de concentración se usó la Fórmula 31. Una vez obtenido el Tc se calcula el tiempo de retraso Tlag (horas) con la Fórmula 35.

$$Tlag=0,6*Tc$$

Fórmula 35: Cuantificación del Tlag.

Modelo del Flujo Base

Método de Valores Mensuales Constantes

Una parte de la precipitación puede percolarse hasta llegar al nivel freático. Este aumento en el agua subterránea puede descargarse ocasionalmente en los ríos como flujo de agua subterránea (llamado también flujo base o descarga de estiaje) si el nivel freático interseca los cauces de las corrientes de la cuenca. Por conveniencia es costumbre considerar al flujo total compuesto únicamente por dos partes: escorrentía directa y flujo base. La diferencia está realmente en el tiempo de llegada a la corriente y no en el camino seguido. Se considera al flujo base compuesto en su mayoría de agua subterránea (Linsey *et al.*, 1993).

En la tesis, se aplicó el Método de Valores Mensuales Constantes, que es el más sencillo y simple en el programa HEC-HMS ®. Los valores representan el caudal base mensual para cada mes, el cual es sumado al caudal directo en cada proceso de la simulación. En la Figura 20 se representa la composición del caudal final de salida y cómo influye en el hidrograma.

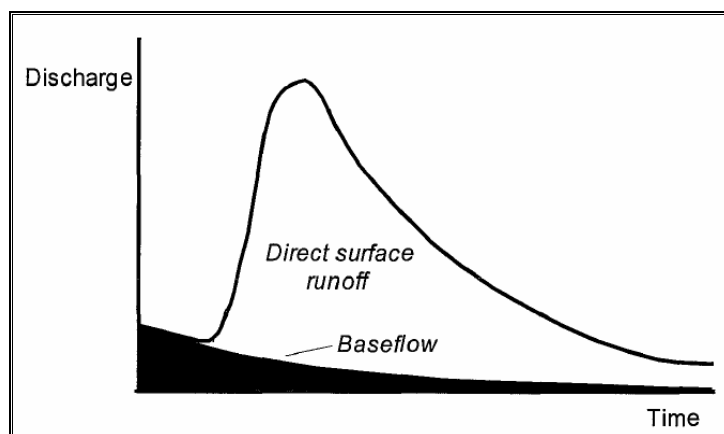


Figura 16. Esquema del caudal base y del caudal directo. Feldman. 2000

A partir, de una recomendación de Feldman (2000), este método se aplicó únicamente para la subcuenca baja, de acuerdo a un análisis de la variación anual de los caudales observados, según los períodos: lluvioso (entre enero y junio) y seco (de julio a diciembre).

Modelo de Tránsito de Caudales

Método de Muskingum Cunge

El modelo de Tránsito de Caudales corresponde al curso por donde circula el hidrograma. Se utilizó el método de Muskingum Cunge, que utiliza como parámetros de entrada, para cada uno de los cauces, el largo total del tramo (m), la pendiente del cauce (m/m), una sección transversal del río. La sección fue considerada de manera particular según dos diferentes formas de cauces: para los ríos de la parte media-alta la forma de un rectángulo, para lo cual se consideró el ancho del río; y para los ríos de la cuenca baja se eligió la forma de ocho puntos que requiere una sección transversal del cauce construida a partir de ocho puntos (x, y) (Figura 21). Además se definió el valor del número de Manning para cada planicie de inundación (del lado derecho y del izquierdo) y del lecho.

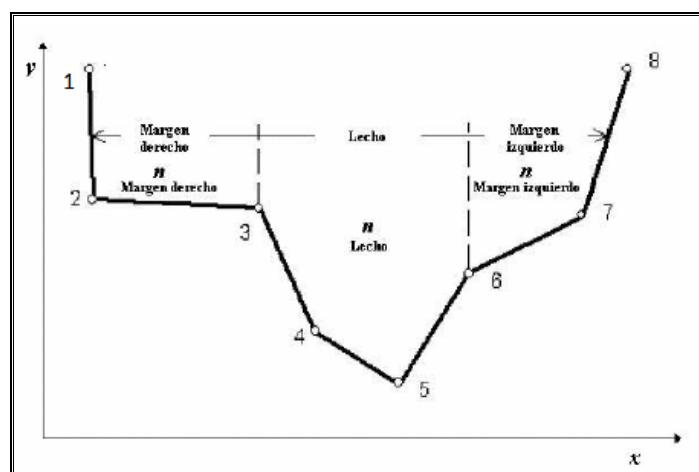


Figura 17. Esquema para describir la geometría de canal de 8 puntos. Adaptado de Feldman.2000

