

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

## CAPÍTULO N°1

### RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Mapas o cartografía de la zona.....	1
Cartografía base.....	1
El Paute una prioridad Nacional.....	1
Descripción de la cuenca.....	2
Situación climática.....	4
Parte media y baja de la cuenca del Paute.....	5
Parte alta de la cuenca del Paute.....	6
Subcuencas.....	8
Subcuencas que conforman la parte Alta de la cuenca.....	8
Subcuencas que conforman la parte Alta 1 de la cuenca.....	8
Subcuencas que conforman la parte Alta 2 de la cuenca.....	11
Subcuencas que conforman la parte Media de la cuenca.....	12
Subcuencas que conforman la parte Media 1 de la cuenca.....	12
Subcuencas que conforman la parte Media 2 de la cuenca.....	14
Subcuencas que conforman la parte Baja de la cuenca.....	15
Cobertura Vegetal.....	17
Áreas Protegidas.....	18
Parque Nacional de Cajas.....	19
Páramo de Angas.....	21
Datos Hidrometeorológicos de la zona.....	22
Estaciones Meteorológicas.....	23
Estaciones meteorológicas en la cuenca Alta.....	24

Estaciones meteorológicas en la cuenca Media.....	24
Estaciones meteorológicas en la cuenca Baja.....	25
Estaciones Hidrológicas.....	26
Estaciones Hidrológicas en la cuenca Alta.....	27
Estaciones Hidrológicas en la cuenca Media.....	28
Estaciones Hidrológicas en la cuenca Baja.....	28
Datos Geomorfométricos de la zona.....	28
Características de la cuenca.....	29
Localización.....	29
Características Morfométricas de la cuenca.....	31
Tamaño de la cuenca.....	31
Forma de la cuenca.....	33
Pendiente del cauce principal.....	33
Características climatológicas de la cuenca.....	34
Longitud del cauce principal.....	34

## **CAPÍTULO N°2**

### **MANEJO DE LA INFORMACIÓN**

2.1 Introducción y revisión.....	35
2.1.1 Introducción.....	35
2.1.1.1 Modelo Hidrológico.....	36
2.1.1.1.1 Definición de Modelo Hidrológico.....	36
2.1.1.1.2 Clasificación de los modelos.....	37
2.1.1.1.2.1 Modelos Físicos.....	37
2.1.1.1.2.2 Modelos Analógicos.....	38

2.1.1.1.2.3	Modelos Matemáticos.....	38
2.1.1.1.2.3.1	Continuos y Eventos.....	39
2.1.1.1.2.3.2	Concentrados y Distribuidos.....	39
2.1.1.1.2.3.3	Determinísticos y Estocásticos.....	40
2.1.1.1.2.3.4	Empíricos y Conceptuales.....	40
2.1.2	Revisión del paquete HEC-HMS 3.0.....	41
2.1.2.1	Estimación de parámetros.....	42
2.2	Imágenes y sistemas de coordenadas.....	47
2.2.1	Proyecciones cartográficas.....	47
2.2.1.1	Proyección transversa de Mercator.....	47
2.2.1.2	Proyección universal transversal de Mercator.....	50
2.2.1.3	Proyección Transversa de Mercator en zonas de 3°.....	52
2.2.2	Imágenes.....	53
2.3	Uso de mapas y modelos SIG.....	54
2.3.1	Mapas.....	54
2.3.2	Sistemas de información geográfica (SIG).....	56
2.3.2.1	Incorporación y almacenamiento de datos.....	57
2.4	Delineación de la cuenca.....	60
2.5	Generación de mapas de uso de suelo y tipo de suelo.....	61
2.5.1	Generación de mapas de uso de suelo.....	61
2.5.1.1	Definición de unidades de uso.....	62
2.5.1.1.1	Vegetación arbórea y arbustiva.....	62
2.5.1.1.2	Vegetación arbustiva.....	63
2.5.1.1.3	Pasto.....	64
2.5.1.1.4	Cultivo.....	65

2.5.1.1.4.1 Cultivos indiferenciados.....	66
2.5.1.1.4.2 Cultivos diferenciados.....	67
2.5.1.1.5 Cuerpos de agua.....	68
2.5.1.1.6 Erial.....	68
2.5.1.1.7 Otros usos.....	70
2.5.1.2 Reclasificación de uso del suelo representativos en cada subcuenca.....	70
2.5.1.2.1 Uso del suelo que conforman la parte Alta de la cuenca.....	70
2.5.1.2.1.1 Uso del suelo que conforman la parte Alta 1 de la cuenca.....	70
2.5.1.2.1.2 Uso del suelo que conforma la parte Alta 2 de la cuenca.....	71
2.5.1.2.2 Uso del suelo que conforma la parte Media de la cuenca.....	71
2.5.1.2.2.1 Uso del suelo que conforma la parte Media 1 de la cuenca.....	71
2.5.1.2.2.2 Uso del suelo que conforma la parte Media 2 de la cuenca.....	72
2.5.1.2.3 Uso del suelo que conforma la parte Baja de la cuenca.....	72
2.5.1.3 Metodología para uso del suelo.....	73
2.5.2 Generación de mapas de tipo de suelos.....	74
2.5.2.1 Suelo.....	74
2.5.2.2 El perfil del suelo.....	74
2.5.2.2.1 Textura.....	76
2.5.2.2.2 Taxonomía.....	76
2.5.2.2.3 Drenaje.....	79
2.5.2.2.4 Profundidad.....	80
2.5.2.3 Metodología para tipo de suelo.....	81
2.6 Superposición de mapas de uso del suelo y tipo de suelo para la obtención del Grupo Hidrológico del Suelo (CN).....	84
2.7 Edición y elaboración de mapas finales.....	86

2.8	Elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT).....	87
2.8.1	Clasificación del rango de pendientes a partir del MDT.....	89
2.9	Cálculo del tiempo de concentración y retardo.....	90
2.9.1	Cálculo del tiempo de concentración.....	90
2.9.2	Cálculo del tiempo de retardo.....	91
2.10	Cálculo del coeficiente de escurrimiento.....	92

## **CAPÍTULO N°3**

### **APLICACIÓN DEL PAQUETE HEC-HMS 3.0**

3.1	Metodología.....	94
3.1.1	Características principales del paquete HEC-HMS.....	94
3.1.1.1	Definición del HEC-HMS.....	94
3.1.1.2	Funcionamiento del paquete HEC-HMS.....	95
3.1.1.3	Elementos del paquete HEC-HMS.....	97
3.1.2	Situaciones hidrológicas que se modelan en HEC-HMS.....	99
3.1.3	Información que requiere el paquete HEC-HMS.....	100
3.1.4	Información sobre la precipitación histórica o de diseño.....	101
3.1.5	Información sobre las condiciones de humedad del suelo.....	102
3.1.6	Información sobre la morfometría de las subcuencas.....	103
3.1.7	Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.....	104
3.1.8	Información sobre el tránsito de caudales a través de canales y embalses.....	105
3.1.9	Simulación realizada por el paquete HEC-HMS.....	106
3.2	Aplicación.....	108
3.2.1	Calibración del modelo HEC-HMS para la cuenca del Paute.....	108

3.2.1.1	Estimación de parámetros.....	108
3.2.1.1.1	Precipitación.....	109
3.2.1.1.2	Pérdidas.....	110
3.2.1.1.2.1	Método pérdida inicial y tasa constante.....	110
3.2.1.1.3	Modelación de escurrimiento directo.....	113
3.2.1.1.3.1	Modelo del hidrograma unitario de Clark.....	113
3.2.1.1.3.1.1	Tiempo de concentración.....	114
3.2.1.1.3.1.2	Coeficiente de almacenamiento.....	114
3.2.1.1.4	Modelación del flujo base.....	115
3.2.1.1.5	Modelación de tránsito de caudales en canales.....	117
3.2.1.1.5.1	Modelo del tiempo de retardo.....	117
3.2.1.2	Pruebas de Calibración.....	119
3.2.1.2.1	Primera Prueba.....	119
3.2.1.2.2	Segunda Prueba.....	123
3.2.1.2.3	Tercera Prueba.....	128
3.2.1.2.4	Cuarta Prueba.....	133
3.2.2	Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo HEC-HMS para la cuenca del Paute.....	138
3.2.2.1	Pérdida inicial.....	138
3.2.2.2	Tasa constante de pérdida.....	139
3.2.2.3	Porcentaje de impermeabilidad.....	140
3.2.2.4	Coeficiente de almacenamiento.....	141
3.2.2.5	Tiempo de concentración.....	142
3.2.3	Validación de parámetros del modelo HEC-HMS para la cuenca del Paute .....	143
3.2.4	Verificación de los resultados obtenidos del modelo HEC-HMS para la cuenca del Paute.....	146

## **CAPÍTULO N°4**

### **COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON EL MODELO OPERATIVO EMILE**

4.1	Modelo Hidrológico EMIL.....	148
4.1.1	Parámetros del modelo GR3.....	149
4.1.2	Ajuste y Validación del modelo.....	150

## **CAPÍTULO N°5**

### **MANUAL INTRODUCTORIO PARA EL USO DEL PAQUETE HEC-HMS 3.0**

5.1	Breve Introducción.....	155
5.2	Configuración inicial.....	155
5.3	Descripción de la pantalla del HEC-HMS 3.0.....	156
5.4	El modelo de la cuenca.....	159
5.5	Especificaciones de control.....	163
5.6	Ingreso de datos de lluvia.....	164
5.7	Modelos meteorológicos.....	166
5.8	Corrida del programa HEC-HMS.....	168
5.9	Listado de resultados.....	169

## **CAPÍTULO N°6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1	Conclusiones.....	171
6.2	Recomendaciones.....	174

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>175</b>
--------------------------------------	------------

<b>GLOSARIO DE DEFINICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS.....</b>	<b>179</b>
--	------------

## ÍNDICE DE ANEXOS

### ANEXO A

- A.1 Estaciones Meteorológicas que existen en la cuenca del Paute.....189

### ANEXO B

- B.1 Estaciones Hidrológicas que existen en la cuenca del Paute.....191

### ANEXO C

- C.1 Datos Geomorfométricos, Tiempo de Concentración y Tiempo de Retardo.....193

### ANEXO D

- D.1 Tabla de suelos de taxonomía (Soil Taxonomy USDA 1975).....195

### ANEXO E

- E.1 CN en función del uso del suelo y del grupo hidrológico del suelo.....197

### ANEXO F

- F.1 Tabla del coeficiente de escurrimiento.....199

### ANEXO G

- G.1 Cálculo del coeficiente de escurrimiento promedio por subcuencas....201



## **ANEXO H**

H.1 Resultados de los modelos EMILE y HEC-HMS.....	203
--	-----

## **ANEXO I**

I.1 Mapa de Cartografía Base.....	211
I.2 Mapa de Zonas de precipitación promedio anual.....	212
I.3 Mapa de Subcuencas Hidrográficas.....	213
I.4 Mapa de Uso del suelo.....	214
I.5 Mapa de textura del suelo.....	215
I.6 Mapa de taxonomía del suelo.....	216
I.7 Mapa de tipo de suelo.....	217
I.8 Mapa del modelo digital del terreno.....	218
I.9 Mapa de CN predominante por subcuenca hidrográfica.....	219
I.10 Mapa de estaciones meteorológicas e hidrológicas.....	220

## **ÍNDICE DE CUADROS**

### **CAPÍTULO N°3**

3.1 Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, HEC-HMS.....	122
3.2 Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 2, HEC-HMS.....	127
3.3 Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 3, HEC-HMS....	132
3.4 Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 4, HEC-HMS.....	137

3.5	Análisis de sensibilidad variando la pérdida inicial.....	139
3.6	Análisis de sensibilidad variando la tasa constante de pérdida.....	140
3.7	Análisis de sensibilidad variando el porcentaje de impermeabilidad..	141
3.8	Análisis de sensibilidad variando el coeficiente de almacenamiento.	142
3.9	Análisis de sensibilidad variando el tiempo de concentración.....	143
3.10	Hietograma e Hidrograma obtenido en la validación del paquete HEC-HMS.....	145

## **CAPÍTULO N°4**

4.1	Hidrograma de la comparación de los resultados con los modelos EMIL y HEC-HMS.....	154
-----	--	-----

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

### **CAPÍTULO N°2**

2.1	Representación típica HEC-HMS del escurrimiento de una cuenca...46
2.2	Proyección transversa de Mercator.....48
2.3	Cilindro con dos líneas estándar.....49
2.4	Esquema de una zona de proyección transversa de Mercator.....50
2.5	Zonas universales transversas de Mercator.....51
2.6	Componentes de un SIG y relaciones establecidas entre cada una de ellas.....57
2.7	Comparación entre modelo vector y raster.....58
2.8	Muestra de disposición de horizontes.....75
2.9	Análisis espacial – Superposición de mapas (coberturas temáticas)..85
2.10	3D del modelo digital del terreno (MDT).....88

2.11 Malla de píxeles.....	88
----------------------------	----

### **CAPÍTULO N°3**

3.1 Esquema del flujo base.....	116
3.2 Esquema del tiempo de retardo.....	118
3.3 Factor de determinación PRUEBA 1.....	121
3.4 Factor de determinación PRUEBA 2.....	126
3.5 Factor de determinación PRUEBA 3.....	131
3.6 Factor de determinación PRUEBA 4.....	136
3.7 Factor de determinación para la validación del paquete HEC-HMS en la cuenca del Paute.....	144

### **CAPÍTULO N°4**

4.1 Factor de determinación, EMILE.....	152
4.2 Factor de determinación EMILE vs HEC-HMS.....	153

### **CAPÍTULO N°5**

5.1 Configuración inicial.....	156
5.2 Pantalla principal del HEC-HMS 3.0.....	159
5.3 Modelo de la cuenca.....	159
5.4 Componentes del modelo de la cuenca.....	161
5.5 Ingreso de la subcuenca.....	161
5.6 Métodos requeridos, HEC-HMS.....	163
5.7 Especificaciones de control, HEC-HMS.....	164

5.8	Ingreso de datos de lluvia, HEC-HMS.....	166
5.9	Modelo meteorológico, HEC-HMS.....	167
5.10	Especificaciones de hietograma, HEC-HMS.....	167
5.11	Selección de la corrida (RUN 1), HEC-HMS.....	168
5.12	Corrida del programa HEC-HMS.....	169
5.13	Tabla de resultados, HEC-HMS.....	170
5.14	Gráfico de hietograma e hidrograma, HEC-HMS.....	170

## **ÍNDICE DE TABLAS**

### **CAPÍTULO N°1**

1.1	Información de la Estación Meteorológica MA45.....	24
1.2	Información de la Estación Meteorológica M-067.....	24
1.3	Información de la Estación Meteorológica M-138.....	24
1.4	Información de la Estación Meteorológica M-141.....	24
1.5	Información de la Estación Meteorológica M-664.....	25
1.6	Información de la Estación Meteorológica M-045.....	25
1.7	Información de la Estación Meteorológica M-217.....	25
1.8	Información de la Estación Meteorológica M-538.....	25
1.9	Información de la Estación Hidrológica H-895.....	27
1.10	Información de la Estación Hidrológica H-894.....	28
1.11	Información de la Estación Hidrológica H-898.....	28
1.12	Localización Geográfica, altura media y área de la cuenca del Paute.....	30

### **CAPÍTULO N°2**

2.1	Modelos de volumen de escurrimiento.....	44
2.2	Modelos de escurrimiento directo.....	45
2.3	Modelos de flujo base.....	45
2.4	Modelos de Tránsito.....	45
2.5	Áreas de la micro cuencas representantes en la cuenca Alta 1.....	60
2.6	Áreas de la micro cuencas representantes en la cuenca Alta 2.....	60
2.7	Áreas de la micro cuencas representantes en la cuenca Media 1.....	60
2.8	Áreas de la micro cuencas representantes en la cuenca Media 2.....	61
2.9	Áreas de la micro cuencas representantes en la cuenca Baja.....	61
2.10	Uso del suelo que más predomina en cada subcuenca.....	74
2.11	Las categorías de texturas y sus correspondientes clases texturales son utilizadas en la cuenca del Paute.....	76
2.12	Las categorías de taxonomía según orden, sub orden y gran grupo son utilizadas en la cuenca del Paute.....	78
2.13	Clases de drenaje, sigla y descripción son utilizadas en la cuenca del Paute.....	80
2.14	Clases de profundidad efectiva del suelo, sigla, descripción y rango son utilizados en la cuenca del Paute.....	80
2.15	Tipo de suelo A.....	81
2.16	Tipo de suelo B.....	82
2.17	Tipo de suelo C.....	82
2.18	Tipo de suelo D.....	83
2.19	Tipo de suelo que más predomina en cada subcuenca.....	84
2.20	Número Hidrológico del suelo o CN que más predominan en las cinco subcuencas mencionadas, obtenidas mediante el tipo de suelo y uso de suelo.....	86
2.21	Rango de pendientes para determinar el MDT.....	89

## CAPÍTULO N°3

3.1	Información sobre la precipitación histórica de diseño.....	101
3.2	Información sobre las condiciones de humedad del suelo.....	102
3.3	Información sobre la morfometría de las subcuencas.....	103
3.4	Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escurrimiento.....	104
3.5	Información sobre el tránsito de caudales a través de canales y embalses.....	105
3.6	Tipo de simulación realizada por el paquete HEC-HMS.....	107
3.7	Grupo de suelos y tipo de pérdidas de infiltración.....	112
3.8	Restricciones para parámetros de calibración.....	115
3.9	Área de la subcuenca Alta.....	119
3.10	Parámetros del modelo de pérdidas para la subcuenca Alta.....	119
3.11	Parámetros del modelo de escurrimiento directo para la subcuenca Alta.....	120
3.12	Flujo base mensual constante para la subcuenca Alta.....	120
3.13	Parámetros del modelo de flujo de canales para la subcuenca Alta..	121
3.14	Área de influencia de las Estaciones Meteorológicas para la subcuenca Alta.....	121
3.15	Áreas de las subcuencas Alta y Media.....	123
3.16	Parámetros del modelo de pérdidas para las subcuencas Alta y Media.....	123
3.17	Parámetros del modelo de escurrimiento directo para las subcuencas Alta y Media.....	124
3.18	Flujo base mensual constante para las subcuencas Alta y Media....	124
3.19	Parámetros del modelo de flujo de canales para las subcuencas Alta y Media.....	125

3.20	Área de influencia de las Estaciones Meteorológicas para las subcuencas Alta y Media.....	125
3.21	Áreas de las subcuencas Alta, Media y Baja.....	128
3.22	Parámetros del modelo de pérdidas para las subcuencas Alta, Media y Baja.....	128
3.23	Parámetros del modelo de escurrimiento directo para las subcuencas Alta, Media y Baja.....	129
3.24	Flujo base mensual constante para las subcuencas Alta, Media y Baja.....	129
3.25	Parámetros del modelo de flujo de canales para las subcuencas Alta, Media y Baja.....	130
3.26	Área de influencia de las Estaciones Meteorológicas para las subcuencas Alta, Media y Baja.....	130
3.27	Área de la cuenca del Paute.....	133
3.28	Parámetros del modelo de pérdidas para la cuenca del Paute.....	133
3.29	Parámetros del modelo de escurrimiento directo para la cuenca del Paute.....	134
3.30	Flujo base mensual constante para la cuenca del Paute.....	134
3.31	Parámetros del modelo de flujo de canales para la cuenca del Paute.....	135
3.32	Área de influencia de las Estaciones Meteorológicas para la cuenca del Paute.....	135
3.33	Resumen de la verificación de resultados obtenidos del modelo HEC-HMS en la cuenca del Paute.....	147
3.34	Resumen de la verificación de resultados obtenidos mediante la validación del modelo HEC-HMS en la cuenca del Paute.....	147

# **CAPÍTULO 1**

## **RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

### **1.1 MAPAS O CARTOGRAFÍA DE LA ZONA**

#### **1.1.1 CARTOGRAFÍA BASE**

##### **1.1.1.1 EL PAUTE UNA PRIORIDAD NACIONAL**

La cuenca del Río Paute alberga a la más importante central hidroeléctrica del Ecuador. Más del 60% de la producción eléctrica del país es generada por la central Daniel Palacios en funcionamiento normal, con menos del 2% de la superficie nacional es entonces de vital importancia para el resto del país.

El conocimiento de los regímenes hidrológicos de esta cuenca se torna primordial, pues todo déficit hídrico prolongado, repercute en el almacenamiento de agua en el reservorio, privando al Ecuador de su fuente de electricidad principal. Ese fue el caso de los últimos estiajes de 1991, 1992, 1995 y 1996 durante los cuales diferentes partes de la cuenca del Paute estuvieron privadas de precipitaciones y sumergieron al país en periodos de racionamiento eléctrico que llegaron a alcanzar hasta tres meses consecutivos. En tales situaciones de crisis, los caudales descendieron rápidamente, estimándose en menos de 15 días luego de la interrupción de las lluvias, el



nivel de la represa puede bajar hasta una cota crítica, lo que provoca el inicio de los racionamientos eléctricos.

Estas restricciones pueden sobrevivir durante cualquier periodo del año con una probabilidad más alta entre Noviembre y Febrero, debido al período seco en la zona baja y la influencia climática amazónica situada entre las dos estaciones lluviosas de la influencia del Pacífico.

Esta situación se ha repetido con mayor frecuencia en los últimos años, hay evidencia en el uso consuntivo del agua e igualmente en ciertos índices que podrían indicar una disminución de las precipitaciones, el incremento del consumo eléctrico que directamente es el mayor responsable se acercó al 10% en los últimos 2 años sin ningún crecimiento de la capacidad de generación eléctrica.<sup>1</sup>

Por una parte la carencia de pluviosidad o de lluvia, dentro de esta región ocasiona para el país una crisis energética que tiende a ser crítico, situación que se volvió alarmante durante el año de 1995.

#### **1.1.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA**

La cuenca drenada por el río Paute y sus afluentes, nace en la región interandina y alcanza luego la cuenca amazónica. Su altitud en la zona interandina, varía entre 2100 y 4400 m.