4.7.2.2 Selección de datos de lluvia

De acuerdo a Silva (2005), la respuesta de una cuenca es manejada por la precipitación que cae en la cuenca y la evapotranspiración desde ésta. La precipitación debe ser observada a partir de un evento histórico y los datos de precipitación histórica son útiles para la calibración y verificación de parámetros del modelo, para pronóstico a tiempo real y para evaluar el funcionamiento de diseños propuestos o regulaciones.

Para alimentar el modelo meteorológico para el desarrollo de la base de datos de HEC-HMS ®, se utilizó la precipitación diaria en milímetros (24 horas) de las estaciones que por su ubicación geográfica representan influencia en el área de la cuenca de estudio. La

información fue proporcionada por el INAMHI, vía correo electrónico, y desde los anuarios en la página web⁸. Para determinar el área de influencia de los pluviómetros a las subcuencas del área de estudio, se aplicó el método de los Polígonos de Thiessen utilizando el SIG. Las estaciones y los períodos utilizados tanto para la simulación como para las pruebas de *calibración y validación*, fueron presentadas en la sección 4.3.1

4.7.2.3 Selección de datos de caudal observado

Para ingresar los datos del caudal observado al modelo HEC-HMS ® y poder cumplir con las pruebas de calibración y validación, se utilizaron los aforos medidos en la estación H414 Toachi DJ Baba, la cual posee una serie de mediciones a partir de enero 2003 a junio 2010, que corresponde a observaciones diarias, presentadas en la sección 4.4.1. La información fue proporcionada por INAMHI, vía correo electrónico, y a través de la página web.

4.8 Pruebas de Calibración del Modelo HEC-HMS ®

La calibración consistió en la experimentación con varias combinaciones de valores de parámetros, en un esfuerzo por minimizar (o maximizar) alguna función criterio de optimización. Este procedimiento se puede realizar de forma manual o automática y la solución apropiada puede depender mucho del criterio utilizado durante el análisis. Las funciones objetivo son expresiones matemáticas que expresan una medida de la diferencia entre los valores observados y modelados, y por tanto, son usados en la calibración como una medida de rendimiento del modelo (Mena, 2010).

La calibración de un modelo radica en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aún de aquellos que se consideraban conocidos (IRENAT, 2002).

A partir de estas definiciones, para que los resultados obtenidos en la simulación con el programa HEC-HMS ®, representen confiabilidad al comportamiento de la misma, es necesario someter a los parámetros involucrados a pruebas de calibración, según los métodos elegidos.

Para cumplir la calibración de esta tesis, se utilizó dos series anuales de lluvia dentro de la serie total que fue presentada en la sección 4.3.1. En ambos casos la identificación de los parámetros, para la calibración, se realizó de forma manual, por el método de prueba y error, y posteriormente, se comprobó de forma automática usando la Función Objetivo que incluye en la herramienta de Optimización del programa HEC-HMS ®.

Para cuantificar la eficiencia del modelo y verificar la certeza de los datos obtenidos una vez ejecutado el programa, vale decir la relación entre el hidrograma observado y el hidrograma simulado, se utilizaron los conceptos de validación y verificación: coeficiente de determinación R^2 y el índice o coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970).

⁸ <http://www.inamhi.gov.ec/html/anuarios.htm>

El coeficiente de determinación R^2 , es el cuadrado del coeficiente de correlación, varía entre 0 y 1 y representa el porcentaje de varianza en los datos observados respecto de lo explicado por el modelo, es mejor mientras está más cercano a 1. Se usa como medida de dispersión del modelo y se calcula mediante la Fórmula 36 (Mena, 2010):

$$R^2 = \frac{\text{Cov}(Q_o, Q_s)}{\text{Sd}(Q_o) \times \text{Sd}(Q_s)}$$

Fórmula 36. Cuantificación de R^2

Donde:

Cov (Q_o , Q_s) es la covarianza entre los valores observados y los calculados con el modelo;

Sd (Q_o), es la desviación típica de los valores observados;

Sd (Q_s), es la desviación típica de los valores calculados con el modelo.

El problema de este coeficiente es que es muy sensible a desviaciones constantes o proporcionales, es decir que si cumple que $Q_s = a + bQ_o$, entonces R^2 será igual a 1 haciendo creer que el modelo responde perfectamente a la realidad. Otro problema es que es muy sensible a los valores extremos que hacen creer su valor dando nuevamente una falsa apariencia de buen ajuste (Mena. 2010). Por esta situación es recomendable tomar el resultado de R^2 como un valor inicial o referencial que debe ser complementado con otros índices que midan el grado de ajuste del modelo, como el coeficiente de Nash Sutcliffe.

El coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), corresponde a una medida del rendimiento o eficiencia de un modelo simulado respecto a un modelo perfecto (real) (Fórmula 37).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

Fórmula 37: Coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe

Donde:

o_i , son los valores observados, \bar{o} es la medida de los valores observados; y m_i son los valores calculados con el modelo.

El coeficiente NS presenta resultados menores o iguales a 1. Si el resultado es 1 la calibración es perfecta; si es cero significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, es decir, la media de los datos observados tendrá una capacidad predictiva igual a la del modelo. Los valores menores a cero implica que la medida tiene una capacidad predictiva más alta que el modelo, lo que implica que el modelo es muy malo.

Este coeficiente no es sensible al efecto de los valores proporcionales, pero sigue siendo sensible a los valores extremos. (Arias, 2010)

Para realizar esta comprobación se utilizó el programa disponible en Internet, basada en herramientas para análisis hidrográfico, en la web por sus siglas en inglés WHAT, desarrollado por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Purdue⁹ (EUA).

4.9 Sensibilidad de los parámetros del Modelo HEC-HMS ®

El análisis de sensibilidad mide cuanto pueden llegar a afectar a los resultados de un modelo variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros (Sarria *et al.*, 2008). Este análisis permite definir la importancia de cada parámetro, comprobar la lógica interna de un modelo (entender cómo funciona el modelo o por qué no funciona correctamente y aprender más acerca de su funcionamiento) y detectar si el modelo está sobreparametrizado, es decir si existen parámetros a los que el modelo resulta insensible (Mena, 2010).

En este trabajo de investigación, el análisis de sensibilidad se efectuó al mismo tiempo que se realizaron las pruebas de calibración manual indicadas anteriormente, puesto que al variar manualmente, mediante el método de prueba y error, los parámetros para encontrar el valor óptimo de calibración se identificaron los de mayor influencia en los resultados finales. Para realizar este análisis se modifica el parámetro a sensibilizar, mientras los otros se mantienen fijos.

4.10 Prueba de Validación del Modelo HEC-HMS ®

La validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período de tiempo diferente del utilizado en la calibración. Generalmente, el ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (IRENAT, 2002).

Para el presente trabajo de investigación, dependiendo de la mejor prueba de calibración que se obtenga para el período de lluvias seleccionado, se utilizaron parámetros que reemplazaron el período de precipitación, y obtener el hidrograma del caudal simulado para la prueba de validación.

⁹ https://engineering.purdue.edu/~what/compute_r2_nash_sutcliffe.html

4.11 Determinación de la Pérdida de Suelo

La erosión es un proceso natural producido por diferentes factores, pudiendo ser de tipo climático como las precipitaciones, o por la susceptibilidad del tipo de suelos, la pendiente e incluso la cobertura vegetal presente. Es normal que una cuenca hidrográfica presente cierta pérdida de suelo como producto de la erosión, que en muchos casos puede ser poco perceptible, para la cuenca de estudio se estimó la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica.