---

<sup>1</sup> Hidrología de la Cuenca Amazónica

Esquemáticamente esta región se puede dividir en dos zonas bien diferenciadas:

- *La parte occidental y central de la cuenca.-*

Aguas arriba de la confluencia de los ríos Paute y Gualaceo. El paisaje de la parte alta de esta cuenca está constituido por bosques primarios y/o páramos<sup>2</sup> con grandes extensiones de relieves atenuados. Los ríos fluyen en valles estrechos con laderas arborizadas de eucaliptos y pinos, mientras que las orillas son utilizadas como pastizales. La zona baja y central de la cuenca corresponde en gran parte de la aglomeración de la ciudad de Cuenca, los ríos están fuertemente antropizados por la urbanización y los cultivos.

- *La región oriental.-*

Constituida por los ríos Gualaceo, Collay y por pequeños afluentes aguas abajo de la confluencia del Gualaceo y el Paute. En la parte aguas arriba, igualmente de elevada altitud, el páramo deja sitio al bosque primario tropical, degradado por la altitud con presencia de líquenes, bromeliácea. Sus características se aproximan a las cuencas amazónicas, poco habitadas y de difícil acceso. (VER MAPA CARTOGRAFÍA BASE)

---

<sup>2</sup> Páramos: paisaje característico de las zonas andinas con altitudes superiores a 3000 m de vegetación herbácea.

### 1.1.2 SITUACIÓN CLIMÁTICA

Con respecto al clima, la precipitación varía intensamente según la posición geográfica por ejemplo, el mínimo de lluvias anuales se presenta en el sur de la cuenca del Paute (600 mm) y el máximo en la región oriental (3000 mm) de la misma, que tiene marcada la influencia amazónica; estos datos se obtuvieron en estudios anteriores realizados por el INAMHI

La temperatura media oscila entre los 8°C en las zonas de Soldados, Cajas y Saymirin, hasta los 30°C en la zona de Sopladora; así mismo la humedad relativa es muy variable dependiendo de la subcuenca, no obstante su promedio fluctúa alrededor del 90%.

Por su situación de cuenca interandina, la región del Paute está por consiguiente sujeta a diferentes influencias climáticas:

- *Las masas del aire amazónico.-*

Que provocan lluvias durante todo el año, con un máximo entre Junio y Agosto, mientras que el período más seco llega, casi siempre, desde Noviembre hasta Febrero. Esta parte de la cuenca se extiende en toda la zona oriental de la misma, es decir en la parte norte la región del Collay y el páramo arriba de Gualaceo.

- *Las masas de aire provenientes del Océano Pacífico.-*

Tienen una influencia preponderante en la parte occidental de la cuenca. Dos estaciones de lluvias se suceden en el transcurso de un año: la estación de lluvias principal que se extiende de Febrero a Mayo, y una segunda estación de lluvias más reducida en los meses de Octubre y Noviembre. El resto del año es generalmente seco, esencialmente de Junio a Septiembre.

- *El anticiclón sur.-*

Puede igualmente ejercer su influencia sobre la cuenca del Paute y más específicamente su parte sur, impidiendo las precipitaciones en todo el sur del país. (VER MAPA CARTOGRAFÍA BASE)

#### **1.1.2.1 PARTE MEDIA Y BAJA DE LA CUENCA DEL PAUTE**

Se encuentra influenciada por dos regiones bio-climáticas: Región subtropical muy húmedo, régimen oriental y región temperado húmedo a muy húmedo, régimen oriental.

- *Región Subtropical Muy Húmedo, Régimen Oriental.-*

Esta localizada por ambas márgenes del Río Paute en la zona de estudio, donde la precipitación supera a los 2500 mm. y la temperatura supera los 15.5 grados centígrados.

- *Región Temperado Húmedo a Muy Húmedo, Régimen Oriental.-*

Corresponde a las cuencas medias y bajas de las microcuencas de los Ríos Púlpito, Juval y Mazar además de la cordillera hacia el este de Amaluza y final en la descarga de Sopladora.

La región presenta una temperatura media anual de 12 a 18°C, y las lluvias promedian entre 2000 y 3000 mm. Prácticamente en esta región llueve durante todo el año.

#### **1.1.2.2 PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL PAUTE**

Según Cañadas (1983), esta ubicada entre tres regiones bio-climáticas Región Páramo Muy Lluvioso, Región Lluvioso sub-Temperado y Región Muy Húmedo Temperado.

- *Región Páramo Muy Lluvioso.-*

Ocupa la mayor parte del área y corresponde a la zona más alta sobre los 3200 m.s.n.m con una vegetación perenne característica de este piso altiandino. La temperatura alrededor de los 6°C y precipitaciones entre 1000 y 1500 mm anuales.

- *Región Lluvioso subtemplado.-*

Esta forma una franja de anchura variable, el rango de temperatura se ubica entre 6 y 12°C y la precipitación media anual entre 1500 y 2000 mm.

- *Región Muy Húmedo Templado.-*

Ocupa el nivel inferior con relación a la región anterior. La temperatura está entre 12 y 18°C con precipitaciones entre 1500 y 2000 mm.

A esta diversidad climática se suman importantes efectos de la altitud. El resultado de esta complejidad hace que generalmente en una parte u otra de la cuenca existan lluvias, la parte oriental se presenta a menudo como la región más lluviosa.

Mediante las curvas de altitud-precipitación, los mapas topográficos del sector y al conocimiento de las zonas y su vegetación, se realizó el trazado del mapa de

isoyetas anuales de la cuenca, el cual confirma y se acopla los mapas trazados por SIGAGRO. (VER MAPA DE ISOYETAS)

### **1.1.3 SUBCUENCAS**

Para el proyecto se dividió a la cuenca del Río Paute en cinco subcuencas, la parte alta de la cuenca se estableció dos subcuencas, en la parte media de la cuenca dos subcuencas y en la parte baja una subcuenca, se ha implementado las cinco subcuencas con el propósito de que el grupo hidrológico del suelo (CN) es el más predominante en cada una de las subcuencas.

#### **1.1.3.1 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA**

La parte alta de la cuenca está constituida por las subcuencas de los ríos Matadero, Tomebamba, Tarqui y Yanuncay.

##### **1.1.3.1.1 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA 1 DE LA CUENCA**

- *Subcuenca del río Matadero*

La parte alta de esta subcuenca está constituida por un sistema lagunar que debe regular los escurrimientos originando la formación del río a través de la quebrada Quinoas de pendiente moderada y caudales

pequeños, la cual aguas abajo recibe la mayor contribución del caudal total provenientes de los pequeños riachuelos que descienden de los costados constituyendo el río Matadero, posteriormente se une con otros tributarios importantes como el Mazán y Culebrillas.

La parte alta esta constituido por grandes extensiones de páramos, bosques naturales y numerosas lagunas. A la altura de la Piscicola Chirimichay, existen grandes sectores dedicados a la agricultura, con pequeñas áreas que conservan la vegetación natural. Por último desde la ciudad de Cuenca hasta la altura de Sayausí, el área corresponde a urbanizaciones y sembríos.

- *Subcuenca del río Tomebamba*

El piso alto del río Tomebamba, está caracterizado por una geomorfología accidentada de conformación, y sus ríos caracterizados como de alta pendiente. La subcuenca del río Tomebamba comienza en el sector denominado Tres Cruces en el parque nacional "El Cajas" está constituida por las microcuencas de los ríos Mazán, Culebrillas, Capillas y Río Amarillo.

Gran parte de la cuenca es Páramo que tiene una vegetación típica acorde con el piso altiandino, entre 3000 a 4500 metros; se debe remarcar que este se encuentra solamente en los valles de Mazán, Llaviuco y un poco en el sector denominado Fierro Loma (entrada a



Llaviuco), en este se encuentra asentamientos dispersos, cultivos y pastos. El bosque nativo por lo general ha sido reemplazado con pastos, cultivos y bosque plantados de eucalipto y pino que al momento constituyen una seria amenaza al ser sembrados sin ningún tipo de estudio del medio.

- *Subcuenca del río Yanuncay*

La parte media y baja de la subcuenca, corresponde a un valle largo y estrecho, en el cual el río tiene características de torrente. En la parte alta el valle se amplía, dividiéndose en zonas lagunares y cenagosas. Los aportes más importantes vienen de los ríos Soldados y Bermeos. Desde la parte baja de la subcuenca hasta la población de San Joaquín, la zona es urbanizada con terrenos dedicados a sembríos. Más arriba hasta la comuna de Soldados la zona baja del valle está dedicada a pastos y ganadería; las áreas laterales presentan bosques naturales, pinos y eucaliptos

El río Yanuncay nace en los páramos de Angas a una altitud de 4000 m.s.n.m. Los terrenos que están por debajo de los 3300 m.s.n.m. son ocupados con pastos en su mayoría y cultivos de varios productos. Esta cuenca tiene solamente un Área de Bosque y Vegetación Protectora, relativamente pequeño de 4368 ha, llamado Yunguilla. Es conveniente resaltar que estas áreas a lo mejor ya no tiene toda su extensión de bosque nativo en pie, puede ser que parte de este haya sido ya talado y

otra parte puede ser páramo, en el cual, se práctica la ganadería extensiva.<sup>3</sup>

#### **1.1.3.1.2 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA 2 DE LA CUENCA**

- *Subcuenca del río Tarqui*

En la parte alta del río se desarrolla de una manera sinuosa a través de una llanura la cual es inundable en épocas de lluvia, hasta la población de Tarqui. Luego desciende a un valle estrecho, en su trayecto recibe las aportaciones de otros ríos de pendientes moderadas que nacen de los cerros circundantes, entre los cuales se puede mencionar a los ríos Irquis, Cumbe y Sucia.

La mayor parte de las orillas del río está dedicada a pastizales para la ganadería y en las partes altas se ha sustituido la vegetación natural por bosques de eucalipto y pino, con pocas extensiones de terreno dedicados a sembríos.

Los ríos que lo conforman esta subcuenca son: Portete, Irquis, San Agustín, Cumbe y Shucay. Esta subcuenca casi en su totalidad está destinada a la ganadería. Es importante mencionar la presencia del bosque Sunsun Yanasacha, declarado como bosque protector, con una

---

<sup>3</sup> Universidad del Azuay para la Cuenca del Paute (UMACPA 1988)

extensión de 3550 ha. Este se encuentra en la divisoria de aguas de los ríos Tarqui y Yanuncay

### **1.1.3.2 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA**

La parte media de la cuenca, está constituida por las subcuencas de los ríos Machángara, Burgay, Jadán y Gualaceo,

#### **1.1.3.2.1 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA 1 DE LA CUENCA**

- *Subcuenca del río Burgay*

Esta subcuenca es semejante a la del Matadero, con páramos y bosques en su parte alta y cultivos en sus partes medias y bajas. Es importante anotar que buena parte de las orillas están ocupadas por urbanizaciones correspondientes a las ciudades de Azoguez y Biblián.

- *Subcuenca del río Machángara*

La parte alta de esta subcuenca aguas arriba de las represas del Labrado y Chanlud, corresponde a un sistema lagunar similar a la del río Matadero. En la parte media y hasta la junta con el Tomebamba se desarrollan los cauces con pendientes fuertes. Los sistemas principales

corresponden a los ríos Chulco y Machángara, en los cuales se han implementado varios proyectos hidroeléctricos (EEA).<sup>4</sup>

Desde la ciudad del Cuenca hasta la altura de la población de Santa Teresita, el área está urbanizada y además con grandes extensiones de terrenos dedicados en su mayor parte a cultivos de maíz. Más arriba, hasta la altura de las instalaciones de la EEA, se utiliza el suelo para bosques principalmente de pinos. Después, hasta la altura de la represa de El Labrado, la parte baja del valle está dedicada a pastos y los declives conservan en gran parte la vegetación natural.

En el otro valle hasta la represa de Chanlud, las áreas aledañas al río es de pasto y los costados presentan algo de vegetación natural y de páramo.

La parte baja de esta cuenca en algunos lugares está densamente poblada inclusive aquí se encuentra el actual parque industrial y algunas urbanizaciones de reciente creación; en esta parte de la cuenca aproximándose a la parroquia de Chiquintad es muy común ver fincas con cultivos y ganado así como quintas vacacionales. En la cuenca media, podríamos decir, que comienza a los 3200 m.s.n.m. y termina a los 2800 m.s.n.m. antes de la zona de páramo, la densidad de población es baja y en su mayoría la tierra esta destinada a la ganadería y en menor cantidad a cultivos, es importante mencionar la presencia de un

---

<sup>4</sup> Empresa Eléctrica del Azuay (EEA)

bosque nativo ubicado en la margen izquierda del río a la altura de Saymirín. La subcuenca alta corresponde al páramo, en donde al igual que las otras subcuencas descritas anteriormente tienen una importante cadena lacustre y varios ríos pequeños (Pinacocha, Huagrahuma y Chulco) y quebradas que dan origen al río Machángara.

- *Subcuenca del río Jadán*

La subcuenca está dedicada a cultivos y ganadería, la misma es relativamente seca. Es importante señalar que en la confluencia del río Jadán con el Paute, en el año de 1993 se produjo el represamiento de las aguas debido al deslave ocurrido en el sitio denominado La Josefina.

#### **1.1.3.2.2 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA 2 DE LA CUENCA**

- *Subcuenca del río Gualaceo*

Su parte oriental alta presenta una cobertura vegetal de bosque natural con árboles cuya altura promedio es de 4 a 5 metros, las partes bajas occidentales son similares a la cuenca del Jadán y las mismas están dedicadas a varios tipos de cultivos y además a la ganadería, lo que la convierte en una zona eminentemente agrícola y de alta productividad.

De la cordillera central vienen los ríos Sigsig, Palmar, Shío y San Francisco que juntos integran el río Gualaceo. El río Paute penetra en la

selva amazónica y se une al Santiago y desemboca en el Amazonas. El río Paute fue aprovechado para la construcción de la central Hidroeléctrica de su mismo nombre que mediante el sistema interconectado sirve a todo el país.

La región Oriental, constituida principalmente por las subcuencas de los ríos Gualaceo, Collay y pequeños afluentes aguas abajo como el de Mazar, Dudas, Juval, Púlpito, etc. En la zona alta el bosque primario es del tipo tropical, conforme se desciende las características son las cuencas amazónicas, cubiertas de vegetación exuberante, poco habitada y de difícil acceso.

### **1.1.3.3 SUBCUENCAS QUE CONFORMAN LA PARTE BAJA DE LA CUENCA**

La parte media de la cuenca está constituida por las subcuencas de los ríos Collay, Dudas-Mazar y Juval-Palmira.

- *Subcuenca del río Collay*

Al igual que la parte oriental de la subcuenca del río Gualaceo, la parte alta una cobertura vegetal de bosque natural con árboles de altura media, esta parte se dedica principalmente a cultivos de frutales y de maíz, así como también a la ganadería.

- *Subcuenca de los ríos Dudas y Mazar*

Sus partes altas presentan una cobertura vegetal de tipo páramo, las partes intermedias están cubiertas de vegetación compuesta por bosques naturales de pinos y eucaliptos, la parte baja esta dedicada a varios tipos de cultivos y a la ganadería.

### **Proyecto Hidroeléctrico Mazar**

La ejecución de este proyecto nos ofrece la oportunidad de configurar y complementar territorialmente las parroquias orientales de Azogues, en función del aprovechamiento de sus riquezas, mediante la ejecución de proyectos como:

- Manejo de la Subcuenca del Río Burgay,
- Manejo del Parque Nacional Sangay,
- Proyecto PUMA.

Mazar, considerado de carácter estratégico nacional, conjuntamente con las centrales Molino y Sopladora, conforman el complejo de aprovechamiento hidroeléctrico del Paute, que actualmente cubre cerca del 60 % de la demanda de energía a nivel nacional. A nivel regional permitirá incorporar los asentamientos humanos establecidos en las Zonas Pulpito-Juval, Dudas–Mazar y Oriental en el proceso de desarrollo cantonal.

- *Subcuencas de los ríos Juval y Palmira*

Las partes bajas de estas subcuencas presentan una cobertura vegetal de tipo subtropical con grandes árboles y sectores deforestados de poca extensión, los cuales están dedicados a la ganadería.

Las partes altas son semejantes a la de los ríos Dudas y Mazar. Aguas debajo de la confluencia de estos ríos con el Paute, se encuentra la represa de Amaluza y la citada Central Hidroeléctrica Daniel Palacios.<sup>5</sup>

(VER MAPA DE SUBCUENCAS)

#### **1.1.4 COBERTURA VEGETAL**

El suelo de la cuenca del Paute es fértil, propicio para la agricultura, se cultivan cereales, hortalizas y una gran variedad de frutas, en el extremo occidental en los valles tropicales y semitropicales se cultiva caña de azúcar, café y cítricos de muy buena calidad.

Los cultivos de flores ornamentales se localizan en San Joaquín y Sayausí, tanto para el consumo interno como de exportación.

Existen yacimientos de mármol, arcilla, minas de plata y otros minerales como el oro, el zinc y el plomo explotados desde la antigüedad. Se ha detectado la existencia de cobre, molibdeno, calcopirita, cal, caolín, caliza, etc.

---

<sup>5</sup> Hidrología de la Cuenca del Paute



Los resultados indican que la cobertura boscosa remanente incluye 101000 ha. Estos bosques se encuentran amenazados, tal es así que en menos de 9 años se deforestaron 40000 ha, lo que significa que se ha mantenido una tasa de deforestación anual de 3,2 %. Las zonas abandonadas aumentaron en más de 11000 ha, principalmente por la pérdida de fertilidad de los suelos y las nuevas zonas de cultivo, se han establecido en lugares menos aptos para la agricultura. Existe una tendencia de ampliación de la superficie de páramo (3000 ha en menos de 9 años) y de descenso del límite superior del bosque. Además se hace notorio que los fragmentos de bosques de Polylepis han disminuido de tamaño, a pesar de que estos datos todavía no han sido cuantificados en su totalidad. Las principales causas de la deforestación son la ganadería, agricultura, quemas y extracción de leña, aumentando la superficie de pastos y cultivos en más de 19000 ha entre el año de 1991 y el año 2000. (VER MAPA DE USO DE SUELO)

#### **1.1.5 ÁREAS PROTEGIDAS**

La cuenca del río Paute cubre aproximadamente 5055.40 km<sup>2</sup> en las provincias de Azuay y Cañar. Forma una hoya central entre las cordilleras oriental y occidental del sur de los Andes ecuatorianos y está limitada al sur por el nudo Portete - Tinajillas y al norte por el nudo del Azuay. Sus recursos hídricos constituyen la fuente de agua potable e irrigación agrícola para la mayor parte de cantones de las dos provincias. Además, el 60 % de la energía eléctrica del

país se produce en esta cuenca y depende directamente de caudales regulados por los páramos y bosques nativos de la región. Dentro de esta cuenca se hallan los límites del volcanismo antiguo y los valles Girón - Paute, los mismos que conformarían una barrera geográfica para la migración de especies de la flora andina; estos factores sugieren una riqueza biológica muy importante para la región y el país.

#### **1.1.5.1 PARQUE NACIONAL DE CAJAS**

El Parque Nacional Cajas tiene una extensión de casi 30000 ha de bosques naturales, donde se asientan más de 230 lagunas de diversos tamaños. El Parque es un paraíso para los amantes de la pesca deportiva, que podrán encontrar en las lagunas gran cantidad de truchas, la especie piscícola más importante del Parque.

El Parque Nacional Cajas, integra la cordillera occidental de los Andes y está ubicado en la provincia del Azuay, 34 Km. al occidente de la ciudad de Cuenca, en la vía Cuenca-Sayausí-Molleturo. Se encuentra entre los 3000 y 4500 metros sobre el nivel del mar, los 2° 42' y 2° 58' de latitud sur y los 79° 05' y 79° 25' de longitud oeste.

En este maravilloso paraje de la naturaleza viven especies de aves algunas de ellas en peligro de extinción. Para observar el ave símbolo de nuestra nacionalidad, el cóndor no existe mejor lugar que el Cajas.

El área del Parque está dentro de las parroquias rurales de Sayausí, San Joaquín, Chaucha y Molleturo, del cantón Cuenca. El Ministerio del Ambiente lo

incorporó al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador, ya que posee características arqueológicas sobresalientes, valores y cualidades excepcionales que son parte de los objetivos nacionales de conservación y protección de culturas valiosísimas.

En el área del Cajas se encuentra el único reducto de Bosque Nublado del Austro (bosque pluvial Montado), ubicado entre las lagunas de Llaviuco y Taitachugo. Como especies que crecen en altitudes mayores se encuentran rodales puros de quinua (*Polylepis*) o árbol de papel, entre otras.

Entre los mamíferos del Parque están: venados, puerco espín, guatusas, conejos y raposas.

Entre las aves están: cóndor, perdiz, gallinazo, curiquinga, mirlo y la pava de monte. La riqueza más sobresaliente del Parque Nacional del Cajas, constituye sin lugar a duda sus lagunas, junto a las que viven varios tipos de comunidades. Esta riqueza hídrica se refleja en más de 232 lagunas, que dan origen a los ríos Yanuncay y Tomebamba, que atraviesan la ciudad de Cuenca. El Tomebamba abastece del agua que para su potabilización requieren la ciudad y sus alrededores.

Casi en su totalidad la superficie del Parque Nacional se encuentra en estado natural, a excepción del sector de Surocucho que pertenece a ETAPA.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Corporación Municipal “Parque Nacional Cajas”

### 1.1.5.2 PÁRAMO DE ANGAS

Entre las lagunas más importantes están: Lagartococha, Osohuaycu, Mamamag o Taitachungo, Quinoascocha, La Toreadora, Sunincocha, Cascarillas, Ventanas y Tinguishcocha. Esta gran cantidad de lagunas regula y conserva los riachuelos de la zona mediante su drenaje. Ríos como el Tomebamba, Mazán, Yanuncay y Migüir nacen en El Cajas y abastecen de agua potable a la ciudad de Cuenca; a la vez, son los principales tributarios del Complejo Hidroeléctrico Paute, que provee de electricidad a casi todo el país. La laguna de Lagartococha es la más grande. Varios senderos conducen a ella, desde la carretera tomando alrededor de 3 horas de caminata llegar hasta ella.

El páramo húmedo ocupa la mayor superficie, con flora característica de esta zona de vida. Las actividades agrícola y ganadera de las comunidades aledañas representan una amenaza para la preservación del Parque. Frecuentes quemas de pajonal y el constante tránsito de ganado, son factores que destruyen su ecosistema.