La estimación de la tasa de erosión hídrica refleja si los planes de manejo agrícola en un área determinada son eficaces y para esto se debe comparar con tasas tolerables de erosión para ese suelo adoptadas por las Autoridades competentes del país o publicadas por Organismos Internacionales de manejo de recursos naturales. Por ello, si se logra mantener o disminuir la erosión lo más cerca posible de la que ocurriría en condiciones naturales, se obtienen resultados beneficiosos, en adición al mantenimiento de la productividad del recurso. Menor erosión significa menores externalidades, es decir menor salida de sedimentos del predio con el agua de escurrimiento, lo que reduce la sedimentación en cauces y cuerpos de agua superficiales. La sedimentación colmata cauces y cuerpos de agua, reduciendo su capacidad de regulación hidrológica y resultando en desbordes y crecientes más frecuentes.

4.11.1 Método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E.)

A efectos de estimar la cantidad de sedimentos que se produce en la cuenca de estudio, se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E.), por sus siglas en inglés Universal Soil Loss Equation desarrollada por Wischmeier y Smith en 1965 y usada muy ampliamente a nivel mundial.

Este modelo permite evaluar la pérdida de suelo por erosión laminar y en regueros, estimando la tasa de erosión hídrica en toneladas de suelo perdido por hectárea de superficie durante un año (Mg.ha/año) en función de los parámetros de precipitación, suelo, relieve, cobertura del suelo y la aplicación o no de prácticas conservacionistas (Irurtia *et al.*, 2007)

La ecuación general de la U.S.L.E., fue presentada en la Fórmula 14, en la *sección* 2.6.3.1, donde se establecía la pérdida de suelo promedio anual (Mg.ha/año) a partir del producto de seis factores incidentes, como ser de erosión pluvial o de erosividad, de erodabilidad del suelo, topográfico (longitud y gradiente), ordenación de cultivos y control de erosión mediante prácticas de cultivo.

Para el presente análisis, al no contar con información detallada de las diferentes prácticas conservacionistas que se aplican en el área de estudio, se decidió por no utilizar este factor. Cabe mencionar que se identificaron las zonas en donde el potencial erosivo requiere intervención para su conservación.

Para esquematizar la secuencia en la obtención de cada uno de los parámetros que intervienen en la ecuación general de la U.S.L.E. y para representar la elaboración de los mapas temáticos correspondientes a *cada factor*, se construyó un Modelo Cartográfico, el

cual presenta como producto final la distribución espacial de los cambios en las tasas de erosión de la cuenca de estudio. La aplicación y desarrollo del modelo cartográfico se realizó empleando los Sistema de Información Geográfica (SIG) y el tratamiento de la información fue efectuado utilizando el software ArcGIS 9.3 ®.

La integración de los SIG en la U.S.L.E. 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).

Estructura del análisis

Para el desarrollo de este estudio, se realizaron los análisis en dos niveles: a nivel cuenca de estudio y a nivel unidades hidrológicas (subcuencas).

Primero, se realizaron los cálculos de estimación de los factores del modelo U.S.L.E. a nivel cuenca de estudio para observar el comportamiento general de cada uno de ellos. Luego, se realizó un estudio particular a nivel unidades hidrológicas para observar la influencia de los factores de la U.S.L.E. sobre cada una de las subcuencas que fueron creadas en el estudio de los parámetros morfométricos con HEC-Geo.

A continuación se detalla el procedimiento para la estimación de los factores del modelo U.S.L.E. a nivel cuenca de estudio:

4.11.1.1 Factor de Erosividad por la Lluvia “R”

El Factor de Erosividad (R) es la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión en función de las características físicas de la lluvia. A pesar que este factor puede ser calculado para una sola tormenta, se considera representativa la cuantificación de todas las tormentas significativas registradas durante el período.

Para la determinación del Factor “R”, se utilizaron los resultados obtenidos por la empresa Efficacitas para el Estudio de Impacto Ambiental dentro del Proyecto Multipropósito Baba (2006), el cual propone el siguiente procedimiento:

1.- Obtención de datos de lluvia (pluviometría):

Para el cálculo del factor de erodabilidad (R), es necesario tener la distribución temporal de la precipitación en el área de estudio, para eso se requiere la información pluviométrica o pluviográfica de las estaciones meteorológicas del sector, la cual fue proporcionada por el INAMHI y obtenida de los anuarios meteorológicos correspondientes.