La cumbre de la Loma de Tres Cruces es otro mirador natural del área, a más de 4200 metros sobre el nivel del mar. Al sur del Parque está el sector de Ventanas, al que se ingresa por la carretera que conduce al poblado de Angas.<sup>6</sup>

## 1.2 DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LA ZONA

Se realiza la recopilación de los datos como muestran las tablas que se indican en los anexos (ANEXO A Y ANEXO B)<sup>7</sup>, toda esta información cuenta con 73 estaciones meteorológicas y 46 estaciones hidrológicas afluentes en toda la cuenca del Paute.

La cuenca de estudio se escogió además por contar con una historia de datos de nivel diario significativamente importante; esta información a esta escala ha demandado grandes esfuerzos de parte del equipo de trabajo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del Ecuador, dicha información corresponde a los datos fuente, archivos del Plan Maestro y archivos digitales de los cuales dispone el proyecto de HIDROPAUTE; además cuenta con datos de otras instituciones nacionales como el ex INECEL.

Existe información a nivel diario que cuenta desde el año de 1964, sin embargo la misma no es continua y los periodos en común, en términos de pluviométrica y caudales, son escasos. Luego de revisar el inventario de la información proporcionada por el INAMHI para el período de 1977 hasta 1980 se observa información frecuente disponible. Investigación que fue suficiente para la necesidad del proyecto.

---

<sup>7</sup> Datos INAMHI, Estudios e Investigaciones Hidrológicas.

## 1.2.1 ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Son los lugares en los cuales se efectúan mediciones u observaciones de uno o varios parámetros meteorológicos. Su instalación, dimensiones y distribución del instrumental para la toma y/o registro de los datos meteorológicos se realizan de acuerdo a normas internacionales establecidas por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), clasificándose de acuerdo a la finalidad de las observaciones en climatológicas, agrometeorológicas, aeronáuticas, sinópticas, pluviométricas, sondeos de la atmósfera.

### 1.2.1.1 ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA ALTA

- **Soldados**

Tabla 1.1: Información de la Estación Meteorológica MA45

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría	
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro	
MA45	02°54` 16" S	79°23` 00" W			PG

- **Cuenca Aeropuerto**

Tabla 1.2: Información de la Estación Meteorológica M-067

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-067	02°53'12"S	78°59'00"W	2516	1963	2004	AR

### 1.2.1.2 ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA MEDIA

- **Paute**

Tabla 1.3: Información de la Estación Meteorológica M-138

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-138	02°46'39"S	78°45'32"W	2289	1963	2004	CO

- **El Labrador**

Tabla 1.4: Información de la Estación Meteorológica M-141

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-141	02°43'58"S	79°00'59"W	3335	1963	1994	CO

- **Sigsig INECEL**

Tabla 1.5: Información de la Estación Meteorológica M-664

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-664	03°02'53"S	78°47'09"W	2440	1974	1994	PG

### 1.2.1.3 ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA BAJA

- **Palmas Azuay**

Tabla 1.6: Información de la Estación Meteorológica M-045

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-045	02°42'58"S	78°37'47"W	2400	1974	2004	CP

- **Peñas Coloradas**

Tabla 1.7: Información de la Estación Meteorológica M-217

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-217	02°34'35"S	78°33'59"W	2000	1974	2004	CP

- **Pan Grande – San Vicente**

Tabla 1.8: Información de la Estación Meteorológica M-538

Código	Coordenadas		Altura	Pluviometría		Tipo
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.	Periodo de Registro		
M-538	02°28'56"S	78°40'27"W	2600	1974	1989	PG

(VER MAPA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS)

## 1.2.2 ESTACIONES HIDROLÓGICAS

Son lugares que sirven para ser mediciones de los niveles de los ríos, lagos y embalses para la determinación de caudales, propiedades físico - químicas y bacteriológicas del agua.

Una estación hidrológica esta compuesta por:

- Sección de aforo
- Sección limnigráfica
- Sección limnimétrica

Los aforos se realizan por los métodos de: sistema tarabita, sistema de canoa y el método de barras.

El *sistema por tarabita* se realiza cuando la sección transversal del río no es muy prolongada, en donde desde la tarabita se coloca un torno, en el cual se engancha un escandallo el que está compuesto por una hélice la que mide la velocidad del río.

El *sistema por canoa* se realiza sus mediciones cuando la sección transversal del río es muy prolongada y es difícil la construcción de una tarabita.



El *método por barras* se realiza cuando el río no es profundo y su sección transversal es corta.

Las lecturas limnimétricas se las realiza por personas que habitan en la zona, las cuales han sido adiestradas para realizar la medición dos veces al día una a las 7:00 y otra a las 17:00, las que indican el nivel en escala Limnimétrica y el estado del tiempo.

Las lecturas limnigráficas se realiza para la determinación de caudales por medio de registro gráfico continuo de los niveles de agua.

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.

#### 1.2.2.1 ESTACIONES HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA ALTA

- **Tomebamba en Monay**

Tabla 1.9: Información de la Estación Hidrológica H-895

Código	Coordenadas		Altura	Tipo	Año Instalación
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.		
H-895	02°53' 24`` S	78°57' 47`` W	2650	LG	01/07/1964

#### 1.2.2.2 ESTACIONES HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA MEDIA

- **Paute en Paute**

Tabla 1.10: Información de la Estación Hidrológica H-894

Código	Coordenadas		Altura	Tipo	Año Instalación
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.		
H-894	02°45' 35`` S	78°44' 25`` W	3200	LG	01/01/1973

### 1.2.2.3 ESTACIONES HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA BAJA

- **Paute DJ Palmira**

Tabla 1.11: Información de la Estación Hidrológica H-898

Código	Coordenadas		Altura	Tipo	Año Instalación
	Latitud	Longitud	m.s.n.m.		
H-898	02°33'42``S	78°33'20``W	2100	LG	01/08/1963

(VER MAPA DE ESTACIONES HIDROLÓGICAS)

### 1.3 DATOS GEOMORFOMÉTRICOS DE LA ZONA

Son las características que describen a la cuenca del Paute; basándose en su: localización, tamaño, forma, clima, área, perímetro, pendiente del cause, longitud del cause.

#### 1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

##### 1.3.1.1 LOCALIZACIÓN

Se inicia el estudio con la localización geográfica de la cuenca que se presentará el plano maestro con las coordenadas geográficas que indiquen claramente su situación. La elevación promedio con relación al nivel del mar es importante, así como todas las referencias topográficas de cerros, o valles que permitan darse una idea general del conjunto.

Deben quedar claramente marcados el sitio de origen de los afluentes, quebradas, lagos y embalses que sirvan de afluentes tributarios al río en estudio y limitar el área de la cuenca hasta el sitio donde tenga interés el estudio propuesto.

Se cuenta con información geográfica de todos los afluentes que indican en la variación del caudal de la cuenca principal. Si se dispone de estaciones pluviométricas, debe quedar indicada claramente su localización, para efectos de poder hacer la evaluación de las áreas drenadas hasta cada estación medidora de caudal. <sup>8</sup>

La cuenca del río Paute pertenece al sistema hidrográfico Namangoza-Santiago-Marañon-Amazonas. Localizada en la parte sur oriente del Ecuador.

Se ubica entre las coordenadas:

Tabla 1.12: Localización geográfica, altura media y área de la cuenca del Paute

<b>POLAR</b>	2°15' y 3°15' de latitud sur
<b>MERIDIONAL</b>	78° 35' y 79° 20' de longitud occidental
<b>ALTURA MEDIA</b>	2500 m.s.n.m.
<b>ÁREA</b>	505 540 ha. (DDA, Intercoperation, UICN, 1993).

Dentro de la caracterización del proyecto se ha dividido a la cuenca del Paute en tres partes altitudinales:

**ALTA:** Desde la línea de cumbre (divisoria de aguas) hasta los 3200 m.s.n.m.

---

<sup>8</sup> Manual de Instrucciones, Estudios Hidrológicos. Proyecto de Ampliación y Mejoramiento de los Servicios Hidrometeorológicos e Hidrológicos. Tomo I. 1972. San José, Costa Rica.

**MEDIA:** Desde los 3200 m.s.n.m hasta los 2800 m.s.n.m.

**BAJA:** Considerada desde los 2800 m.s.n.m. hasta los 2320 m.s.n.m. puente de él Descanso.

Se dispone de mapas a escala 1:250 000 que se obtuvo está información en el SIGAGRO, contando con la investigación geográfica de coordenadas de la localización de la cuenca en estudio, de los afluentes que lo drenan en cada subcuenca y de la ubicación de estaciones tanto meteorológicas como hidrológicas para el desarrollo de la modelación hidrológica.

### **1.3.1.2 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA**

#### **1.3.1.2.1 TAMAÑO DE LA CUENCA**

Indica la superficie del área drenada, es decir; desde donde nace el cauce hasta el sitio donde se encuentra la estación medidora de caudal que va a servir de base para el estudio hidrológico de la cuenca, y cubre el perímetro de la cuenca. Generalmente, se indica en kilómetros cuadrados.

Es también el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica.

La cuenca del río Paute cubre aproximadamente **5 055.40 km<sup>2</sup>** entre las provincias de Azuay y Cañar. Forma una hoya central entre las cordilleras oriental y occidental del sur de los Andes ecuatorianos y está limitada al sur por el nudo Portete- Tinajillas y al norte por el nudo del Azuay.

Para definir el área y perímetro que cubre cada estación para cada subcuenca se utilizó el método de los polígonos de Thiessen.

- **MÉTODO DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN**

Para aplicar este método se requiere conocer la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca, identificando el área de influencia de cada pluviómetro. Así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que estos se corten entre sí y tratando que los triángulos sean lo más equiláteros posibles. A partir de allí se trazan líneas bisectoras perpendiculares a todos los lados de los triángulos, las que al unirse en el baricentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación.

La lluvia media es:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i * A_i}{A} = \sum_{i=1}^n p_i * \frac{A_i}{A}$$

$\bar{p}$  : lluvia media sobre la cuenca, mm

$p_i$  : lluvia en la estación i, mm

$A_i$  : área del polígono correspondiente a la estación i, Km<sup>2</sup>

$A$  : área total de la cuenca, Km<sup>2</sup>

$n$  : Número de estaciones pluviométricas y pluviográficas con influencia en la cuenca

El área de influencia de cada estación considerada (polígono) está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca.

Para el desarrollo del polígono de Thiessen, se utilizó como herramienta el software ArcView 3.2.

### 1.3.1.2.2 FORMA DE LA CUENCA

Esta característica es importante pues se relaciona con el tiempo de concentración, el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya a la sección de la corriente en estudio o en otras palabras, es el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de la misma.

La forma de la cuenca tiene importancia, en la cantidad de escorrentía para una misma área y una misma intensidad de lluvia el hidrograma de salida depende directamente de la forma

#### **1.3.1.2.3 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL**

La velocidad de escurrimiento de las corrientes del agua depende de la pendiente de sus canales fluviales. A mayor pendiente mayor velocidad.

a.- *Pendiente media (S1)*: Es la diferencia total de elevación del lecho del río dividido para su longitud entre esos puntos.

$$J = \frac{Cota_{MAX} - Cota_{MIN}}{Longitud_{RIO}}$$

J : Pendiente media del cauce principal

#### **1.3.1.2.4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE LAS SUB CUENCAS**

El conocimiento de las características climatológicas de una cuenca es previo a cualquier estudio hidrológico.

Los factores más importantes a considerar son:

- Origen de la precipitación,

- Tipo de precipitación,
- Intensidad de la precipitación,
- Duración de la precipitación,
- Distribución de la precipitación de la cuenca,
- Precipitación media sobre la cuenca,
- Estudios de área-precipitación-duración,

#### **1.3.1.2.5 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL**

La longitud del cauce principal se mide desde el punto más remoto de la cuenca, hasta la salida. Generalmente se indica en metros o kilómetros.<sup>9</sup>

Los datos geomorfométricos de la cuenca del Paute que sirven para el desarrollo del proyecto y manejo del paquete HEC-HMS se encuentra en el ANEXO C.

## **CAPÍTULO 2**

### **MANEJO DE LA INFORMACIÓN**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN**

##### **2.1.1 INTRODUCCIÓN**

---

<sup>9</sup> Monsalve Sàenz Germán, 1995



El reconocimiento de la información que se requiere para el desarrollo de la Modelación Hidrológica en la Zona del Paute, se realizó por medio del uso de la Información climática disponible en el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) Proyecto HIDROPAUTE, INFOPLAN (Información y Planificación de los Proyectos del Sector Público), información temática disponible en el SIGAGRO (Sistemas de Información Geográfica y Agropecuaria).

El paquete se lo puede obtener de forma gratuita desde la siguiente dirección electrónica (URL):

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/hechms-download.html>

La documentación se la obtiene en la siguiente página:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/hechms-document.html>

Hoy en día los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ocupan un lugar preponderante entre las herramientas computacionales, la cual sirve para el manejo de información del lugar que se requiera.

En una cuenca hidrográfica la utilización de un SIG se puede operar para la determinación de una modelación hidrológica, pues a través de este tenemos datos de tipo de suelo, el uso del suelo, cobertura vegetal, u otro tipo de variable que se presente ante una respuesta hidrológica.

HMS (Hidrologic Modeling System), constituye una herramienta hidrológica para la determinación de caudales de salida para una cuenca, que servirá para la modelación hidrológica de pronóstico de caudales en el proyecto HIDROPAUTE.

### **2.1.1.1 MODELO HIDROLÓGICO**

#### **2.1.1.1.1 DEFINICIÓN DE MODELO HIDROLÓGICO**

Modelo hidrológico es la representación simplificada de determinados procesos del ciclo hidrológico por medio de un conjunto de conceptos hidrológicos expresados en forma matemática y ligados por una secuencia espacio – temporal que se corresponde con la que se produce en la naturaleza<sup>8</sup>.

Generalmente los modelos hidrológicos son matemáticos debido a la dificultad de simular en forma real determinadas variables hidrológicas. Estos modelos se aplican en la simulación del comportamiento de una cuenca.

Es así como se ha ido generalizando el uso de modelos de simulación que permiten, a partir de la información básica disponible, obtener aproximaciones cuantitativas de los efectos que causarían sobre el ambiente cambios de uso del suelo y prácticas de manejo de la cuenca en diversos escenarios.

El uso de modelos es muy útil para predecir el impacto que pueda tener el cambio de uso de la tierra sobre la conservación del suelo, y por lo tanto, sobre

---

<sup>8</sup> AGUAMARKET,2005

la cantidad y calidad del agua producida. Pueden obtenerse estimaciones de una manera rápida y económica, sin las consecuencias que implica realizar costosos cambios experimentales en la naturaleza y de resultados obtenibles a mediano o largo plazo<sup>9</sup>.

#### **2.1.1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS**

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse de la siguiente manera:

##### **2.1.1.1.2.1 MODELOS FÍSICOS**

Al estar bajo condiciones controladas, el modelo puede ser sometido a pruebas reales que simule determinados eventos extraordinarios que pueden representarse en la cuenca. Su principal ventaja es que, dependiendo de la similitud que se use, el grado de confianza en los resultados obtenidos es muy alto<sup>10</sup>.

Se consideran como modelos físicos a las versiones reducidas de los sistemas prototipos; dichas versiones son realizadas en un laboratorio donde trata de representar las condiciones naturales a las que está sujeto un sistema real<sup>11</sup>.

##### **2.1.1.1.2.2 MODELOS ANALÓGICOS**

---

<sup>9</sup> Fernández, 1982

<sup>10</sup> Proaño y Unda, 1995

<sup>11</sup> Hidalgo, 2005

Es la representación de un sistema físico (prototipo), por un sistema físico análogo, de modo que su comportamiento simule de forma aproximada al del prototipo. Este modelo se basa en la analogía que existe entre ecuaciones que caracterizan los diferentes fenómenos. Los modelos analógicos utilizados más frecuentemente en hidrología simulan el flujo de agua en un cauce, mediante el flujo de una corriente eléctrica en un circuito compuesto por resistencias y condensadores<sup>12</sup>.

#### **2.1.1.1.2.3 MODELOS MATEMÁTICOS**

Se difieren de los modelos físicos porque se prescinden de los esquemas físicos y se centran a la simulación de relaciones matemáticas funcionales. Estas relaciones funcionales casi siempre son ecuaciones diferenciales o ecuaciones en derivadas parciales que permiten representar los fenómenos que están siendo modelados, dichas ecuaciones serán más confiables mientras mejor conozcamos los mecanismos que intervienen en el comportamiento del sistema.

Por medio de los métodos matemáticos y las diferentes relaciones funcionales es posible que este tipo de modelo produzca una gran cantidad de información; y gracias a los avances tecnológicos, se puede disponer de herramientas que ayuden a la optimización de costo y tiempo.

Estos modelos pueden clasificarse en los siguientes tipos:

---

<sup>12</sup> AGUAMARKET,2005

#### **2.1.1.1.2.3.1 CONTINUOS Y DE EVENTOS**

En un modelo continuo su diseño está programado para varios años y además se basa en reproducir fenómenos que son continuos en el tiempo.

Es de eventos cuando se intenta simular una fase del ciclo hidrológico y además el fenómeno estudiado es de menor duración.

#### **2.1.1.1.2.3.2 CONCENTRADOS Y DISTRIBUIDOS**

Un modelo es concentrado cuando los parámetros que determinan los fenómenos producidos varían solo con el tiempo. En un modelo distribuido los parámetros varían también espacialmente. Si se tienen variaciones zonales de tipo de suelo, vegetación, topografía, etc. Para una cuenca hidrográfica, el modelo es distribuido. Una desventaja de los modelos distribuidos es el incremento en la complejidad, datos requeridos, que influyan directamente en el tiempo de ejecución del modelo<sup>13</sup>.

#### **2.1.1.1.2.3.3 DETERMINÍSTICOS Y ESTOCÁSTICOS**

Es determinístico si el resto de variables consideradas en un modelo no tiene un carácter aleatorio y responden a una ley definida. Se considera como modelos de *Causa y Efecto*.

---

<sup>13</sup> Proaño y Unda, 1995

Es estocástico cuando una de las variables que intervienen en un modelo matemático tiene un carácter randómico o aleatorio, es decir dependen de las probabilidades de que sucedan acontecimientos en una larga serie temporal. Estos están basados en los *Conceptos Estadísticos de Análisis*, donde el fenómeno puede ser considerado como una variable estadística. Estos modelos son particularmente útiles en los estudios hidrológicos. Para construir el sistema modelo se emplean algunas metodologías matemáticas como: probabilidad, distribución de frecuencias, generación y correlación en serie subsiguiente, etc.<sup>14</sup>

#### **2.1.1.1.2.3.4 EMPÍRICOS Y CONCEPTUALES**

Es empírico cuando se basa en la observación o el experimento y no deriva de la teoría. Se ajusta a los hechos observados y permite predecir lo que sucederá en ciertas circunstancias, porque ya se sabe lo que ha sucedido antes en esas mismas condiciones. La confiabilidad de esos métodos depende de la base de datos experimentales; podría decirse que “va a suceder con toda seguridad”. Una solución empírica puede ser una sencilla relación aproximada o una compleja ecuación de regresión múltiple.<sup>15</sup>

Es conceptual cuando se basa en leyes físicas que rigen los fenómenos que se prevén simular. Los procesos paramétricos son determinados por una combinación de mediciones directas y evaluaciones indirectas durante la

---

<sup>14</sup> Hidalgo, 2005

<sup>15</sup> Hudson, 1968

calibración. Esta diferencia en la evaluación de parámetros es debido a la dificultad que se puede alcanzar en las mediciones de campo.

### **2.1.2 REVISIÓN DEL PAQUETE HEC-HMS 3.0**

Este paquete de modelación es muy versátil y útil puesto que tiene la habilidad de aprovechar los datos digitales del terreno, es capaz de utilizar las tablas de datos de cualquier SIG.

El HEC-HMS fue planteado en un entorno amplio para el análisis hidrológico. Fue desarrollado en las oficinas del Cuerpo de Ingenieros Hidrológicos de los Estados Unidos para planear, diseñar, operar, permitiendo y regulando las actividades, manejando información acerca de la precipitación histórica o de diseño, Información acerca de las características del suelo, Información morfométrica de las subcuencas, información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía, Información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito).

La diferencia entre HEC-HMS y otras aplicaciones diseñadas para preparar modelos hidrológicos como HEC-1 es la habilidad de aprovechar los datos digitales del terreno para el desarrollo de dichos modelos.

#### **2.1.2.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS**

La mayoría de parámetros incluidos en subcuencas y corrientes pueden ser estimados automáticamente usando el administrador de optimización. La

descarga observada debe estar disponible para un elemento menor antes que la optimización pueda empezar. Se pueden estimar los parámetros en algunos elementos aguas arriba del flujo observado. Cuatro diferentes funciones objetivo están disponibles para estimar la bondad de formar entre los resultados computados y la descarga observada. Dos diferentes métodos de búsqueda pueden ser usados para encontrar la mejor forma entre los resultados computados y la descarga observada.

Las restricciones pueden ser impuestas para restringir el espacio del parámetro del método de búsqueda.

Para la simulación del tránsito precipitación – escurrimiento, el HEC-HMS proporciona los siguientes componentes:

- Opción de precipitación, esta especificación la cual puede describir un evento de precipitación observada, un evento de precipitación hipotética basada en frecuencia, o un evento que represente el límite superior de precipitación posible en una localización dada.
- Los modelos de pérdida los cuales puede estimar el volumen de escurrimiento, dando la precipitación y propiedades de la cuenca.
- Los modelos de escurrimiento directo que pueden explicar el flujo terrestre, almacenamiento y pérdidas de energía cuando el agua se mueve a través de los canales del río.



- Modelos de confluencias y bifurcaciones que ocurren de forma natural.
- Modelos de medición de control de agua, incluyendo medios de divisiones y almacenamiento.

Estos modelos son similares a los modelos incluidos en el HEC-1, pero además el modelo HEC-HMS incluye:

- Un modelo distribuido de escurrimiento para usar con los datos de precipitación distribuida, tal como los datos disponibles desde el radar del clima.
- Un modelo continuo de humedad de suelo usado para simular un periodo largo de la respuesta a lo largo de una cuenca para humedad y sequía. Además HEC-HMS incluye:
- Un paquete de calibración automática que puede estimar ciertos parámetros del modelo y condiciones iniciales, dando observaciones y condiciones hidrometeorológicas.
- Conexión a un sistema de administración de base de datos que permite el almacenamiento y recuperación de datos y conectividad con otras herramientas de análisis disponibles de HEC y otras fuentes.

Se presenta tablas de los diferentes modelos que están disponibles en el programa HEC-HMS:

Tabla 2.1: Modelos de volumen de escurrimiento

<b>MODELO</b>	<b>CARACTERIZACIÓN</b>
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

Tabla 2.2: Modelos de escurrimiento directo

<b>MODELO</b>	<b>CARACTERIZACIÓN</b>
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

Tabla 2.3: Modelos de flujo base

<b>MODELO</b>	<b>CARACTERIZACIÓN</b>
Mensual constante	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros

Recepción exponencial	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros
Reservorio lineal	Evento, concentrado, empírico, ajuste de parámetros

Tabla 2.4: Modelos de tránsito

<b>MODELO</b>	<b>CARACTERIZACIÓN</b>
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

La descripción más detallada de cada uno de los procesos que intervienen en el programa, así como de los modelos diferentes métodos incluidos en el modelo se puede encontrar en el Manual Técnico del programa HEC-HMS. De igual manera se puede ver en Chow (1964) y Henderson (1966), los cuales describen la teoría del flujo de canales abiertos, la cual se basa fundamentalmente en las ecuaciones de St. Venant.

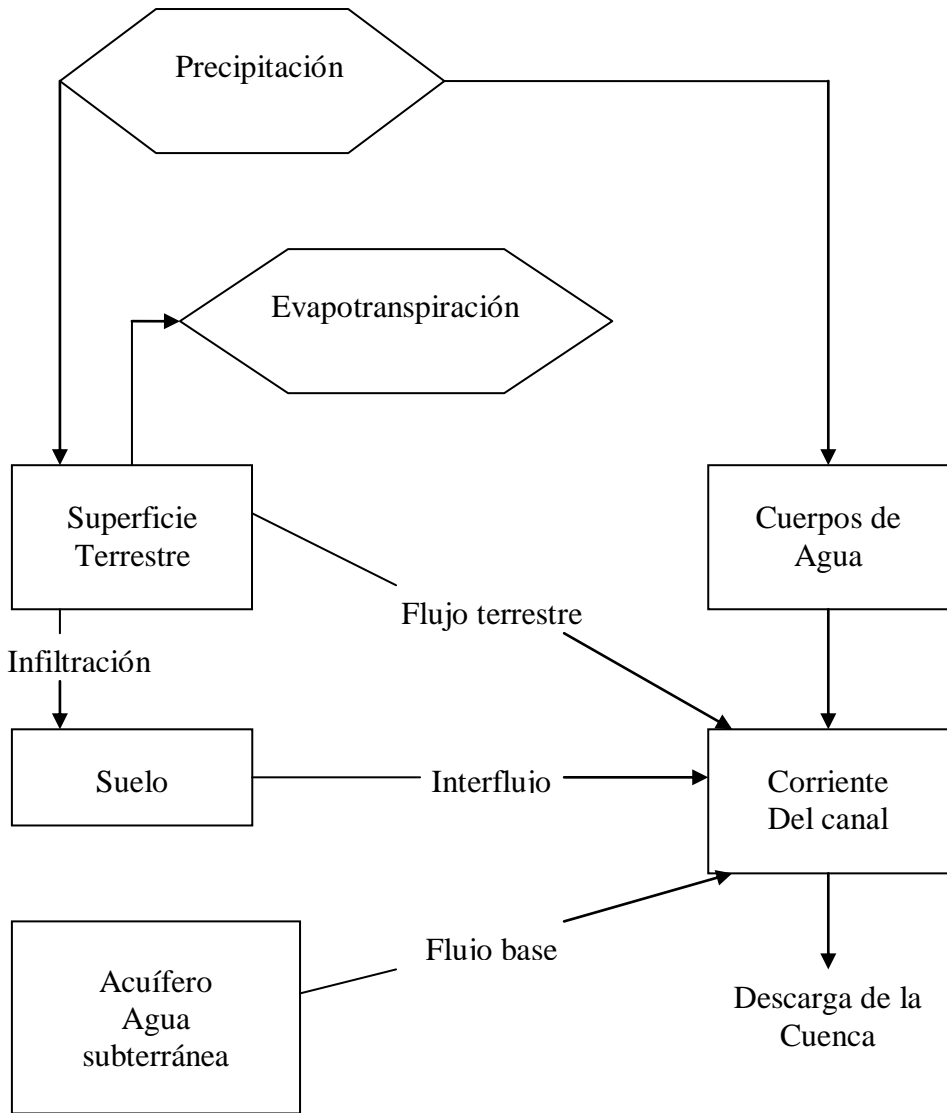


Figura 2.1: Representación típica HEC-HMS del escurrimiento de una cuenca.

## 2.2 IMÁGENES Y SISTEMAS DE COORDENADAS

### 2.2.1 PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

#### 2.2.1.1 PROYECCIÓN TRANSVERSA DE MERCATOR

Esta proyección fue desarrollada por Lambert en 1772, derivada analíticamente 50 años después por Gauss, siendo Kruger en 1912, quien obtuvo fórmulas más adecuadas para la ejecución de los cálculos. Tal vez ésta es la razón por lo que es una de las proyecciones cartográficas conformales más utilizadas.

La proyección transversa de Mercator es la proyección común de Mercator girada un ángulo de  $90^\circ$ , de manera que esté relacionada con un meridiano central en la misma forma que la proyección común de Mercator está relacionada con el ecuador (Figura 2.2). Debido a que el cilindro es tangente al globo en un meridiano, la escala de proyección es verdadera a lo largo de ese meridiano, al cual se le denomina "meridiano central". Aunque esta proyección es conformal, al igual que la proyección común de Mercator, no retiene la propiedad consistente en que la línea de rumbo es una línea recta de esta última. Otras propiedades de esta proyección incluyen a las siguientes:

1. Tanto el meridiano central como una línea perpendicular a éste se representan con líneas rectas;
2. Otros meridianos son curvas complejas que son cóncavas hacia el meridiano central;
3. Los paralelos son curvas cóncavas hacia el polo y
4. La escala es verdadera únicamente a lo largo del meridiano central.

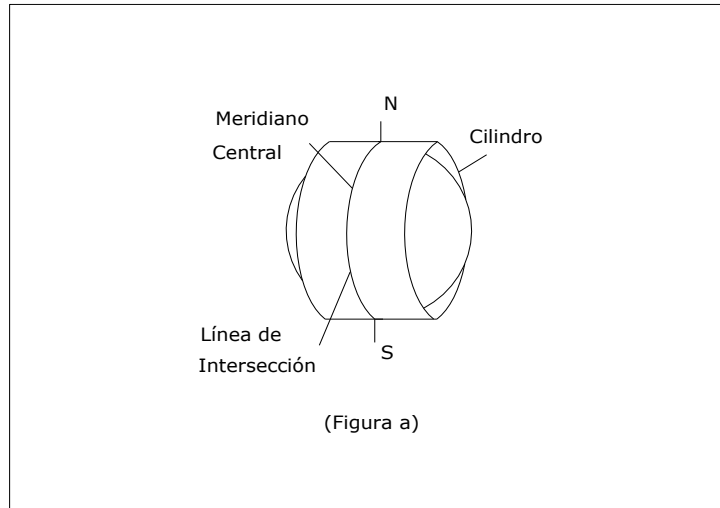


Figura 2.2: Proyección Transversa de Mercator

Esta proyección se aplica al sistema de coordenadas UTM y a los sistemas de coordenadas Planas estatales (o zonas a partir de ellas) de extensión mayor hacia el norte – sur que hacia el este – oeste. Para estos sistemas, se hace que el cilindro de la proyección de Mercator corte la superficie de la esfera a lo largo de dos líneas estándar paralelas al meridiano central, en vez de ser tangente a la esfera en la forma como lo es en la proyección ordinaria de Mercator (Figura 2.3).

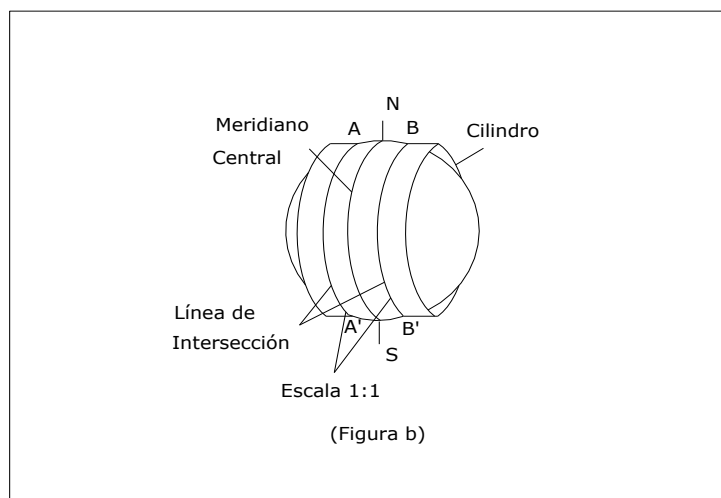


Figura 2.3: Cilindro con dos líneas estándar

En la Figura 2.3 se presenta el esquema de una zona de la proyección transversa de Mercator. Dos terceras partes de la zona se encuentran dentro de los dos meridianos de intersección y una sexta parte de la zona se encuentra a cada lado de los mismos. La escala es verdadera a lo largo de estos dos meridianos: Se comprime entre ellos y se expande más allá de los mismos. Por tanto, como se encuentra en la Figura 2.4, el factor de escala  $k$ , es unitario a lo largo de los dos meridianos de intersección, menor que la unidad entre ellos y mayor que la unidad más allá de los mismos.

En los sistemas de coordenadas planas estatales, las zonas se limitan en ancho a valores del orden de 158 mi (cerca de 254 km), para que la distorsión de escala de la proyección no exceda de 1 parte en 10 000 (es decir, un factor de escala de 0.9999). Para el sistema de UTM, se utiliza una zona más ancha, siendo la distorsión de escala permisible de una parte en 2500 (un factor de escala 0.9996).

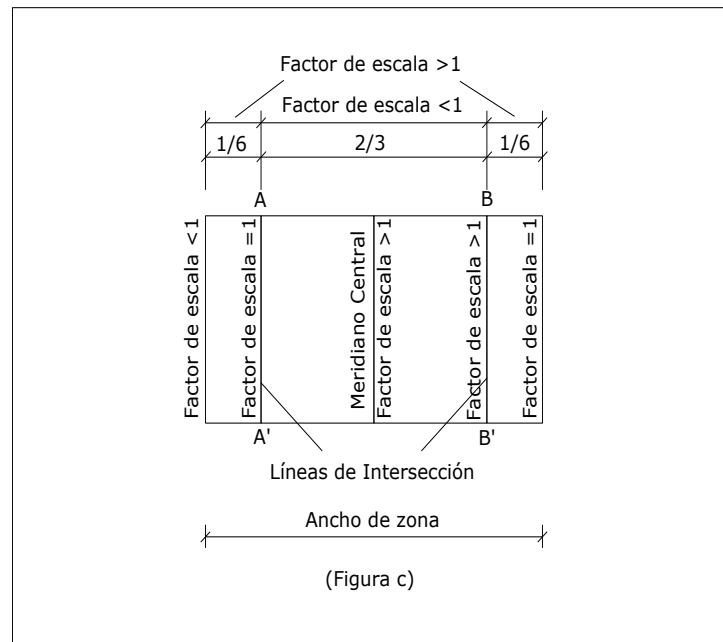


Figura 2.4: Esquema de una zona de la proyección transversa de Mercator

### 2.2.1.2 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR

Esta proyección se basa enteramente en la proyección transversa de Mercator que se analiza en la sección precedente. Sus especificaciones son (UTM 1984):

1. La proyección transversa de Mercator se realiza en zonas con  $6^\circ$  de ancho.
2. El elipsoide de referencia es el de Clarke de 1886 en Norteamérica.
3. El origen de longitud está en el meridiano central.
4. El origen de latitud está en el ecuador.
5. La unidad de medida es el metro.
6. Para el hemisferio sur, se utiliza el norte falso de 10 000 000 m (para correspondencia con el ecuador).



7. Se utiliza un este falso de 500 000 m para el meridiano central de cada zona.
8. Las zonas están numeradas empezando con 1 para las zonas ubicadas entre los meridianos 180°W y 174°W, incrementándose a 60 para la zona comprendida entre los meridianos 174°E y 180°E (Figura 2.5).
9. La latitud del sistema varía de 80°N a 80°S.

Las zonas UTM en el Ecuador, está ubicado entre la zona 17 y 18; y los meridianos centrales está entre 75° y 81°. (Figura 2.5)

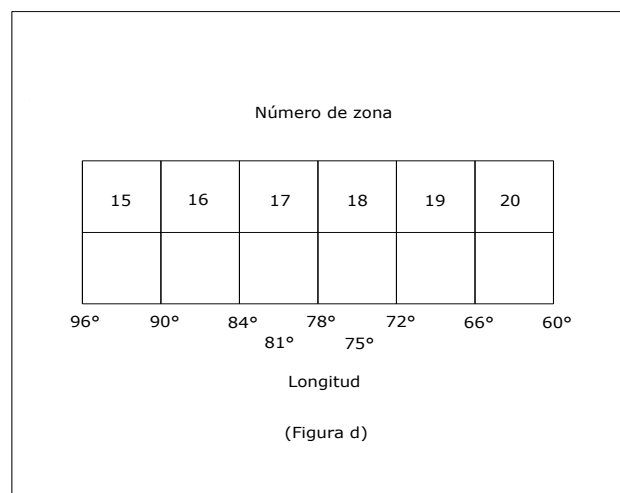


Figura 2.5: Zonas Universales Transversas de Mercator

### 2.2.1.3 PROYECCIÓN TRANSVERSA DE MERCATOR EN ZONAS DE 3°

El sistema de proyección UTM consiste en la proyección transversa de Mercator en zonas de 6°. También es posible tener una proyección transversa de Mercator en zonas de 3°. Ya que el ancho de la zona es únicamente de 3° y se asigna el factor de escala de 0.9999 al meridiano central, puede esperarse un error de escala más pequeño en la zona. Este error de escala es de 1/10000 en el meridiano central, comparado con 1/2500 para el UTM.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Artículo 11.14: Proyección universal transversal de Mercator

La cartografía digital ha sido recopilada mediante la información de SIGAGRO y ODEPLAN. Todos estos datos están bajo un Formato Shape File (ESRI).

La proyección en la cual se trabajó los SIG (Sistemas de Información Geográfica o Mapas), es la WGS - UTM 1984, Zona 17S.

### **2.2.2 IMÁGENES**

Imagen satélite del sistema LANDSAT 7, sensor TM. La imagen cubre la totalidad de la cuenca del Río Paute y parte de las cuencas hidrográficas de los Ríos Cañar y Jubones.

Con la imagen de satélite se ha determinado el uso del suelo, cobertura vegetal e índices de vegetación con la finalidad de contar con información actual y poderla comparar con información satelital de años posteriores para monitorear los cambios que van ocurriendo en el espacio físico.<sup>19</sup>

Esta imagen se la obtuvo en el SIGAGRO; cuya localización es:

- PATH 10 (grilla vertical) división meridional
- ROW 62 (grilla horizontal) división latitudinal

### **2.3 USO DE MAPAS Y MODELOS SIG:**

---

<sup>19</sup> [geobis.com/satelite.htm](http://geobis.com/satelite.htm) - 29k - Resultado Suplementario

### 2.3.1 MAPAS

Los mapas elaborados en el presente estudio para el requerimiento del paquete HEC-HMS se han considerado los siguientes aspectos:

#### a) Cartografía Base

- Curvas de Nivel
- Ciudades (polígonos)
- Poblados (puntos)
- Hidrografía (ríos, quebradas, lagunas)
- Vías de Comunicación
- Cotas altitudinales

#### b) Uso del Suelo

- Tierras cultivadas sin tratamiento
- Praderas
- Pastizales
- Bosques
- Zonas residenciales
- Cuerpos de agua
- Nieve

#### c) Tipo de Suelo

- Tipo A, B, C y D
- Textura
- Taxonomía
- Número hidrológico (CN)

d) Modelo Digital del terreno

- Curvas de nivel

e) Isoyetas

- Zonas de Precipitación Promedio Anual

f) Mapa de subcuencas

- Cuenca Alta (dos subcuencas)
- Cuenca Media (dos subcuencas)
- Cuenca Baja (una subcuenca)

g) Estaciones

- Estaciones Hidrológicas
- Estaciones Meteorológicas

Estos mapas se elaboraron con información del SIGAGRO (Sistemas de información Geográfica y Agropecuaria), con el uso del programa ARC VIEW 3.2, el que trabaja en ambiente SIG.

### **2.3.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Un SIG es un conjunto de programas de computación que tiene capacidad de almacenar, organizar, analizar y manipular datos espaciales. Aquellos datos que tengan referencias geográficas, como tipos de suelo, uso de suelo (vegetación), caminos, datos climáticos, etc. pueden ser incorporados a un SIG para luego ser utilizados en la confección de mapas o coberturas temáticas que permitan la visualización y análisis de forma integrada de los datos originales y no como entidades individuales. Los dos tipos de datos que constituyen toda característica geográfica (espacial y descriptiva) son combinados en los SIG permitiendo analizar su interacción dentro de un mapa o entre varios mapas, y obtener uno nuevo con características propias. Un SIG está constituido por una serie de componentes básicos fundamentales (Figura 2.6) que permiten realizar las siguientes funciones:

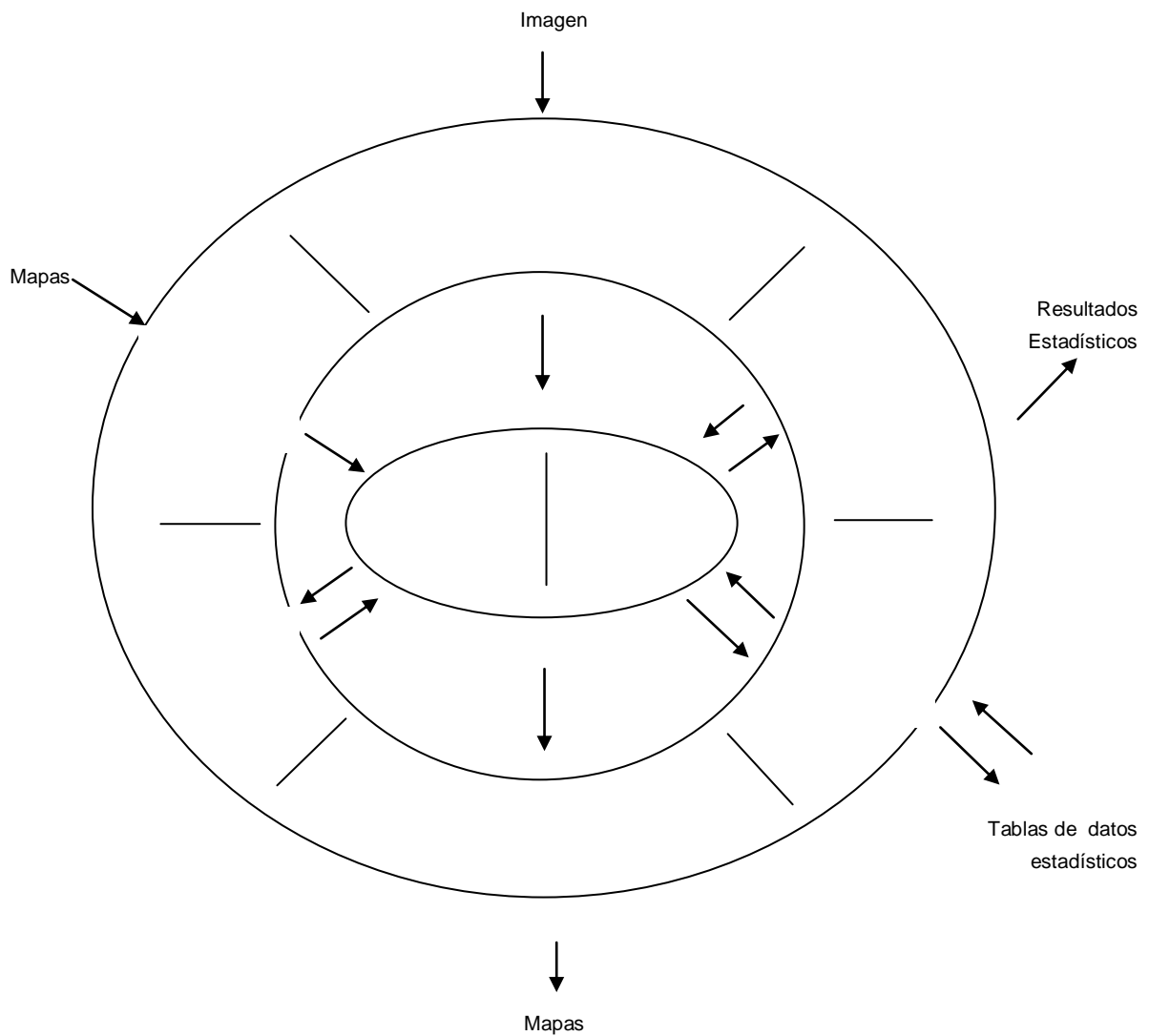


Figura 2.6: Componentes de un SIG y relaciones establecidas entre cada uno de ellos

### 2.3.2.1 INCORPORACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

No existe una manera única de incorporación y almacenamiento de datos. Las formas variarán según el tipo de dato, los resultados que se esperan alcanzar y el software ajustado a nuestra necesidad es el ARC VIEW 3.2. Básicamente se emplean dos modos de representación de datos espaciales: vector y raster. (Figura 2.7)

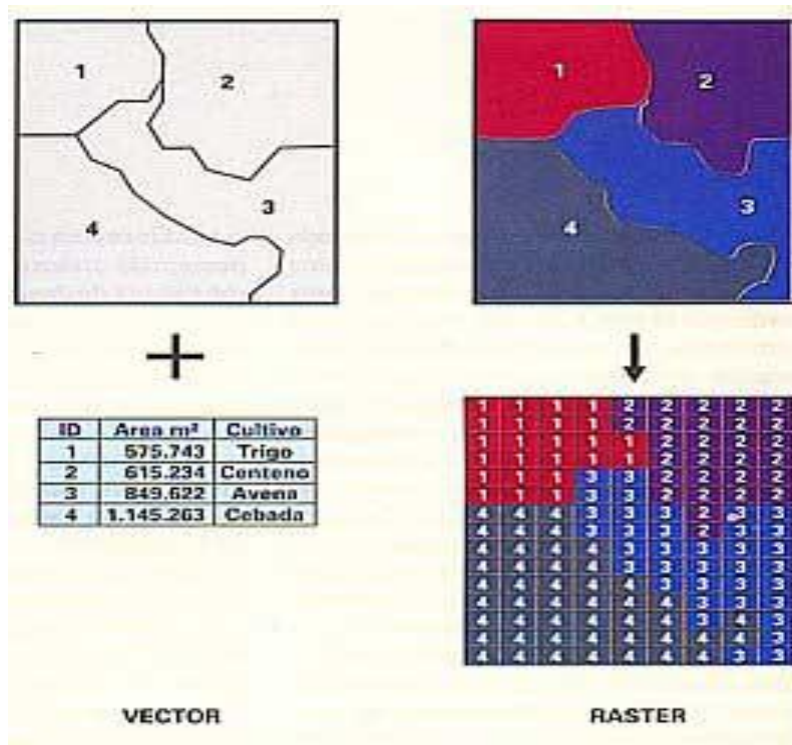


Figura 2.7: Comparación entre modo vector y raster.