Las estaciones meteorológicas utilizadas para caracterizar las condiciones de precipitación del área de estudio, se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Estaciones Meteorológicas utilizadas para el análisis de la Erosividad de la lluvia.

ESTACIÓN	COORDENADAS*	INFORMACIÓN
Puerto Ila	0° 29' 26.90678" S 79° 22' 0.14053" W H: 319,00 m	Lluvias máximas de 24 horas. Período 1982-1998.
La Pitita	0° 42' 4.68750" S 79° 27' 10.6797" W H: 100,00 m	Lluvias mensuales acumuladas. Período 1947-1992.
Salgana	0° 36' 30.35957" S 79° 25' 7.0987" W H: 154,00 m	Lluvias mensuales acumuladas. Período 1947-1992.
Pucayacu	0° 43' 1.55754" S 79° 7' 13.6670" W H: 252,00 m	Lluvias mensuales acumuladas. Período 1947-1992.
Chavica	0° 44' 27.33769" S 79° 24' 6.0799" W H: 140,00 m	Lluvias mensuales acumuladas. Período 1947-1992.
Sto. Domingo	0° 13' 58.89158" S 79° 11' 13.5007" W H: 522.00 m	Lluvias máximas de 24 horas. Período 1959-1987.
Las Pampas	0° 25' 39.60033" S 78° 58' 2.12265" W H: 1640,00 m	Lluvias máximas de 24 horas. Período 1965-1979.
Sigchos	0° 41' 58.01765" S 78° 53' 24.7023" W H: 2880,00 m	Lluvias máximas de 24 horas. Período 1964-1979.

Fuente: Efficacitas, 2006 (modificado). *Datum WGS84

2.- Cálculo de lluvias máximas de 24 horas:

Con el fin de homogenizar la información pluviométrica (lluvias máximas de 24 horas) disponible, se utilizó como base los datos de lluvia máxima en 24 horas de la estación Puerto Ila para calcular las lluvias máximas de 24 horas en las estaciones de La Pitita, Salgana, Pucayacu y Chavica partiendo de los datos de lluvias mensuales, debido a que estas estaciones no disponen de esta información. El procedimiento seguido es el siguiente:

Utilizando los datos de la estación "Puerto Ila", se realizó una relación entre la lluvia máxima de 24 horas para un determinado mes y la lluvia mensual acumulada de dicho mes, obteniendo así el "porcentaje de lluvia máxima de 24 horas en comparación con su correspondiente lluvia mensual" (ver Fórmula 38). Este proceso se realizó con todos los meses para cada año del período de 1982 a 1998.

$$\frac{Lluvia.máx.24h_{(i,j)}}{Lluvia.mensual_{(i,j)}} = \%Lluvia_{(i,j)}$$

Fórmula 38. Relación lluvias máximas 24 horas y lluvias mensuales acumuladas

Donde:

i: Mes del año (Enero – Diciembre)

j: Año del período (1982 – 1998)

Asumiendo que el comportamiento de la relación “lluvia máxima de 24 horas/lluvia mensual” (Fórmula 38) se mantiene en las estaciones meteorológicas La Pitita, Salgana, Pucayacu y Chavica, se calcularon los valores de *lluvia máxima de 24 horas* para cada mes durante el período correspondiente (1947-1992), utilizando los datos de lluvia mensual, de acuerdo a la siguiente relación: (ver Fórmula 39):

$$Lluvia.máx.24h[X]_{(i,j)} = Lluvia.mensual[X]_{(i,j)} \times \%Lluvia_{(i,j)}$$

Fórmula 39. Cálculo de la lluvia máxima 24 horas.

Donde:

X: Valor correspondiente a cada estación meteorológica (mes y año)

De esta manera se obtuvieron los datos de lluvias máximas de 24 horas para las estaciones meteorológicas La Pitita, Salgana, Pucayacu y Chavica.

Con los datos completos de *lluvias máximas de 24 horas* para cada mes y cada año de todas las estación meteorológica (ver Tabla 25), se procedió a calcular la lluvia máxima de 24 horas para cada mes correspondiente a 2 años como período de retorno¹⁰.

Este proceso se aplicó a todas las estaciones meteorológicas en estudio y fue realizado mediante el método de Gumbel, obteniendo la Tabla 25 con los valores de las lluvias máximas de 24 horas para todos los meses para 2 años de período de retorno.

¹⁰ Dentro del análisis de valores extremos, en este caso máximo, es importante considerar el *período de retorno*, que puede definirse como “el intervalo de tiempo promedio entre las ocurrencias reales de un evento hidrometeorológico de una magnitud dada o mayor”. Efficacitas (2006) consideró un período de retorno de 2 años.

Tabla 25. Lluvias Máximas de 24 horas para un período de retorno de 2 años.

	PUERTO ILA	SALGANA	LA PITITA	PUCAYACU	CHAVICA	SANTO DOMINGO	LAS PAMPAS	SIGCHOS
ENE	86,14	72,35	53,07	131,24	46,51	77,75	43,62	17,92
FEB	77,03	70,13	40,80	122,43	45,22	76,15	43,74	18,09
MAR	85,98	76,17	42,36	149,92	48,71	89,58	42,23	25,57
ABR	83,26	78,64	42,99	119,98	48,98	88,62	51,52	22,26
MAY	57,00	55,26	28,77	89,11	35,96	62,94	29,58	18,05
JUN	27,10	27,72	28,79	42,00	33,80	37,65	23,14	9,63
JUL	19,32	20,12	14,42	23,08	14,83	18,77	11,96	7,47
AGO	14,22	11,19	5,77	10,73	9,30	13,21	8,72	8,22
SEP	21,28	14,13	11,62	15,80	10,50	22,71	20,20	16,84
OCT	18,18	18,43	14,49	29,11	14,73	22,44	21,21	16,38
NOV	20,06	19,93	21,22	38,71	20,13	32,31	15,81	11,21
DIC	56,22	42,93	54,91	72,51	32,48	53,50	32,44	14,58

Fuente: Efficacitas, 2006

3.- Cálculo del Factor de Erosividad de la Lluvia (R)

Efficacitas utilizó el programa de Modelación Hidrológica TR-20¹¹ obteniendo como resultado la Tabla 26 que muestra los datos finales del factor de erosividad R de las estaciones meteorológicas de estudio, para un período de retorno de 2 años, considerando que para el caso de erosión producida por lluvia, en el período de retorno de 2 años ocurren precipitaciones normales.

Tabla 26. Factores de Erosividad por Lluvia (R).

ESTACIÓN	FACTOR R (Mj.mm/(ha.hr.año))
Puerto Ila	2838,46
La Pitita	915,43
Salgana	2197,93
Pucayacu	7635,81
Chavica	882,69
Santo Domingo	2980,32
Las Pampas	772,28
Sigchos	165,95

Fuente: Efficacitas (2006).

¹¹ Es un modelo de eventos simples, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos para asistir en la evaluación hidrológica de las avenidas para utilizarse en el análisis de proyectos de recursos de agua. El cual calcula la escorrentía directa para un evento de tormenta sintética, pudiendo ser calibrado con datos disponibles de lluvias e hidrogramas. Efficacitas (2006).

Para representar en un mapa la variación espacial de la erosividad de la lluvia en la cuenca de estudio, se diseñó un *esquema del proceso de modelo cartográfico* el cual inicia con los valores finales del factor R de cada una de las estaciones en estudio (Tabla 26), Para la aplicación de este modelo se empleó la herramienta de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y con el software ArcGIS 9.3 ® se generó el mapa temático respectivo.

4.11.1.2 Factor de Erodabilidad del Suelo “K”

Es una compleja propiedad que se entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración, es decir, a la erosión hídrica. Su valor está relacionado con las propiedades del suelo, es independiente de la pendiente y depende básicamente de la permeabilidad, porcentaje de materia orgánica, estructura y en el caso de las rocas, de la consolidación.