En el modo vector los rasgos geográficos se representan por medio de puntos, líneas y/o polígonos, sus atributos se almacenan en una base de datos independiente. En el modo raster el área de estudio está dividida en celdas, cada una de ellas representa su posición geográfica y al mismo tiempo su atributo cualitativo.

En un SIG que emplea el modo vector cada característica geográfica se representa por medio de puntos, líneas y/o polígonos. Los mismos están definidos por un par de coordenadas X e Y referenciadas en un sistema cartográfico determinado (por ejemplo latigrado / longgrado) y los atributos de tales características geográficas están almacenados en una base de datos independiente. La unión entre ambas bases de datos se realiza a través de un



identificador univoco de cada objeto geográfico. Los mapas son almacenados en forma diferente cuando se trabaja en el modo raster.

La representación gráfica de las características geográficas y sus atributos están incluidos dentro de un mismo archivo.

Los datos geográficos que se incorporan al SIG pueden provenir de mapas en papel (incorporados por medio de la digitalización o barrido), fotografías aéreas, tablas o listas; o pueden ser datos en forma digital, que provienen de mapas o coberturas temáticas, o de imágenes satelitales o bien los datos pudieron haber sido registrados directamente en el campo (con la ayuda de un GPS -Global Positioning System).

Los datos espaciales deben recibir un reprocesamiento para poder ser luego analizados. Además de la mencionada conversión de un formato analógico (mapa en papel) a uno digital, también se llevan a cabo, según las aplicaciones, la conversión vector / raster o raster / vector, la unificación y/o cambios de sistemas de proyección cartográfica, la unión de zonas adyacentes, etc. Procesos que, en general, son fácilmente ejecutables con el software Arc – View 3.2.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> SIGAGRO, Departamento técnico

## 2.4 DELINEACIÓN DE LA CUENCA

Para la delimitación de la cuenca del Paute, se ha considerado dividir en cinco subcuencas, con el propósito de que en cada una tiene un uso de suelo y tipo de suelo predominante.

- Subcuencas que conforman la parte alta de la cuenca.

Tabla 2.5: Áreas de las micro cuencas representantes es la cuenca alta 1.

	<b>MICRO CUENCAS</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
<b>PARTE ALTA 1</b>	Tomebamba	302.58
	Yanuncay	413.57
	Matadero	135.13
		<b>851.28</b>

Tabla 2.6: Áreas de las micro cuencas representantes en la cuenca alta 2.

<b>PARTE ALTA 2</b>	Tarqui	428.78
		<b>428.78</b>

- Subcuencas que conforman en la parte media de la cuenca

Tabla 2.7: Áreas de las micro cuencas representantes en la cuenca media 1.

	<b>MICRO CUENCAS</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
<b>PARTE MEDIA 1</b>	Machángara	130.35
	Burgay	535.17
	Jadán	700.50
		<b>1366.02</b>

Tabla 2.8: Áreas de las micro cuencas representantes en la cuenca media 2

<b>PARTE MEDIA 2</b>	Gualaceo	946.62
		<b>946.62</b>

- Subcuencas que conforman en la parte baja de la cuenca

Tabla 2.9: Áreas de las micro cuencas representantes en la cuenca baja.

	<b>MICRO CUENCAS</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
<b>PARTE BAJA</b>	Mazár y Dudas	662.88
	Collay	234.64
	Juval y Palmira	565.19
		<b>1462.71</b>

## **2.5 GENERACIÓN DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y TIPO DE SUELO**

### **2.5.1 GENERACIÓN DE MAPA DE USO DEL SUELO**

El mapa de uso del suelo del proyecto, maneja en términos relativamente generales, con información que obtiene el SIGAGRO del año 2000, son las agrupaciones de uso del suelo más importantes de la cuenca del Paute.

## **2.5.1.1 DEFINICIÓN DE LAS UNIDADES DE USO**

### **2.5.1.1.1 VEGETACIÓN ARBÓREA Y ARBUSTIVA:**

Vegetación considerada como producto de la interrelación del clima y suelo de una región en la que sensiblemente no han influido otros factores para su establecimiento o áreas en las que la regeneración espontánea después de la tala, es el denominador común.

- **Bosque Natural (Bn)**

Se denomina al ecosistema arbóreo natural primario y secundario que actualmente se halla sin ocupación o intervención humana. Este piso vegetal lo constituyen especies nativas de cada zona con una altura superior a los 15 metros. Ocupada por formación vegetal arbórea leñosa densa, pluriestratificada, integrada por especies propias de la zona, con un alto porcentaje de mezcla de especies forestales.

El paisaje característico del bosque húmedo primario son los pies de monte, cuya característica es la garúa y la neblina constante; abundantes helechos, musgos y líquenes.

- **Bosque intervenido (Bi)**

Ecosistema arbóreo natural primario o secundario que actualmente se halla iniciando la colonización, pero que aún no influye sensiblemente en el medio vegetal. El área de estudio se halla en las zonas altas del pie de monte.

- **Bosque plantado (Bp)**

Masa boscosa formada antropicamente, con una o diferentes especies madereras nativas o introducidas, con manejos silviculturales y dedicada a varios fines como: Producción, protección y recuperación del suelo o recreación.

#### **2.5.1.1.2 VEGETACIÓN ARBUSTIVA**

- **Matorrales o chaparros (Va)**

Vegetación natural cuya composición florística no sobrepasa los 10 metros de altura y la estructura del tallo no alcanza los 15 centímetros de grosor, localizada generalmente en relieves fuertes, producto de la regeneración espontánea. Cubriendo áreas secas a áridas, pero en las vertientes de los sistemas hidrográficos, los chaparros son húmedos a muy húmedos. Se considera en esta categoría a toda aquella vegetación conocida como matorral o chaparro.

#### **2.5.1.1.3 PASTO**

- **Páramo (Pr)**

Vegetación herbácea de alta montaña, resistente a vientos y heladas, asociada ocasionalmente con arbustos, resistentes a bajas temperaturas. Agrupan pajonales, frailejones, almohadillas y arbustos coriáceos.

- **Pasto Natural (Pn)**

Vegetación dominante constituida por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales, utilizados con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.

- **Pasto Cultivado (Pc)**

Vegetación ocupada por especies herbáceas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo conducidos por el hombre o regeneración espontánea de especies introducidas.

En esta categoría se considera también al kikuyo (***Pennisetum clandestinum***) de regeneración espontánea que crece en áreas localizadas sobre los 1800 m.s.n.m.

#### **2.5.1.1.4 CULTIVOS**

Se conceptualiza en este nivel a todos aquellos elementos inherentes a las actividades culturales que el hombre realiza en el campo en busca de sustento.

Para efectos de jerarquización en la representación gráfica se consideran dos categorías en relación a la ocupación a saber:

Aquellas zonas de cultivos con predios pequeños en los cuales el denominador común es la diversidad de cultivos. En este caso solamente se representan los cultivos clasificándoles en especies comunes de ciclo corto o permanente.

Aquellas zonas de grandes extensiones de cultivos (> 50 Ha) producidos con fines de exportación o industriales, son tratados independientemente.

#### **2.5.1.1.4.1 CULTIVOS INDIFERENCIADOS**

Cultivos de ciclos cortos o permanentes que cubren pequeñas superficies, pero conforman una gran unidad, que de ninguna manera pueden clasificarse independientemente, que a su interior no sobresalen plantaciones específicas.

- **Cultivos de Ciclo Corto (Cc)**

Asociación que incluyen cultivos de consumo interno o comercial, cuyo ciclo vegetativo no excede de un año y no son posibles clasificarlos

independientemente ni por asociaciones, pues generalmente se hallan formando parte de minifundios cuyo denominador común son los poli cultivos.

- **Cereales (Ce)**

Con dominancia de cebada, localizados inmediatamente en un piso climático inferior al páramo.

- **Cultivos bajo invernadero (Ci)**

Generalmente flores y hortalizas para exportación, localizados entre los 1800 y 2700 m.s.n.m. Sistemas de producción bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y suelo. En esta categoría el invernadero de plástico es un requisito para atenuar los cambios climáticos y lograr condiciones adecuadas para su producción.

- **Frutales (Cr)**

Cultivos perennes, cuya implantación es estable, localizados en pequeños lotes de policultivos.

#### **2.5.1.1.4.2 CULTIVOS DIFERENCIADOS**

Cultivos de ciclo corto o permanente que cubren grandes superficies y pueden ser clasificados independientemente.

- **Caña de Azúcar (Cñ)**

No existen grandes áreas cubiertas de caña de azúcar, que en la antigüedad se hallaban en la zona de transición.



- **Maíz (Cm)**

En su mayoría se hallan ocupando, las extensas praderas del callejón interandino. Grandes extensiones de maíz forman el paisaje andino. También son muy frecuentes formando parte de policultivos del medio rural precario de la serranía.

#### **2.5.1.1.5 CUERPOS DE AGUA**

- **Natural (Wn)**

Superficies y volúmenes de agua natural estática o en movimiento que reposan sobre la superficie terrestre. Se agrupan en esta clase: lagos, lagunas y todo el sistema hidrográfico general.

- **Artificial (Wa)**

Superficies de agua estancada o en movimiento formadas por acción antrópica, mediante represamiento de una corriente natural o artificial de agua, con fines de uso doméstico, riego, generación de energía o control de inundaciones.

#### **2.5.1.1.6 ERIAL**

- **Afloramiento rocoso , grava , y minas (Er)**

Masa geológica que emerge a la superficie terrestre y que ocupa extensiones considerables de materiales pétreos de diferentes tamaños. En la serranía se presentan en los altos volcanes producto de los deshielos, en las cumbres de

los páramos donde se aprecian los afloramientos rocosos. Se incluyen zonas dedicadas a la explotación minera.

- **Área erosionada (Ae)**

Zonas con elevado grado de desgaste del suelo orgánico, desprovistos de vegetación o con dispersa cobertura vegetal donde aparecen los estratos inferiores improductivos.

En esta categoría se consideran suelos desnudos o suelos en los que aún queda alguna vegetación muy dispersa

- **Áreas con fuertes procesos erosivos (Af)**

En esta categoría se consideran áreas vegetales con un alto porcentaje de procesos erosivos.

- **Área en proceso de erosión (Ap)**

Zonas en las que es evidente la pérdida del suelo superficial por acciones naturales o por intervención del hombre, pero que aún existe un considerable porcentaje de áreas vegetales.

#### **2.5.1.1.7 OTROS USOS**

- **Nieve y hielo (On )**

Glaciares localizados en las cumbres de los distintos volcanes del sistema montañoso interandino.<sup>21</sup>

## **2.5.1.2 RECLASIFICACIÓN DEL USO DEL SUELO REPRESENTATIVOS EN CADA SUBCUENCA**

### **2.5.1.2.1 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA**

#### **2.5.1.2.1.1 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA 1 DE LA CUENCA**

- Bosques con cubierta buena
- Cuerpos de agua
- Nieve
- Pradera
- Tierras cultivadas
- Zonas Residenciales

#### **2.5.1.2.1.2 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE ALTA 2 DE LA CUENCA**

- Bosques con cubierta buena
- Pastizales con condición buena
- Pradera
- Tierras Cultivadas

---

<sup>21</sup> SIGAGRO

## **2.5.1.2.2 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA DE LA CUENCA**

### **2.5.1.2.2.1 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA 1 DE LA CUENCA**

- Bosques con cubierta buena
- Cuerpos de agua
- Nieve
- Pastizales con condición buena
- Pradera
- Tierras cultivadas
- Zonas residenciales

### **2.5.1.2.2.2 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE MEDIA 2 DE LA CUENCA**

- Bosques con cubierta buena
- Bosques con cubierta pobre
- Cuerpos de agua
- Pastizales con condición buena
- Pradera
- Tierras cultivadas
- Zonas Residenciales

### **2.5.1.2.3 USO DEL SUELO QUE CONFORMAN LA PARTE BAJA DE LA CUENCA**

- Bosques con cubierta buena
- Bosques con cubierta pobre
- Cuerpos de agua
- Nieve
- Pastizales con condición buena
- Pastizales con condición pobre
- Pradera
- Tierras cultivadas
- Zonas Residenciales

### **2.5.1.3 METODOLOGÍA PARA USO DEL SUELO**

Como primera actividad se realizó la recopilación e integración de toda la información temática relativa a escala de 1:250 000, para lo que fue necesaria la adquisición de cartografía disponible en varias entidades gubernamentales como SIGAGRO, ODEPLAN, entre otras.

Luego de integrar la información disponible, se trabajó con la temática “Uso del suelo”; asociando las utilidades y usos predominantes. En base a tales criterios se definieron los siguientes usos como muestra en la definición de las unidades de usos.

Según al estudio del uso suelo que se realizó en la cuenca del Paute, se consideró de acuerdo a las cinco subcuencas delineadas; en la parte *alta* según la delineación de las dos subcuencas, el uso del suelo más predominante de acuerdo a sus características es Pradera; en la parte *media* según la delineación de las dos subcuencas, el uso del suelo más predominante de acuerdo a sus características es Pradera en la parte *media 2*, y el uso del suelo que más predomina en la parte *media 1* es Tierras Cultivadas; en la parte *baja* el uso del suelo más predominante es Pradera. Esto quiere decir de manera general en toda la Cuenca del Río Paute existe en abundancia terrenos llanos, regable o muy húmedo, en que se deja crecer la hierba para pasto. Desde luego existen otros usos de usos en la cuenca pero la que predomina es la Pradera. (VER MAPA DE USO DEL SUELO)

Tabla 2.10: Uso del suelo que más predomina en cada subcuenca

<b>SUBCUENCA</b>	<b>USO DEL SUELO</b>
Parte alta 1	Pradera
Parte alta 2	Pradera
Parte media 1	Tierras Cultivadas
Parte media 2	Pradera
Parte baja	Pradera

## **2.5.2 GENERACIÓN DE MAPA DE TIPO DE SUELO**

El mapa de suelos del proyecto maneja en términos relativamente generales, con información que obtiene el SIGAGRO de los años 1978 a 1988, son las agrupaciones de suelos más importantes de la cuenca del Paute.

### **2.5.2.1 SUELO**

El término suelo se deriva de la palabra latina SOLUM que significa piso. Se define al suelo como la capa superior de la tierra que sirve de sustento para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Está constituido por cuatro componentes principales: material mineral, material orgánica, aire y agua.

### **2.5.2.2 EL PERFIL DEL SUELO**

La formación y evolución del suelo, por influencia de los factores ecológicos, conducen a la diferenciación de las capas sucesivas que se extienden más o menos paralelas a la superficie y que muestran diferencias en sus características tales como la estructura, coloración, etc. y por la disposición se llaman horizontes. Este conjunto de horizontes se llama “perfil”.

- **Horizonte A:** Es la capa superficial que tiene como característica principal la acumulación de materia orgánica a causa de concentración de raíces cerca de la superficie y por la acumulación de residuos. Este horizonte, por estar expuesto a la superficie se encuentra en contacto con fenómenos meteorológicos como la lluvia, el viento, la radiación solar, etc.
- **Horizonte B:** Es aquel donde se manifiesta en mayor grado la evolución de un suelo, es decir los procesos característicos de cambios diversos

que pueden ir desde el color hasta las modificaciones de la estructura o de acumulación de materiales finos, etc.

- **Horizonte C:** Corresponde al material al cual se ha formado el suelo o material de partida. (Figura 2.8)

<b>Horizonte A</b>
<b>Horizonte B</b>
<b>Horizonte C</b>

Figura 2.8: Muestra la disposición de horizontes

En la cuenca del Paute se ha elaborado el estudio del suelo de acuerdo a la textura, taxonomía, drenaje y profundidad, esta temática se evaluó según estudios hechos por el SIGAGRO.

#### **2.5.2.2.1 TEXTURA**

La textura se refiere técnicamente a la clasificación de las partículas de acuerdo a su tamaño y la proporción en la que se encuentran. De acuerdo al tamaño las partículas se clasifican en arenas (2.0 a 0.05 mm), limos (0.05 a 0.002 mm), y arcillas (menos de 0.002 mm). Para caracterizar este elemento se agrupó las clases texturales presentes en el área en estudio, en cuatro categorías: (VER MAPA DE TEXTURAS)



Tabla 2.11: Las categorías de textura y sus correspondientes clases texturales son utilizadas en la Cuenca del Paute.<sup>22</sup>

CLASE	NOMBRE	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
1	gruesa	g	arenosa (fina, media, gruesa) (11), arenoso franco (12)
2	moderadamente gruesa	mg	franco arenoso (fino a grueso) (21), franco limoso (22)
3	media	m	franco (31), limoso (32), franco arcilloso < 35% de arcilla) (33), franco arcillo
4	fina	f	franco arcilloso (> a 35%) (41), arcilloso (42), arcillo arenoso (43), arcillo limoso (44)
5	muy fina	mf	arcilloso (> 60%) (51)

### 2.5.2.2.2 TAXONOMÍA

Para la clasificación de los suelos de acuerdo al mapa de taxonomía según el Sistema Norteamericano SOIL TAXONOMY (USDA 1975), que se elaboró para la cuenca del Paute, este sistema se basa primordialmente en la morfología de los suelos, descrita en términos de sus horizontes. (ANEXO D)

Este sistema indicado utiliza seis categorías, cada una de las cuales utiliza sus propias características, siendo ellas, desde el nivel más bajo hasta el nivel más alto, de generalización: (VER MAPA DE TAXONOMÍA)

- **Orden:** Que permite agrupar a los suelos de acuerdo a los procesos de formación indicados de acuerdo por la presencia o ausencia de horizontes diagnóstico.
- **Sub Orden:** Nos indica una homogeneidad genética, es una sub división de los órdenes de acuerdo a la presencia o ausencia de propiedades

<sup>22</sup> Adaptado del Convenio MAG-IICA CLIRSEN (15)

asociadas con la humedad del suelo, material de partida dominante y efectos de vegetación.

- **Gran Grupo:** Sub divisiones de las sub órdenes de acuerdo con la clase, disposición de los horizontes, temperatura y humedad del suelo, presencia o ausencia de capas diagnósticas.
- **Sub Grupo:** Constituyen clases que expresan el concepto central del Gran Grupo o transiciones a otros grandes grupos o sub órdenes.
- **Familia:** Expresa grandes propiedades importantes para el crecimiento de las plantas; clases: texturales, mineralogía dominante o temperatura del suelo.
- **Serie:** Clases y disposición de los horizontes, color, estructura, consistencia o reacción de los horizontes, sus propiedades químicas o mineralógicas.

En el mapa de Suelos de Taxonomía de la cuenca del río Paute, identificamos con 16 Grandes Grupos, agrupados en 9 Sub órdenes y 6 órdenes (SOIL TAXONOMY) y de acuerdo al siguiente cuadro. El sistema utiliza para la nomenclatura en estos niveles categóricos, casi siempre raíces griegas y latinas, que permite dar nombres descriptivos de las propiedades de los suelos.

Tabla 2.12: Las categorías de taxonomía según orden, sub orden y gran grupo son utilizadas en la Cuenca del Paute.<sup>23</sup>

ORDEN	SUB ORDEN	GRAN GRUPO
-------	-----------	------------

<sup>23</sup> SIGAGRO

inceptisol	andept	hydrandept
inceptisol	andept	hydrandept+troporthent
inceptisol	andept	hydrandept(histic cryandept)
histisol	hemist	tropohemist (cryaquept)
inceptisol	tropept+andept	dystropept+hydrandept
inceptisol	tropept	dystropept
inceptisol	tropept+andept	dystropept+hydrandept
inceptisol	andept	dystrandept
histisol (inceptisol)	hemist (aquept)	tropohemist (cryaquept)
inceptisol+entisol	andept+orthent	hydrandept+troporthent
inceptisol+entisol	andept+orthent	dystrandept+troporthent
mollisol	udoll	duriudoll
alfisol	udalf	tropudalf(eutropept)
inceptisol+entisol	andept+orthent	cryandept+troporthent
mollisol	udoll	hapludoll(argiudoll)
mollisol	udoll	argiudoll
vertisol	udert	cromudert
alfisol	udalf	rhodudalf
alfisol	ustalf	rhodustalf
vertisol	ustert	cromustert
entisol	orthent	ustorthent
inceptisol+alfisol	tropept+udalf	dystropept+tropudalf

### 2.5.2.2.3 DRENAJE

Es la rapidez con que el agua se desplaza, ya sea por escurrimiento superficial o por su movimiento a través del perfil hacia espacios subterráneos.

Para el presente estudio, al drenaje se lo agrupó en cuatro clases:

- **Excesivo:** El agua se elimina del suelo rápidamente, ya sea por que posee texturas muy livianas o bien pendientes escarpadas y expuestas; es decir, sin cobertura vegetal.
- **Bueno:** El agua se elimina del suelo con facilidad pero no con rapidez.

- **Moderado:** El agua se elimina del suelo con cierta lentitud, de modo que el perfil permanece saturado durante periodos cortos pero apreciables.
- **Mal drenado:** El agua del suelo se elimina tan lentamente que la capa freática permanece en la superficie o sobre ésta la mayor parte del tiempo.