Para la determinación del Factor “K” en esta tesis, se utilizaron los resultados obtenidos por la empresa Efficacitas para el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Baba (2006), con los cuales se realizó el siguiente procedimiento utilizando el programa ArcGIS 9.3 ®:

1. Se efectuó una georreferenciación del mapa de erodabilidad de los suelos de Efficacitas (2006) y sobre ésta se cortó el archivo de la cuenca de estudio, identificando de esta manera que valores de K pertenecientes a la imagen de Efficacitas coincidían en el área de la cuenca de estudio.
2. Con los valores de K determinados y utilizando la herramienta de interpolación del Análisis Espacial del ArcGis se recalculó el valor de K para las áreas de la cuenca de estudio.

Con los valores de K recalculados se procedió a generar el mapa de la distribución espacial de la erodabilidad de los suelos en la cuenca de estudio utilizando el programa ArcGIS 9.3 ®.

4.11.1.3 Factor Topográfico “LS”

El factor topográfico LS considera el efecto de la topografía sobre la erosión, estimando de alguna manera la erosión promedio que tiene lugar sobre toda la pendiente, pero evidentemente, esta erosión no está distribuida uniformemente a lo largo de toda su longitud, por lo tanto las pérdidas de suelo por unidad de superficie aumentan con la longitud y la pendiente del terreno.

Para determinar los valores del factor LS, se construyó un esquema del proceso de modelo cartográfico para ser aplicado utilizando SIG, donde se expresa que partiendo del modelo de elevación digital del área representativa, se obtuvo como resultado final el mapa del factor topográfico del área de la cuenca de estudio. El tratamiento de los datos fue realizado con el software ArcGIS 9.3 ®.

4.11.1.4 Factor de Cobertura del Suelo “C”

Este factor considera el efecto de la cobertura vegetal sobre la erosión manifestándose a través de las especies cultivadas, el estado del ecosistema en sincronización con los períodos de lluvias, la forma y número de las labores sobre el suelo (en sentido diferente a las prácticas de conservación), la existencia de mayor o menor erosividad de la lluvia en el período del año en que se realiza el cultivo, las características de la materia orgánica acumulada sobre la superficie del suelo, entre otras (Oñate, 2004)

Para determinar los valores del coeficiente de cobertura del suelo, utilizamos el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal del CLIRSEN, identificando los diferentes usos del suelo que existen en la cuenca de estudio, que se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Clases de Usos del Suelo y Cobertura Vegetal.

Usos del Suelo y Cobertura Vegetal
Café y cacao, pastos
Monte y fruticultura
Bosque con claros de pastos, cultivos y arboricultura
Arboricultura
Pastos y cultivos, restos de bosque
Formación arbórea, densa, siempre verde; variante de las vertientes exteriores de Los Andes

Una vez obtenidos los valores de C para cada uso de suelo y mediante SIG, se elaboró el mapa representado la distribución espacial del factor de cobertura vegetal en la cuenca de estudio, con la ayuda del programa ArcGIS 9.3 ® para el tratamiento de los datos.

4.11.1.5 Estimación de la Pérdida de Suelo “A” (Erosión Actual y Erosión Tolerante del Suelo)

Para la evaluación de las *pérdidas de suelo (erosión real o erosión actual)* se utilizó el producto final de la ecuación universal de pérdida de suelo (R.K.LS.C), cuyo resultado se compara con los parámetros de tolerancia de las pérdidas de suelo establecidos por la Autoridad Nacional rectora del manejo de suelos u Organismos Internacionales.

Una vez calculados los cuatro factores de la ecuación universal U.S.L.E. con SIG, se convirtieron los factores K y C de vectorial a raster para poder realizar la operación aritmética del producto a través de la herramienta “Raster Calculator” del Análisis Espacial del programa ArcGIS 9.3 ®. Los otros factores R y LS ya son raster. Se multiplicaron las capas de dichos factores obteniendo como resultado una imagen raster stretched (a) (valores extendidos) de toda la cuenca de estudio en la que se representa las áreas con pérdida de suelo promedio por erosión hídrica en Mg.ha/año para cada una de las celdas de una hectárea de superficie en que se dividió el área de estudio.

La evaluación de tolerancias de pérdida de suelo en un terreno es un aspecto básico para determinar el uso y manejo más adecuado de éste. La erosión tolerable se refiere a la cantidad máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenible (Gaspari *et al.*, 2009) Wischmeier y Smith (1978)

mencionaron que la tolerancia para la pérdida de suelo para los Estados Unidos varía de 2,50 a 12,36 Mg.ha/año, aunque suelos profundos que favorecen el desarrollo radical de los cultivos podrían exceder las 12,36 Mg.ha/año de tolerancia en la pérdida de suelo.

Bajo este criterio, para evaluar el riesgo de pérdida de suelos por erosión hídrica, en la cuenca de estudio, se utilizaron los valores indicados en la Tabla 28, propuestos por FAO, PNUMA y UNESCO (1981), dentro de la "Clasificación Provisional para la Degradación de los Suelos".

Tabla 28. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial.

Pérdida de suelo (Mg.ha⁻¹.año⁻¹)	Grados de erosión hídrica
< 10	Nulo
10 -50	Moderado
50 - 200	Alto
> 200	Muy alto

Con esta información, a la imagen raster obtenida anteriormente (a), se le realizó una clasificación de tres clases, con los tres primeros rangos de pérdida de suelo de la Tabla 28, adaptados a los valores obtenidos en el mapa (a), de esta manera se obtuvo otro mapa raster de toda la cuenca de estudio con los rangos de pérdida de suelo tolerables (b).

Finalmente, se realizó un estudio particular a nivel unidades hidrológicas con el fin de observar la influencia de los factores U.S.L.E. sobre las siete subcuencas. Para este análisis se realizaron dos procedimientos, según el tipo de archivos geoespacial:

1- Para los factores LS, R y A, que son archivos raster:

a.- Para el factor LS:

La capa de la cuenca de estudio, creada con HECGeo, que contiene las siete subcuencas, se convirtió en archivo raster, este archivo se cruzó con la capa raster reclasificada de las pendientes del área de estudio realizando la operación del área tabulada, obteniendo como resultado una Tabla que contiene la información entrecruzada de los dos archivos. A este archivo se exportó como base de datos (.dbf) y se abrió desde el explorador de Windows con el programa Excel ® realizando los análisis pertinentes.

b.- Para el factor R:

El archivo final raster de las subcuencas del área de estudio se cruzó con la capa raster reclasificada de la interpolación de los valores de R efectuando el cálculo del área tabulada, generando una Tabla que almacena la información entrecruzada de los dos archivos. Esta Tabla se exportó como base de datos (.dbf) y se abrió desde el explorador de Windows con el programa Excel ® realizando los análisis pertinentes.

c.- Para el factor A:

El archivo final raster de las subcuencas del área de estudio se cruzó con la capa raster reclasificada obtenida del producto final de la multiplicación de los factores de la U.S.L.E. (R.K.LS.C) mediante la operación área tabulada, generando una Tabla que almacena la información entrecruzada de los dos archivos. Esta Tabla se exportó como base de datos (.dbf) y se abrió desde el explorador de Windows con el programa Excel ® realizando los análisis pertinentes.

2- Para los factores K y C, que son archivos vectoriales:

Se realizó la intersección de la capa vectorial que contiene las siete subcuencas del área de estudio con los archivos vectoriales creados durante el proceso de generación del factor K y del factor C, respectivamente. Obteniendo, para cada caso, un archivo que almacena la información entrecruzada de los dos archivos vectoriales. Respectivamente, a este archivo se exportó como base de datos (.dbf) y se abrió desde el explorador de Windows con el programa Excel ® realizando los análisis pertinentes para cada factor.

Con el programa Excel ® se realizaron los análisis correspondientes para calcular los valores ponderados, según la superficie de cada subcuenca, de los factores K, LS y C; y el valor medio para el factor R de la U.S.L.E. que influye en las unidades hidrológicas, así como los gráficos respectivos.