Tabla 2.13: Clases de drenaje, sigla y descripción son utilizadas en la Cuenca del Paute.<sup>24</sup>

CLASE	NOMBRE	SÍMBOLO
1	Excesivo	e
2	Bueno	b
3	Moderado	mm
4	Mal drenado (imperfecto)	md

#### 2.5.2.2.4 PROFUNDIDAD

Se define como profundidad efectiva del suelo al grosor de las capas del suelo y subsuelo en las cuales las raíces pueden penetrar sin dificultad, en busca de agua, nutrimentos y sostén. Su límite inferior está definido por capas u horizontes compactos, que impiden el desarrollo de las raíces. La profundidad efectiva del suelo se mide en centímetros de manera perpendicular a la superficie terrestre.

---

<sup>24</sup> Adaptado de Cubero

Para la caracterización de las unidades edafológicas, presentes en la Cuenca del Río Paute se agrupó cuatros clases de profundidad efectiva, las mismas que se presentan a continuación:

Tabla 2.14: Clases de profundidad efectiva del suelo, sigla, descripción y rango son utilizadas en la Cuenca del Paute.<sup>25</sup>

<b>CLASE</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>RANGO (cm)</b>
1	superficial	s	0 – 20
2	poco profundo	pp	20 – 50
3	moderadamente profundo	m	50 – 100
4	profundo	p	> 100

Mediante estas cuatro características generales se elaboró el estudio del suelo en el proyecto, esta información se halla mediante los mapas digitales que se encuentran dentro la base de datos del programa Arc View 3.2

### **2.5.2.3 METODOLOGÍA PARA TIPO DE SUELO**

Con toda la recopilación de estos datos, posteriormente se integraron los mapas con la temática “Tipo de Suelo” a escala de 1:250 000, para lo cual se definieron a sí mismo cuatro tipos básicos, con el propósito de agrupar varias formaciones en función de sus características litológicas, potencial de escorrentía, tasa de infiltración, porcentaje de humedad, capacidad de transmisión de agua, contenido de material arcilloso y grado de permeabilidad.

A continuación se describen la tipología básica de suelos que se han definido para la elaboración del presente estudio hidrológico:

Tabla 2.15: Tipo de suelo A

--	--

<sup>25</sup> Adaptado del Convenio MAG-IICA CLIRSEN

<b>TIPO DE SUELO (CARACTERÍSTICAS)</b>	<b>SIMBOLOGÍA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo potencial de escorrentía</li> <li>• Alta Infiltración</li> <li>• Mucha Humedad</li> <li>• Litología de gravas, y arenas</li> <li>• Suelos profundos</li> <li>• Alta tasa de transmisión de agua</li> <li>• Alta permeabilidad</li> <li>• Porcentaje de arcilla (0-10%)</li> </ul>	<b>A</b>

Tabla 2.16: Tipo de suelo B

<b>TIPO DE SUELO (CARACTERÍSTICAS)</b>	<b>SIMBOLOGÍA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderadamente Bajo potencial de escorrentía</li> <li>• Tasa de Infiltración Moderada</li> <li>• Moderada Humedad</li> <li>• Litología de arenas calcáreas con limos (margas)</li> <li>• Granulometría entre gruesa y fina</li> <li>• Moderadamente profundos</li> <li>• Moderada permeabilidad</li> <li>• Porcentaje de arcilla (10-30%)</li> </ul>	<b>B</b>

Tabla 2.17: Tipo de suelo C

<b>TIPO DE SUELO (CARACTERÍSTICAS)</b>	<b>SIMBOLOGÍA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderadamente alto potencial de escorrentía</li> <li>• Infiltración lenta (cuando muy húmedos)</li> <li>• No existe movimiento hídrico</li> </ul>	

vertical <ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología de limo con arcillas y calizas con limos</li> <li>• Granulometría fina a muy fina</li> <li>• Suelos generalmente poco profundos (0.5–1.0m)</li> <li>• Permeabilidad lenta.</li> <li>• Porcentaje de arcilla (30-70%)</li> </ul>	<b>C</b>
---	----------

Tabla 2.18: Tipo de suelo D<sup>26</sup>

<b>TIPO DE SUELO (CARACTERÍSTICAS)</b>	<b>SIMBOLOGÍA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto potencial de escorrentía</li> <li>• Infiltración muy lenta</li> <li>• Altamente expansivos</li> <li>• Litología de arcillas, calizas (cangahua)</li> <li>• Nivel freático alto permanente</li> <li>• Presencia de sales</li> <li>• Material casi impermeable</li> <li>• Suelos poco profundos</li> <li>• Transmisión de agua muy lenta</li> <li>• Coloración negra, humíferos</li> <li>• Porcentaje de arcilla (70-100%)</li> </ul>	<b>D</b>

Según al estudio del suelo que se realizó en la cuenca del Paute, se consideró de acuerdo a las cinco subcuencas delineadas; en la parte *alta* según la delineación de las dos subcuencas, el suelo más predominante de acuerdo a sus características es el de tipo B, con un suelo moderadamente profundo, moderada humedad, permeabilidad moderada, tasa de infiltración moderada, bajo potencial de escorrentía, etc.; en la parte *media* según la delineación de

<sup>26</sup> INAMHI, Estudios e Investigaciones Hidrológicas

las dos subcuencas, el suelo más predominante de acuerdo a sus características es de tipo B en la parte *media 2*, con un suelo moderadamente profundo, moderada humedad, permeabilidad moderada, tasa de infiltración moderada , bajo potencial de escorrentía, etc., y el suelo que más predomina en la parte *media 1* es el de tipo C, con un suelo generalmente profundo, alto potencial de escorrentía, infiltración lenta, permeabilidad lenta, etc.; en la parte *baja* el suelo más predominante es el de tipo A, con un suelo profundo, alta permeabilidad, alta infiltración, mucha humedad, bajo potencial de escorrentía, etc. (VER MAPA DE TIPO DE SUELO)

Tabla 2.19: Tipo de suelo que más predomina en cada subcuenca.

<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>
Parte alta 1	B
Parte alta 2	B
Parte media 1	C
Parte media 2	B
Parte baja	A

## **2.6 SUPERPOSICIÓN DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y TIPO DE SUELO PARA LA OBTENCIÓN DEL GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO (CN)**

El análisis espacial de datos se puede llevar a cabo mediante numerosas operaciones (lógicas y matemáticas) ejecutadas por los SIG, y entre ellas los procesos más comunes son el cruzamiento o superposición y la reclasificación de mapas. La superposición de mapas es un procedimiento donde dos o más coberturas temáticas (por ejemplo tipo de suelos y uso de suelos) son



combinadas y el resultado es una nueva cobertura temática compuesta (Figura 2.9).

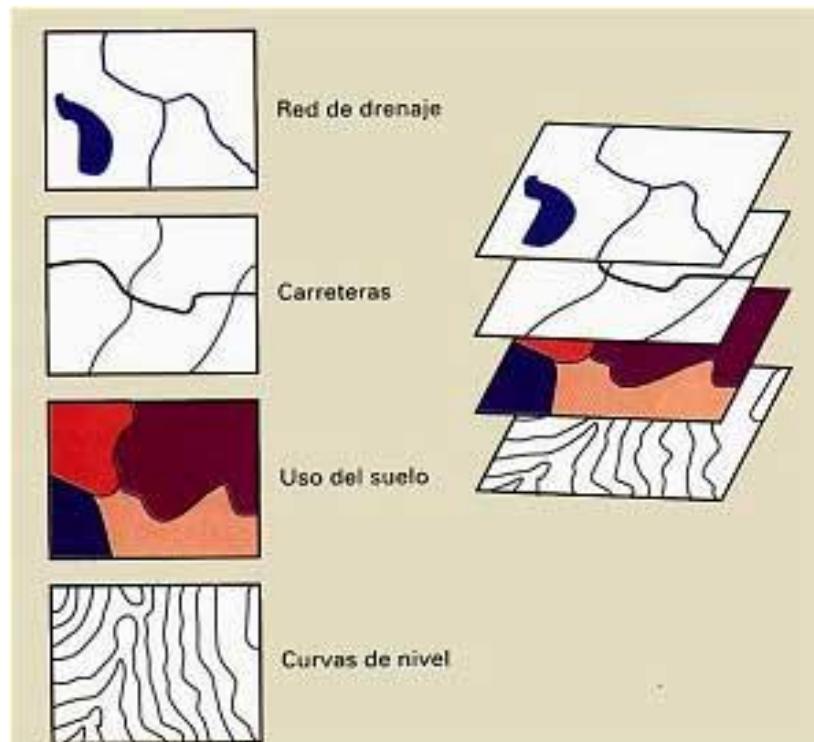


Figura 2.9: Análisis espacial. Superposición de mapas (coberturas temáticas)

La reclasificación de coberturas permite la representación de una sola categoría o unas pocas por cobertura. En nuestro caso, nos interesó el CN o el grupo hidrológico del suelo y para la determinación contamos para tal fin con los datos de coberturas temáticas donde se registraran datos de uso del suelo y tipo de suelo; con la unión de las dos coberturas fue posible determinar el Número Hidrológico del Suelo. (ANEXO E)

También se pueden combinar los procedimientos de reclasificación y superposición de coberturas, según los objetivos planteados en el estudio. Si

por ejemplo ahora se quiere conocer que porcentaje de suelos de textura tipo "A" se ve afectado por un uso del suelo "pradera", deberíamos reclasificar la cobertura de textura de suelos representando sólo aquellas áreas con suelo de textura "A", para luego superponer dicha cobertura con aquella de Praderas. Como resultado se obtendrá una porción de suelo de tipo "A" afectado por un uso de pradera.<sup>27</sup> (VER MAPA DE GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO CN)

Tabla 2.20: Número Hidrológico del Suelo o CN que más predomina en las cinco subcuencas mencionadas, obtenidas mediante el tipo de suelo y uso de suelo que más predominan

<b>SUBCUENCAS</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>USO DEL SUELO</b>	<b>CN</b>
Parte alta 1	B	Pradera	<b>58</b>
Parte alta 2	B	Pradera	<b>58</b>
Parte media 1	C	Tierras Cultivadas	<b>78</b>
Parte media 2	B	Pradera	<b>58</b>
Parte baja	A	Pradera	<b>30</b>

## **2.7 EDICIÓN Y ELABORACIÓN DE MAPAS**

La presentación de los resultados que se obtendrá y serán utilizados como tablas o listas de datos, gráficos o figuras, mapas impresos, mapas obtenidos a partir de la información de imágenes satelitarias con superposición de uso de suelos, tipo de suelos, cartografía base, delineación de subcuencas y modelo digital del terreno; estos resultados pueden obtenerse tanto en papel como en soporte magnético.

<sup>27</sup> INAMHI, Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Para nuestro proyecto los resultados se encuentran en una base de datos a escala 1:250 000, esta información se la obtuvo en el departamento técnico del Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria (SIGAGRO).

Para la presentación de los mapas elaborados se encuentra impresos en formato INEN A3 a escala 1:400 000, en donde indica:

- Mapa de la cuenca de acuerdo al Uso
- Ubicación de la zona del proyecto
- Simbología
- Leyenda
- Escala del gráfico
- Ubicación del Norte
- Cuadrícula de referencia (longgrado / latigrado)

## **2.8 ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)**

Se puede definir al modelo digital del terreno (MDT), como la representación digital de la variación continua del relieve en el espacio. Siendo digital, el modelo puede ser usado por un sistema de información geográfica (SIG) para derivar una variedad de mapas secundarios.

Los MDT y SIG considerados en los estudios son del tipo discreto o “raster “ (trama de píxeles), es decir, que se divide el área a ser mapeada en celdas (pequeñas áreas cuadradas), que contienen cada una un solo valor para toda el área de la celda. (Figura 2.10 – Figura 2.11)

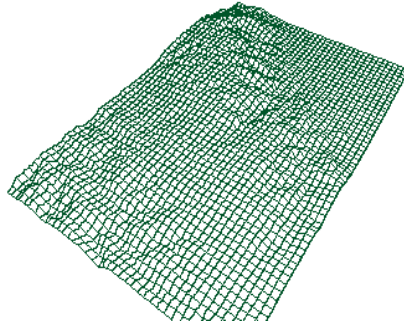


Figura 2.10: 3D del Modelo digital del terreno (MDT)

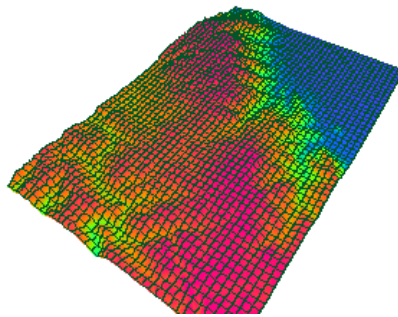


Figura 2.11: Malla de pixeles

La resolución de un MDT viene determinada por la frecuencia de observaciones utilizadas; las representaciones más empleadas por los MDT son una malla raster de celdas regulares o una malla de puntos vectoriales. En ambos casos se debe conocer las coordenadas geográficas (localización  $x$ ,  $y$ ) y registrar un valor  $z$  para cada celda o punto. Este valor  $z$  es el atributo de la superficie y casi siempre se refiere a la altitud.

Los MDT, son fundamentales para la evaluación de tierras en áreas montañosas, ya que muestran la elevación de cada celda sobre el nivel de mar.

Del MDT, el SIG puede calcular el grado de pendiente de cada celda, que es otra variable que por supuesto influye sobre los usos posibles de la tierra además de los factores físicos tales como las tasas de escurrimiento y de erosión hídrica. Del MDT el SIG también puede calcular la orientación (el azimut) de cada celda y de ahí la delineación de las cuencas hidrográficas.

Un modelo digital del terreno es de mucha ayuda ya que a través de éste se pueden obtener las pendientes con más exactitud que las trazadas manualmente por restitución de fotografía aérea. (VER MAPA M.D.T.)

### 2.8.1 CLASIFICACIÓN DE RANGO DE PENDIENTES A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

Tabla 2.21: Rango de pendientes para determinar el MDT.

CLASE	RANGO DE PENDIENTE %	FORMA DEL RELIEVE
1	0 – 5	Pendiente débil, plano o casi plano.
2	5 – 12	Pendiente con inclinación regular, suave o ligeramente ondulada
3	12 – 25	Pendiente irregular, ondulación moderada.
4	25 – 50	Pendientes fuertes, colinado.
5	50 – 70	Pendientes muy fuertes, escarpado.
6	>70	Pendientes abruptas, montañoso

Para crear los modelos digitales del terreno se parte de:

1. Información base: cartas topográficas digitales escala 1:250 000, que contienen la información de curvas de nivel. Archivos en formato ArcView 3.2
2. Selección de las curvas de nivel con su respectivo atributo de altura.
3. Curvas de nivel que se encuentra en formato ArcView 3.2.
4. Generación del modelo digital del terreno (MDT): en el software ArcView 3.2.
5. Archivo Digital de la cuenca del Paute.

## **2.9 CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y DE RETARDO**

### **2.9.1 CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN**

Es el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca toma para llegar a una sección determinada de dicha corriente. El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada. Se mide en minutos o en horas.

Para determinar el tiempo de concentración en la cuenca del Paute se aplica la fórmula de “Kirpich”:

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{L_{RÍO}^3}{\frac{2}{3}(Cota_{MAX} - Cota_{MIN})} \right)^{0.385}$$

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración (min)

L<sub>RÍO</sub>: Longitud del río desde el punto más alejado hasta la estación (m)

ΔH : Diferencia de cotas (m)<sup>28</sup>

### 2.9.2 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETARDO

El tiempo de retardo se define como el tiempo transcurrido entre el centro de masas de la lluvia efectiva y el centro de masas del hidrograma de escurrimiento directo. Debido a la dificultad en determinar el centro de masas del hidrograma de escurrimiento directo, el tiempo de retardo se define también como el tiempo transcurrido entre el centro de masa de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de escurrimiento directo.<sup>29</sup>

Además se dispone de ecuaciones o relaciones empíricas que sirven para estimar el tiempo de retardo, o este puede ser vía calibración.

Se mide en minutos o en hora.

Para determinar el tiempo de retardo en la cuenca del Paute se aplica la siguiente fórmula que indica el Manual HEC-HMS:

---

<sup>28</sup> Chow, McGraw Hill

<sup>29</sup> Shingh, 1992

$$T_{Lag} = 0.35 * T_c$$

$T_{Lag}$ : Tiempo de retardo (min o hr)

$T_c$  : Tiempo de concentración (min o hr)<sup>30</sup>

Los cálculos tanto de tiempo de concentración y tiempo de retardo se encuentran en el ANEXO C.

## 2.10 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Es la relación que existe entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado.

Para determinar el coeficiente de escurrimiento promedio se realiza por subcuencas, mediante el área de cada uso de suelo que existe en cada subcuenca, el tipo de suelo según su permeabilidad y la pendiente del terreno ya sea esta pronunciada, alta, media, suave y despreciable.

Según los cálculos que se realizó, se tiene una pendiente de terreno para cada subcuenca “media”; es decir, menos de 5%.

Para encontrar el coeficiente de escurrimiento promedio ( $C_e_{Prom}$ ) en cada subcuenca se utilizó la tabla que se encuentra en el ANEXO F.

Con la siguiente fórmula se determina el  $C_{e_{promedio}}$  para cada subcuenca, estos resultados se puede visualizar en el ANEXO G

---

<sup>30</sup> Manual HEC-HMS 2001



$$C_{e_{promedio}} = \frac{A_1 C_{e-1} + A_2 C_{e-2} + \dots + A_n C_{e-n}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Ce : Coeficiente de escurrimiento según la tabla (ANEXO F)

A : Área del uso de suelo

Ce promedio : Coeficiente de escurrimiento promedio en cada subcuenca<sup>31</sup>

## **CAPÍTULO 3**

### **APLICACIÓN DEL PAQUETE HEC-HMS 3.0**

#### **3.1 METODOLOGÍA**

##### **3.1.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PAQUETE HEC-HMS**

###### **3.1.1.1 DEFINICIÓN DEL HEC-HMS**

Inicialmente el proyecto se iba a realizar con el paquete WMS 3.1, por razones económicas en el INAMHI no se pudo hacer la compra del paquete, razón por la cual la institución recomendó la utilización del paquete HEC-HMS.

---

<sup>31</sup> Chow, McGraw Hill

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica tipo: *evento, lineal y semidistribuido*; desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias *subcuencas* (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos. El HEC-HMS, incluye la mayor parte de las prácticas de HEC-1 e incorpora como elementos adicionales:

- Un método de transformación lineal de la escorrentía (basado en una modificación del hidrograma unitario de Clark) que puede utilizarse en una representación de la cuenca a través de celdas, con datos distribuidos de precipitación obtenidos por ejemplo de registros de radar.
- Una opción de pérdida distribuida de humedad en suelos que aplica el mismo principio de las celdas y puede utilizarse en simulaciones sobre períodos largos (de días o meses).

### **3.1.1.2 FUNCIONAMIENTO DEL PAQUETE HEC-HMS**

El programa incluye una interfaz gráfica que permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. El documento de ayuda incorporado en el programa aclara la utilización de las opciones del programa.

Los archivos de extensión DSS (Data Storage System) se utilizan para almacenar y trabajar con series de tiempo, funciones emparejadas y datos de grilla. Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

1. Subcuencas (subbasins)
2. Tramos de tránsito (routing reach)
3. Uniones (junctions)
4. Embalses (reservoirs)
5. Fuentes (Sources)
6. Sumideros (sinks)
7. Derivaciones (diversions)

Con estos siete componentes, se puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que se está tratando y como permita la información de campo disponible. Si se cuenta con información digital de campo, el HEC-HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo.

Los elementos anteriores se disponen con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos desde las subcuencas que conforman las cabeceras aguas arriba hasta el punto de salida de todo el caudal aguas abajo. Hay que prestar atención a este criterio, ya que los cálculos siguen rigurosamente esta secuencia. Por tal motivo, el primer paso en la [preparación de la información](#) consiste en definir correctamente la estructura de la cuenca que se pretende simular.

El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

- Módulo de precipitación: Permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.
- Módulo de la cuenca: Permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir el hidrograma total de salida.

- Módulo de control: Incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos.

Estos tres módulos deben definirse completamente antes de iniciar la [corrida de la simulación](#).

### **3.1.1.3 ELEMENTOS DEL PAQUETE HEC-HMS**

Los modelos matemáticos incluidos en el programa HEC-HMS describen como una cuenca responde a la precipitación sobre ésta y al flujo de agua de la corriente dentro de ella. En lo que se refiere a las ecuaciones y varios procedimientos de solución, todos los modelos tienen los siguientes elementos:

- Variables de estado: Estos términos en las ecuaciones del modelo representan el estado del sistema hidrológico en un tiempo y localización particular.
- Parámetros: Estas son medidas numéricas de las propiedades del sistema real. Los parámetros pueden ser considerados la perrilla de afinación de un modelo. Los valores de los parámetros son ajustados para que el modelo proporcione la respuesta del sistema físico. Los parámetros deben tener significado físico obvio y pueden ser empíricos o determinados analíticamente. Existen parámetros que no tienen relación directa con alguna propiedad física y que solo pueden ser estimados mediante calibración.

- Condiciones de frontera: Estos son los valores del sistema de entrada, las fuerzas que actúan en el sistema hidrológico y causa cambios en él. La condición de frontera más común en el HEC-HMS es la precipitación, aplicando esta condición se produce el escurrimiento de una cuenca.
- Condiciones iniciales: los componentes del HEC-HMS son modelos flujo inestable, los cuales describen los cambios del flujo en el tiempo. Estas condiciones son empleadas para resolver de alguna forma las ecuaciones diferenciales que describen un componente del sistema hidrológico.

### **3.1.2 SITUACIONES HIDROLÓGICAS QUE SE MODELAN EN HEC-HMS**

El programa HEC-HMS permite simular eventos aislados de crecientes asociados con un patrón de tormenta de diseño para un cierto período de retorno. La suposición de que el período de retorno de la tormenta es coincidente con el período de retorno de la creciete respectiva, haciendo evidente que el tratamiento probabilístico de los dos fenómenos, aunque no es mutuamente excluyente si depende de otros factores, entre ellos el área de la cuenca considerada, las condiciones antecedentes de humedad en los suelos para períodos largos y los cambios introducidos por el hombre en el uso y conservación de los suelos. El programa permite considerar las condiciones antecedentes de humedad para un registro de precipitación de muchos días a partir de unas condiciones iniciales, lo que puede asemejarse en parte a un

modelo continuo y distribuido de humedad en los suelos, ya que se trabaja con un modelo tipo celdas.

Los resultados arrojados por HEC-HMS permiten:

1. Dimensionar obras de control de inundaciones como: piscinas de amortiguamiento de crecientes y embalses.
2. Establecer dimensiones preliminares de ponederos, alcantarillas viales y sistemas de drenaje pluvial.
3. Estudiar el impacto ambiental de las crecientes, causado por la transformación del uso de los suelos en cuencas rurales y urbanas.

### **3.1.3 INFORMACIÓN QUE REQUIERE EL PAQUETE HEC-HMS**

La información que necesita el programa está relacionada directamente con los métodos de cálculo que maneja. Existen cinco grupos básicos de información que deben suministrarse a HEC-HMS para efectuar las simulaciones:

1. Información acerca de la precipitación histórica o de diseño.
2. Información acerca de las características del suelo.
3. Información morfométrica de las subcuencas.
4. Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.

5. Información hidráulica de los tramos de canal y de las capacidades de los embalses (métodos de tránsito).

Para la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, además de la información anterior 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.

### 3.1.4 INFORMACIÓN SOBRE LA PRECIPITACIÓN HISTÓRICA O DE DISEÑO

En la siguiente tabla se resume la información que solicita HEC-HMS según el método seleccionado para definir la tormenta histórica o de diseño:

Tabla 3.1: Información sobre la precipitación histórica o de diseño

MÉTODO	INFORMACIÓN REQUERIDA
Hietograma especificado por el usuario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de tormentas (día de inicio y finalización e intervalo de medición en minutos) en las estaciones pluviográficas localizadas dentro de la cuenca.</li> <li>2. Identificación de las estaciones y sus correspondientes subcuencas.</li> </ol>



Datos de estaciones, ponderados por el usuario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de tormentas (día de inicio y finalización e intervalo de medición en minutos) y precipitaciones totales en las estaciones pluviográficas y pluviométricas localizadas dentro de la cuenca.</li> <li>2. Ponderación espacial y temporal de los datos de las estaciones para cada subcuenca (ej. polígonos de Thiessen o inverso de la distancia).</li> <li>3. Índice de precipitación para cada subcuenca.</li> </ol>
<p>Ponderación con el inverso de la distancia</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Localización coordenada de las estaciones dentro de la cuenca (latitud y longitud de cada una).</li> <li>2. Especificación de los nodos para cada subcuenca.</li> <li>3. Para cada uno de los nodos, definición del índice de precipitación, la ponderación y su localización coordenada (latitud y longitud).</li> </ol> <p>Precipitación no uniforme, evaluada en celdas o grillas</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Registros de precipitación codificados por celdas en un archivo DSS.</li> <li>2. Determinación del tiempo local (opcional).</li> </ol> <p>Nota: requiere información detallada de la distribución de la precipitación, no siempre disponible (ej. registros de radar).</p>	
Tormenta hipotética basada en análisis de frecuencias	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Probabilidad de excedencia de la lluvia (entre el 50% y el 1%).</li> <li>2. Área de cubrimiento de la tormenta.</li> <li>3. Origen de los datos (serie anual o parcial).</li> <li>4. Intervalo de tiempo de cálculo para la máxima intensidad de la lluvia (entre 5 minutos y 6 horas).</li> <li>5. Duración de la tormenta (entre 1 hora y 10 días).</li> <li>6. Registro de la tormenta con período de retorno de un año.</li> </ol>
Tormenta estándar de proyecto (E.U.)	Este método sólo es aplicable en los Estados Unidos.
Sin precipitación	No requiere información alguna, y se aplica sólo para evaluar el comportamiento de fuentes, sumideros, uniones, tramos de canal, embalses o derivaciones. La estructura de la cuenca en este caso no debe contener subcuencas que son las que requieren la información relativa a la precipitación.

### 3.1.5 INFORMACIÓN SOBRE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD DEL SUELO

La tabla resume la información que solicita HEC-HMS según el método seleccionado para determinar las infiltraciones durante eventos de tormenta:

Tabla 3.2 Información sobre las condiciones de humedad del suelo

MÉTODO	INFORMACIÓN REQUERIDA
Pérdidas iniciales y constantes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Tasa de infiltración constante <math>\square</math> .</li> <li>3. Porcentaje de área impermeabilizada (zonas urbanas, cubiertas de invernaderos).</li> </ol>
Número de Curva	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Número de curva, calculado como promedio sobre la subcuenca respectiva.</li> <li>3. Porcentaje de área impermeabilidad.</li> </ol>
Números de curva asociados a celdas o grillas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relación de abstracción inicial S derivada del mismo método del SCS.</li> <li>2. Factor de escala para la retención potencial (representa las condiciones antecedentes de humedad AMC).</li> </ol> <p>Nota: cada celda tiene su propio CN y pérdidas iniciales diferentes, relacionadas con su condición antecedente de humedad AMC.</p>
Green & Ampt	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pérdidas iniciales (mm).</li> <li>2. Volumen de déficit de humedad.</li> <li>3. Succión del frente húmedo (mm).</li> <li>4. Conductividad hidráulica (mm/h).</li> <li>5. porcentaje de área impermeable.</li> </ol> <p>Nota: requiere información detallada de la distribución de la precipitación, no siempre disponible (por ej. registros de radar).</p>
Déficit y pérdidas constantes en simulaciones continuas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Déficit inicial de humedad en el suelo (mm) para simulación continua.</li> <li>2. Máximo déficit de humedad del suelo en períodos sin lluvia (mm).</li> <li>3. Tasa de pérdida constante (mm/h) cuando el déficit es cero.</li> <li>4. Tasas de recuperación mensual del déficit en (mm/día).</li> <li>5. Porcentaje del área impermeable.</li> </ol>
Ninguna pérdida	Considera que toda la subcuenca es impermeable.

### 3.1.6 INFORMACIÓN SOBRE LA MORFOMETRÍA DE LAS SUBCUENCAS

Algunas de las características morfométricas que requiere HEC-HMS para realizar los cálculos no están explícitas en las ventanas. Por ejemplo, las

pendientes y longitud del cauce principal y de las laderas son necesarias para calcular los tiempos de concentración y los diagramas área-forma que son datos de entrada para los métodos de hidrogramas unitarios sintéticos.

Las características morfométricas que deben considerarse para cada subcuenca son las siguientes:

Tabla 3.3: Información sobre la morfometría de las subcuencas

CARACTERÍSTICA	NECESARIA PARA
<b>Área de las subcuencas</b>	Definir todos los cálculos de capacidad y conversión de los volúmenes de lluvia en escorrentía. Es el factor morfométrico de mayor importancia en hidrología.
Longitud y pendientes del cauce principal	Calcular los tiempos de concentración de las subcuencas y los tiempos de viaje en el método de la onda cinemática.
Curvas de nivel y diagramas área-tiempo y área forma	Determinar la concentración de caudales en función del tiempo y de la forma de la cuenca en el método del HU de Clark
Secciones transversales de los canales, longitudes de cauces principales y secundarios, pendientes, formas, rugosidades de lecho y superficie	Realizar los cálculos de tránsito por el método de la onda cinemática.

### 3.1.7 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA EN ESCORRENTÍA

La parte más importante del modelo de simulación de HEC-HMS la constituyen los métodos para estimar la forma en que la lluvia se convierte en escorrentía. En la siguiente tabla se enlista la información requerida según el método de transformación seleccionado:

Tabla 3.4: Información hidrológica del proceso de transformación de lluvia en escorrentía

MÉTODO	TIPO	INFORMACIÓN REQUERIDA
Hidrograma unitario definido por el usuario	Hidrológico, empírico	Abscisas y ordenadas del hidrograma unitario de entrada cuya duración no necesariamente debe coincidir con la del intervalo de cálculo del programa, pero debe ser constante.
Hidrograma unitario sintético de Clark	Hidrológico, semiempírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de concentración (h)</li> <li>2. Coeficiente de almacenamiento R(h)</li> <li>3. Diagrama área tiempo estándar o definido por el usuario.</li> </ol>
Hidrograma unitario sintético modificado de Clark	Hidrológico, semiempírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de concentración (h) general para cada subcuenca.</li> <li>2. Coeficiente de almacenamiento R(h) general para cada subcuenca.</li> <li>3. Archivo con los parámetros asociados a cada celda o grilla como sus coordenadas y el un índice de tiempo de viaje.</li> </ol> <p>El tránsito se hace en forma lineal hasta la salida de cada celda y los valores se van acumulando hasta llegar a la salida de toda la cuenca.</p>
Hidrograma unitario sintético de Snyder	Hidrológico, semiempírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tiempo de retardo Tlag (h)</li> <li>2. Coeficiente al pico función del caudal pico, el tiempo al pico y el área de la subcuenca Cp (h)</li> <li>3. Diagrama área tiempo estándar o definido por el usuario.</li> </ol>
Hidrograma unitario sintético del SCS	Hidrológico, semiempírico	Tiempo de retardo Tlag (h, minutos).
Onda cinemática y Muskingum-Cunge	Hidráulico, físico	El hidrograma de salida de la subcuenca se define en tres planos: uno de sobreflujo (longitud, pendiente y rugosidad del terreno) que conduce a otro de colectores secundarios (longitud, pendiente, n de Manning, forma y ancho del canal y talud lateral xH: 1V) y de estos a un canal principal, definido por los mismos factores de los colectores.

### 3.1.8 INFORMACIÓN SOBRE EL TRÁNSITO DE CAUDALES A TRAVÉS DE CANALES Y EMBALSES

El tránsito de los caudales a través de canales y embalses es otro de los puntos críticos de la simulación con el programa HEC-HMS. En la siguiente tabla se resume el tipo de información necesaria según el método escogido para calcular el tránsito:

Tabla 3.5: Información sobre el tránsito de caudales a través de canales y embalses

MÉTODO	TIPO	INFORMACIÓN REQUERIDA
Muskingum	Hidrológico, empírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>Factor de tiempo de viaje <math>K(h)</math>, constante para todo el tramo.</li> <li>Factor adimensional de ponderación del amortiguamiento o retardo (entre 0 y 0.5).</li> <li>Número de subdivisiones para los tramos.</li> </ol>
Puls modificado	Hidrológico, semiempírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>Número de subdivisiones para cada tramo.</li> <li>Condición inicial de flujo (entradas=salidas o definición del caudal de salida).</li> <li>tabla de valores del almacenamiento (en miles de <math>m^3</math>) en función de la descarga (<math>m^3/s</math>).</li> </ol>
Muskingum-Cunge	Hidrológico, semiempírico	<ol style="list-style-type: none"> <li>Tipo de sección transversal (prismática o circular).</li> <li>Longitud del tramo del canal (m).</li> <li>Pendiente de la línea de energía en el tramo.</li> <li>Ancho del fondo (m).</li> <li>Coefficiente de rugosidad <math>n</math> de Manning (si se trabaja con el método M-C de 8 puntos, entonces se definen los valores de los coeficientes de rugosidad para las dos márgenes y el fondo en 8 puntos del tramo).</li> </ol>
Onda cinemática	Hidráulico, teórico	<ol style="list-style-type: none"> <li>Tipo de sección transversal (prismática, trapezoidal o circular).</li> <li>Longitud del tramo del canal (m).</li> <li>Pendiente de la línea de energía en el tramo.</li> <li>Ancho del fondo (m).</li> <li>Talud lateral de la sección transversal (<math>xH:1V</math>).</li> <li>Coefficiente de rugosidad de Manning.</li> <li>Número mínimo de tramos o subdivisiones para realizar los cálculos.</li> </ol>

### 3.1.9 SIMULACIÓN REALIZADA POR EL PAQUETE HEC-HMS

El HEC-HMS es un modelo tipo evento, lineal y semidistribuido. Por lo tanto, una corrida de simulación del programa consiste en calcular la componente de escorrentía directa como una función del tiempo, producto de un evento de lluvia de duración variable (entre algunos minutos y varios días) que se produce a la salida de las subcuencas. Los hidrogramas resultantes se combinan según la estructura de la cuenca, definida por el usuario en sentido estricto de aguas arriba hacia aguas abajo, hasta hallar el hidrograma resultante a la salida de toda la cuenca.

Las simulaciones en HEC-HMS son de dos tipos:

1. Convencionales: se obtienen los hidrogramas de salida y combinadas para un evento de tormenta supuesto.
2. De optimización: Los hidrogramas resultantes se comparan con un registro histórico en un cierto punto de la cuenca.

Tabla 3.6: Tipo de simulación realizada por el paquete HEC-HMS

SIMULACIÓN	RESULTADOS	TIPO DE PRESENTACIÓN
Convencional	Hidrogramas de salida en cada subcuenca	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Hidrogramas transitadas en los tramos de unión.	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Combinación de hidrogramas en los puntos de unión	Gráfica, tablas de series de tiempo.
	Caudal pico y tiempo al pico, volumen de escorrentía	Tabla resumen
Optimización	Ajuste del hidrograma observado	Gráficas de ajuste de datos (cuatro formatos), tabla principal
	Valores óptimos de los parámetros ajustados	Tabla principal

Como se acaba de observar, son varios los datos o parámetros que deben ser ingresados en el modelo HEC-HMS para poder obtener los resultados deseados, es por esto que a continuación se realiza una descripción de su aplicación que solamente se escogieron los métodos para el proyecto.

## **3.2 APLICACIÓN**

Para la aplicación del programa HEC-HMS, el modelo debe someterse a procesos de calibración, análisis de sensibilidad, validación y verificación de los resultados dentro de la cuenca del Paute.

### **3.2.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL PAUTE**

Como en todo modelo, para que los resultados de la simulación en HEC-HMS representen con algún grado de confiabilidad el comportamiento de la cuenca que se está analizando, es necesario someterlos a pruebas de calibración de los parámetros involucrados.

#### **3.2.1.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS**

La calibración o estimación de parámetros se basan en uno o más registros históricos de precipitación y caudales.

En HEC-HMS la estimación de los parámetros se hace automáticamente a partir de una selección inicial de todos los valores, hasta producir un ajuste óptimo de los valores calculados con los observados. El programa permite calibrar los parámetros asociados con:

- Las pérdidas por infiltración
- Los métodos de transformación de la lluvia en escorrentía
- El flujo base
- El tránsito de caudales desde las subcuencas localizadas aguas arriba del sitio de donde proviene el registro.

En este punto el paquete HEC-HMS compara el hidrograma calculado y el hidrograma observado. El objetivo de esta comparación es juzgar que tan bien el modelo simulado se ajusta al sistema hidrológico real. Si el ajuste no es satisfactorio, desde el punto de vista estadístico, HEC-HMS sistemáticamente ajusta los parámetros y realiza nuevamente los cálculos. Cuando el ajuste es satisfactorio, HEC-HMS conseguirá los valores óptimos del parámetro.

Las funciones objetivo que utiliza HMS para la calibración son las siguientes:

- Ajuste ponderado por mínimos cuadrados
- Sumatoria del cuadrado de los residuos (no ponderada)
- Suma de los valores absolutos de los residuos
- Porcentaje de error respecto al caudal pico

La calibración se evalúa por el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual puede ser interpretado como la proporción de la varianza representada por los valores de caudal calculados respecto a los valores de caudal observados. Este



coeficiente varía entre 0 y 1, correspondiéndole al valor de 1, como el mejor en representación de las observaciones.

#### **3.2.1.1.1 PRECIPITACIÓN**

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.

La información de precipitación fue proporcionada por el INAMHI en la Dirección de Gestiones Hidrológicas en el Sub Proceso Hidrológico para el proyecto de HIDROPAUTE, cada estación corresponde al periodo del 30 de diciembre de 1979 hasta el 31 de diciembre de 1980 y concierne a información diaria de precipitación en milímetros, De igual caso la información de las estaciones hidrológicas corresponde a periodos comunes e información de caudal diario en metros cúbicos por segundo.

### **PÉRDIDAS**

#### **MÉTODO PÉRDIDA INICIAL Y TASA CONSTANTE**

Este método se basa en el concepto de que la tasa potencial máxima de pérdida de precipitación,  $fc$  es constante a lo largo de un evento. Así, si  $p_t$  es la intensidad de lluvia durante un intervalo de tiempo  $t$  a  $t + \Delta t$ , exceso,  $pe_t$  durante el intervalo está dado por:

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

Una pérdida inicial,  $Ia$ , se agrega en el modelo para representar el almacenamiento por intercepción y depresión. El almacenamiento por intercepción es consecuencia de la absorción de precipitación por la cobertura del suelo, incluyendo plantas en la cuenca y de las depresiones en la topografía de la cuenca; el agua es almacenada en estas y eventualmente infiltradas o evaporadas. Estas pérdidas ocurren previas al inicio del escurrimiento.

Hasta que la precipitación acumulada en el área permeable excede el volumen de pérdida inicial, no ocurre escurrimiento. Así el exceso está dado por:

$$pe_t = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum p_i < Ia \\ p_t & \text{si } \sum p_i > Ia \quad p_t > fc \\ 0 & \text{si } \sum p_i > Ia \quad p_t < fc \end{cases}$$

En este método se incluye un parámetro (tasa constante) y una condición inicial (pérdida inicial). Respectivamente, estas representan las propiedades físicas del suelo de la cuenca y el uso de tierra y la condición antecedente.

Para hallar la pérdida inicial de este método, lo que primero se calcula es:

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

CN : Grupo hidrológico del suelo representativo en cada subcuenca

$$I_a = 0.2 * S$$

$I_a$  : pérdida inicial (mm)<sup>17</sup>

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

La constante de pérdida puede definirse como la capacidad de infiltración última del suelo. El SCS (1986) clasificó los suelos en las cuencas en base a la capacidad de infiltración, Skagga y Chalet (1982) han publicado estimaciones de tasa de infiltración para estos suelos, como se muestra en la tabla 3.7.

Estas pueden ser usadas en la ausencia de mejor información.

Tabla 3.7: Grupo de suelos y tasa de pérdidas de infiltración<sup>33</sup>

<b>GRUPO DEL SUELO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>RANGO DE TASA DE PÉRDIDAS (mm/h)</b>
A	Suelos con alta capacidad de infiltración. Arena profunda, Loess profundo, sedimentos agregados	7.62 – 11.43

<sup>17</sup> Manual HEC-HMS, 2001

<sup>33</sup> SCS, 1986; Skagga and Chalet, 1982

B	Suelos con tasas moderadas de infiltración cuando están completamente húmedos Loess superficiales, marga arenosa	3.81 – 7.62
C	Marga arcillosa, marga arenosa superficial, suelos bajos en contenido orgánico y suelos usualmente altos en arcilla	1.27 – 3.81
D	Suelos con muy bajas tasas de infiltración. Suelos que se hinchan significativamente cuando está húmedo, arcillas plásticas pesadas y ciertos suelos salinos	0.00 – 1.27

### 3.2.1.1.3 MODELACIÓN DE ESCURRIMIENTO DIRECTO

#### 3.2.1.1.3.1 MODELO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK

El modelo de Clark deriva un hidrograma unitario de una cuenca mediante la representación explícitamente de dos procesos críticos en la transformación de exceso de precipitación a escurrimiento:

- Traslación o movimiento de los excesos desde su origen a lo largo del drenaje en el desagüe de la cuenca
- Atenuación o reducción de la magnitud de la descarga como el exceso es almacenado a lo largo de la cuenca.

La aplicación del método de Clark requiere:

- Propiedades del histograma tiempo vs área

- El coeficiente de almacenamiento

Los estudios en HEC-HMS muestran que incluso se pueda desarrollar una relación de cuenca específica, una función uniforme formada en una relación típica de tiempo vs área representa la distribución temporal adecuadamente para la derivación del hidrograma unitario para la mayoría de cuencas. La relación de tiempo vs área, la cual está incluida en HEC-HMS es:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left( \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para...} t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left( \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para...} t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

$A_t$  : Área de cuenca acumulada que contribuye en el tiempo  $t$ , km

$A$  : Área total de la cuenca, km

$T_c$  : Tiempo de concentración, h

### 3.2.1.1.3.1.1 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Como se dijo en el capítulo anterior el tiempo de concentración, es el tiempo que transcurre desde que acaba la lluvia hasta que sale de la cuenca la última gota de escorrentía. Es decir, el tiempo necesario para que la precipitación caída en zonas alejadas pueda hacer su viaje hasta el punto de desagüe.<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup> Temez, 1978

Este parámetro puede ser usado vía calibración o puede ser estimado usando fórmulas propuestas por diferentes autores. En este caso se utilizó la fórmula Kirpich, como indica el anterior capítulo.

### 3.2.1.1.3.1.2 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

El coeficiente de almacenamiento de la cuenca R, es un índice del almacenamiento temporal del exceso de precipitación en la cuenca de cómo drena en el punto de desagüe. Este también, puede ser estimado vía calibración si están disponibles los datos del pluviómetro y de la estación de aforo. Aunque R tiene unidades de tiempo, hay solamente una manera cualitativa en el sentido físico. Clark (1945) indicó que R puede ser calculado como el flujo en el punto de inflexión en la pendiente de descenso del hidrograma debido por el tiempo derivado del flujo.

Para la calibración, estos parámetros están sujetos a limitaciones por lo que se establece un rango de valores, los cuales se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Restricciones para parámetros de calibración<sup>35</sup>

PARÁMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO
Tiempo de concentración (Tc)	0.1 hr	500 hr
Coficiente de almacenamiento (R)	0 hr	200 hr

### 3.2.1.1.4 MODELACIÓN DEL FLUJO BASE

---

<sup>35</sup> Manual HEC-HMS, 2001

Son dos los componentes que se distinguen en el hidrograma de escurrimiento y son: el escurrimiento directo de precipitación y el flujo base. El flujo base es el sustento o escurrimiento de la lluvia previa que fue almacenada temporalmente en la cuenca, más el escurrimiento retardado subsuperficial de la tormenta actual.

El flujo base también se refiere a la parte del caudal que se incorpora a una corriente de agua, procedente principalmente de aguas subterráneas, pero también de lagos y glaciares, durante periodos largos en los que no se producen precipitaciones o fusión de nieve.<sup>36</sup>

Para ingresar estos datos en el paquete HEC-HMS, se realizó para cada subcuenca con su respectivo hidrograma, tomado mediante el área de drenaje de cada una de ellas mensualmente dividido para el número de días que representa cada mes.

---

<sup>36</sup> AGUAMARKET, 2005

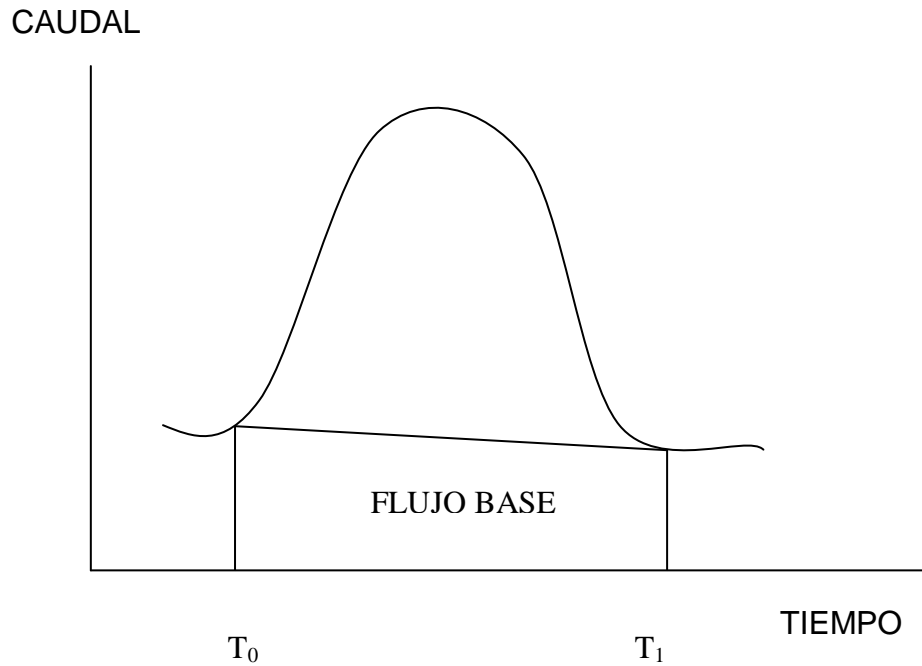


Figura 3.1: Esquema de flujo base

### 3.2.1.1.5 MODELACIÓN DEL TRÁNSITO DE CAUDALES EN CANALES

#### 3.2.1.5.1 MODELO DEL TIEMPO DE RETARDO

Este es el modelo de tránsito más simple del HEC-HMS. Con este, el hidrograma del flujo de salida es simplemente el hidrograma de entrada, pero con todas las ordenadas trasladadas por una duración especificada. Los flujos



no son atenuados, así la forma no cambia. Este modelo es ampliamente usado, especialmente en canales de drenaje urbano.<sup>37</sup>

Matemáticamente las ordenadas aguas abajo son calculadas por:

$$O_t = \begin{cases} I_t & t < lag \\ I_{t-lag} & t \geq lag \end{cases}$$

$O_t$  : Ordenada del hidrograma del flujo de salida en el tiempo t

$I_t$  : Ordenada del hidrograma del flujo de entrada en el tiempo t

Lag : Tiempo por el cual las ordenadas son retardadas

En la figura 3.2, se ilustra los resultados de la aplicación del modelo de retardo.

El hidrograma aguas abajo es el flujo de salida calculado, con cada ordenada igual a la ordenada anterior del flujo de entrada, pero retardada en el tiempo.

---

<sup>37</sup> Pilgrim y Cordery, 1993

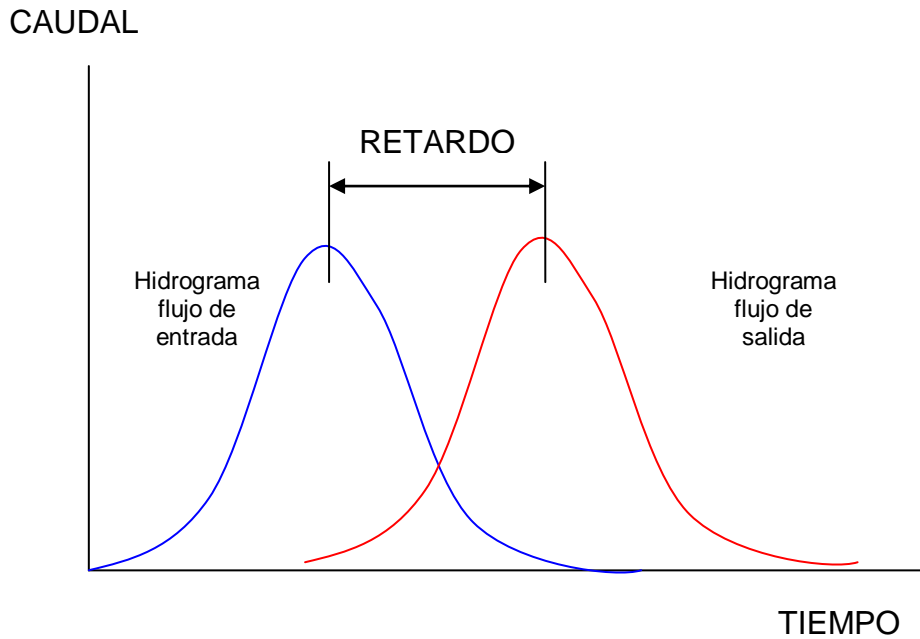


Figura 3.2: Esquema del tiempo de retardo

El modelo de retardo es un caso especial de otros modelos de tránsito. Como sus resultados pueden ser duplicados si los parámetros de estos otros modelos son cuidadosamente escogidos. Si los hidrogramas del flujo están disponibles, el retardo puede ser estimado desde estos como el tiempo transcurrido entre el tiempo del centroide de los picos del hidrograma, o entre el tiempo del punto medio de las pendientes ascendentes de los hidrogramas.

Para determinar el tiempo de retardo se la obtuvo mediante la fórmula que indica en el Manual del paquete HEC-HMS, como indica en el capítulo anterior.

### 3.2.1.2 PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

#### 3.2.1.2.1 PRIMERA PRUEBA

La primera prueba de calibración se ejecutó con la subcuenca Alta (Alta 1 y Alta 2), se utilizó información de período común de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980 a nivel diario con datos de la estación hidrológica Tomebamba en Monay (H895) y datos de las estaciones meteorológicas Soldados (MA45) y Cuenca Aeropuerto (M067). Para realizar la primera prueba de calibración del paquete HEC-HMS, se emplean los siguientes datos:

Tabla 3.9: Área de la subcuenca Alta.

SUBCUENCA	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	ÁREA TOTAL (Km <sup>2</sup> )
Alta 1	851.28	1280.56
Alta 2	428.78	

Tabla 3.10: Parámetros del modelo de pérdidas para la subcuenca Alta.

MODELO DE PÉRDIDA INICIAL Y TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA			
SUBCUENCA	PÉRDIDA INICIAL (mm)	TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA (mm/h)	IMPERMEABILIDAD (%)
ALTA	36.79	3.81	15

Estos parámetros del modelo de pérdidas se utilizaron de acuerdo a la información que presenta la subcuenca Alta, en este caso es un suelo tipo B y CN = 58, estos datos son los que predominan dentro de la subcuenca y también se los realizó mediante calibración.

Tabla 3.11: Parámetros del modelo de escurrimiento directo para la subcuenca Alta.

<b>MODELO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK</b>		
<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (h)</b>
Alta	90	20

Para los parámetros del modelo de escurrimiento directo, se utilizó mediante fórmulas empíricas y también por calibración.

Tabla 3.12: Flujo base mensual constante para la subcuenca Alta.

<b>MODELO DE FLUJO BASE MENSUAL CONSTANTE</b>	
<b>MESES</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>
Enero	1.62
Febrero	6.01
Marzo	5.83
Abril	14.82
Mayo	14.18
Junio	7.83
Julio	12.97
Agosto	7.12
Septiembre	6.20
Octubre	18.16
Noviembre	19.54
Diciembre	17.08

Para realizar el flujo base constante se realizó con la estación hidrológica Tomebamba en Monay (H895) para el período de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980.

Tabla 3.13: Parámetros del modelo de flujo de canales para la subcuenca Alta

MODELO DE TIEMPO DE RETARDO	
SUBCUENCA	TIEMPO DE RETARDO (h)
Alta	2.50

Tabla 3.14: Área de Influencia de las Estaciones Meteorológicas para la subcuenca Alta

ÁREA DE INFLUENCIA		
ESTACIÓN	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	THIESSEN (%)
Soldados (MA45)	800.39	63
Cuenca Aeropuerto (M067)	479.67	37

Para evaluar la calibración del modelo se compara mediante el factor de determinación entre los caudales observados con los caudales simulados, con la estación Tomebamba en Monay (H895), ambas series de caudales presenta un factor de determinación  $R^2 = 0.7125$  y un factor de correlación  $R = 0.8441$ , estos resultados muestran que la calibración de los caudales simulados permiten reproducir el 71 % del caudal observado.

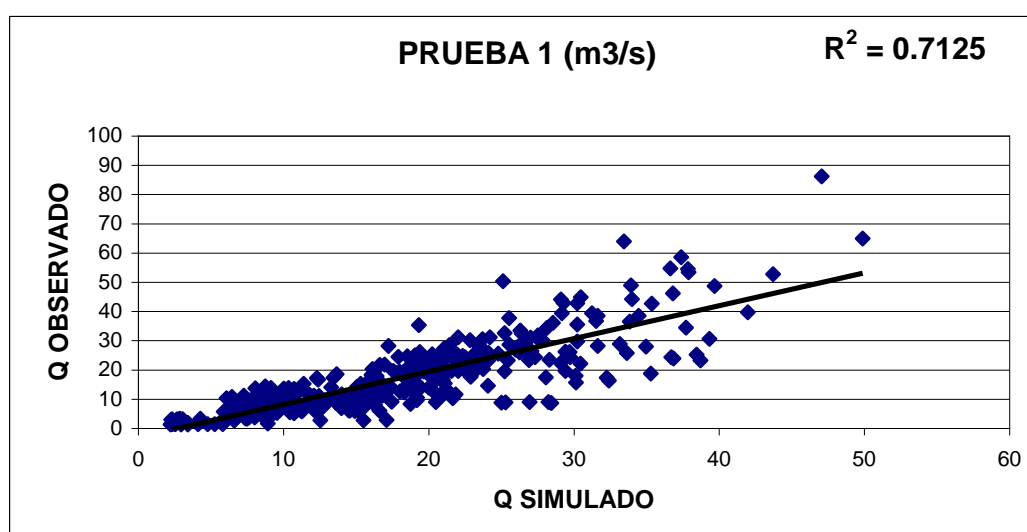


Figura 3.3: Factor de determinación PRUEBA 1

Cuadro 3.1: Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 1, HEC-HMS

#### **3.2.1.2.2 SEGUNDA PRUEBA**

La segunda prueba de calibración se ejecutó con las subcuencas Alta y Media (Alta 1, Alta 2, Media 1 y Media 2), se utilizó información de período común de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980 a nivel diario con datos de la estación hidrológica Paute en Paute (H894) y datos de las estaciones meteorológicas Soldados (MA45), Cuenca Aeropuerto (M067), Paute (M138), El Labrado (M141) y Sigsig (M664). Para realizar la segunda prueba de calibración del paquete HEC-HMS, se emplean los siguientes datos:

Tabla 3.15: Áreas de las subcuencas Alta y Media

<b>SUBCUENCA</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>ÁREA TOTAL (Km<sup>2</sup>)</b>
Alta 1	851.28	1280.56
Alta 2	428.78	
Media 1	1366.02	2312.64
Media 2	946.62	

Tabla 3.16: Parámetros del modelo de pérdidas para las subcuencas Alta y Media

<b>MODELO DE PÉRDIDA INICIAL Y TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA</b>			
<b>SUBCUENCA</b>	<b>PÉRDIDA INICIAL (mm)</b>	<b>TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA (mm/h)</b>	<b>IMPERMEABILIDAD (%)</b>
ALTA Y MEDIA	36.79	3.81	11

Estos parámetros del modelo de pérdidas se utilizaron de acuerdo a la información que presenta las subcuencas Alta y Media, en este caso es un suelo tipo B y CN = 58, estos datos son los que predominan dentro de las subcuencas y también se los realizó mediante calibración.

Tabla 3.17: Parámetros del modelo de escurrimiento directo para las subcuencas Alta y Media.

<b>MODELO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK</b>		
<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (h)</b>
ALTA Y MEDIA	50	35

Para los parámetros del modelo de escurrimiento directo, se utilizó mediante fórmulas empíricas y también por calibración.

Tabla 3.18: Flujo base mensual constante para las subcuencas Alta y Media.

<b>MODELO DE FLUJO BASE MENSUAL CONSTANTE</b>	
<b>MESES</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>
Enero	11.89
Febrero	16.72
Marzo	24.76
Abril	44.07
Mayo	41.63
Junio	51.01
Julio	44.56
Agosto	17.47
Septiembre	26.48
Octubre	44.45
Noviembre	48.01
Diciembre	27.76

Para realizar el flujo base constante se realizó con la estación hidrológica Paute en Paute (H894) para el período de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980.



Tabla 3.19: Parámetros del modelo de flujo de canales para las subcuencas Alta y Media

<b>MODELO DE TIEMPO DE RETARDO</b>	
<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIEMPO DE RETARDO (h)</b>
ALTA Y MEDIA	2.83

Tabla 3.20: Área de Influencia de las Estaciones Meteorológicas para las subcuencas Alta y Media.

<b>AREA DE INFLUENCIA</b>		
<b>ESTACIÓN</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>THIESSEN (%)</b>
Soldados (MA45)	766.90	21.35
Cuenca Aeropuerto (M067)	760.21	21.15
Paute (M138)	473.58	13.18
El Labrado (M141)	622.34	17.34
Sigsig (M664)	969.66	26.98

Para evaluar la calibración del modelo se compara mediante el factor de determinación entre los caudales observados con los caudales simulados, con la estación Paute en Paute (H894), ambas series de caudales presenta un factor de determinación  $R^2 = 0.6111$  y un factor de correlación  $R = 0.7817$ , estos resultados muestran que la calibración de los caudales simulados permiten reproducir el 61 % del caudal observado.

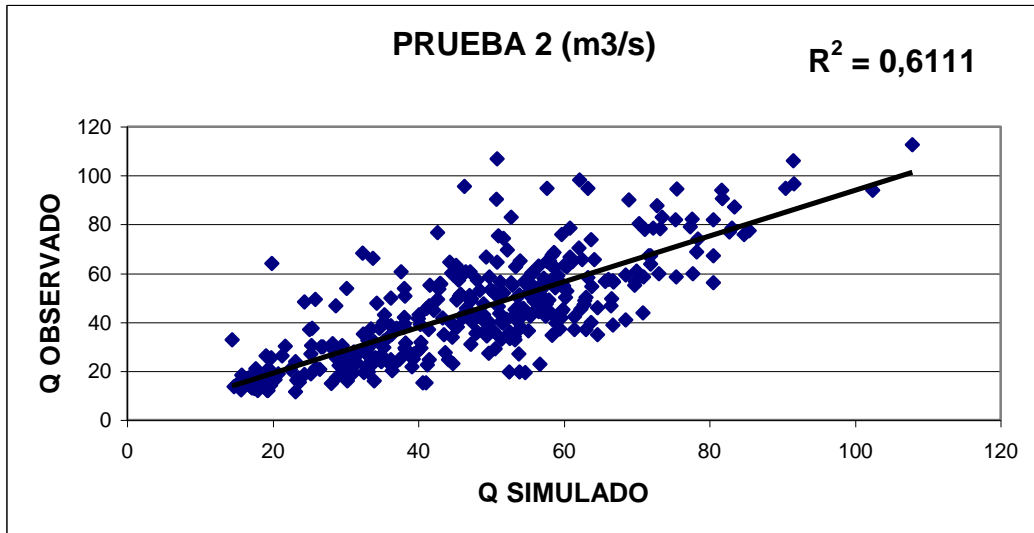


Figura 3.4: Factor de determinación PRUEBA 2

Cuadro 3.2: Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 2, HEC-HMS

### 3.2.1.2.3 TERCERA PRUEBA

La tercera prueba de calibración se ejecutó con las subcuencas Alta, Media y Baja (Alta 1, Alta 2, Media 1, Media 2 y Baja), se utilizó información de período común de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980 a nivel diario con datos de la estación hidrológica Paute en Paute (H894) y Paute D.J. Palmira (H898); y datos de las estaciones meteorológicas Soldados (MA45), Cuenca Aeropuerto (M067), Paute (M138), El Labrado (M141), Sigsig (M664), Palmas Azuay (M045), Peñas Coloradas (M217) y Pan Grande (M538). Para realizar la tercera prueba de calibración del paquete HEC-HMS, se emplean los siguientes datos:

Tabla 3.21: Áreas de las subcuencas Alta, Media y Baja

SUBCUENCA	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	ÁREA TOTAL (Km <sup>2</sup> )
Alta 1	851.28	1280.56
Alta 2	428.78	
Media 1	1366.02	2312.64
Media 2	946.62	
Baja	1462.71	1462.71

Tabla 3.22: Parámetros del modelo de pérdidas para las subcuencas Alta, Media y Baja

MODELO DE PÉRDIDA INICIAL Y TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA			
SUBCUENCA	PÉRDIDA INICIAL (mm)	TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA (mm/h)	IMPERMEABILIDAD (%)
ALTA Y MEDIA	36.79	3.81	11
BAJA	118.53	7.62	35

Estos parámetros del modelo de pérdidas se utilizaron de acuerdo a la información que presenta las subcuencas Alta y Media, en este caso es un suelo tipo B y CN = 58; y en la subcuenca Baja es un suelo tipo A y CN = 30, estos datos son los que predominan dentro de las subcuencas y también se los realizó mediante calibración.

Tabla 3.23: Parámetros del modelo de escurrimiento directo para las subcuencas Alta, Media y Baja.

<b>MODELO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK</b>		
<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (h)</b>
ALTA Y MEDIA	50	35
BAJA	30	20

Para los parámetros del modelo de escurrimiento directo, se utilizó mediante fórmulas empíricas y también por calibración.

Tabla 3.24: Flujo base mensual constante para las subcuencas Alta, Media y Baja.

<b>MODELO DE FLUJO BASE MENSUAL CONSTANTE</b>		
<b>MESES</b>	<b>Paute en Paute (H894) (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Paute D.J. Palmira (H898) (m<sup>3</sup>/s)</b>
Enero	11.89	26.29
Febrero	16.72	37.52
Marzo	24.76	54.66
Abril	44.07	86.32
Mayo	41.63	78.23
Junio	51.01	94.75
Julio	44.56	103.32
Agosto	17.47	69.88

Septiembre	26.48	64.49
Octubre	44.45	93.87
Noviembre	48.01	73.01
Diciembre	27.76	50.87

Para realizar el flujo base constante se realizó con las estaciones hidrológicas Paute en Paute (H894) y Paute D.J. Palmira (H898) para el período de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980.

Tabla 3.25: Parámetros del modelo de flujo de canales para las subcuencas Alta, Media y Baja

<b>MODELO DE TIEMPO DE RETARDO</b>	
<b>SUBCUENCA</b>	<b>TIEMPO DE RETARDO (h)</b>
ALTA Y MEDIA	2.83
BAJA	4.56

Tabla 3.26: Área de Influencia de las Estaciones Meteorológicas para las subcuencas Alta, Media y Baja.

<b>AREA DE INFLUENCIA</b>		
<b>ESTACIÓN</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>THIESSEN (%)</b>
Soldados (MA45)	766.90	21.35
Aeropuerto (M067)	760.21	21.15
Paute (M138)	473.58	13.18
El Labrado (M141)	622.34	17.34
Sigsig (M664)	969.66	26.98
<b>ALTA Y MEDIA</b>		<b>100.00</b>
Palmas Azuay (M045)	658.22	45.00
Peñas Coloradas (M217)	511.95	35.00
Pan Grande (M538)	292.54	20.00
<b>BAJA</b>		<b>100.00</b>

Para evaluar la calibración del modelo se compara mediante el factor de determinación entre los caudales observados con los caudales simulados, con las estaciones Paute en Paute (H894) y Paute D.J. Palmira (H898), ambas series de caudales presenta un factor de determinación  $R^2 = 0.6789$  y un factor de correlación  $R = 0.8239$ , estos resultados muestran que la calibración de los caudales simulados permiten reproducir el 68 % del caudal observado.

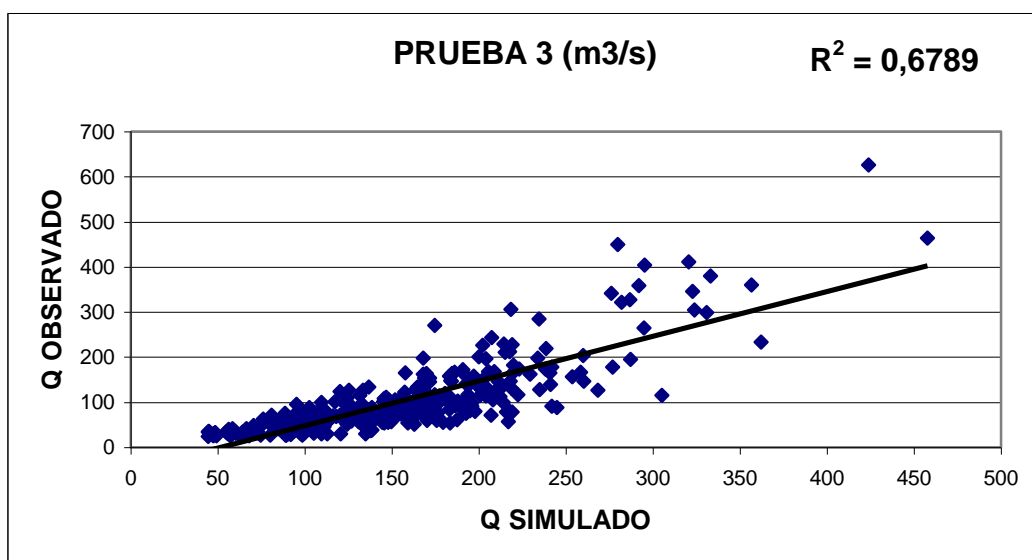


Figura 3.5: Factor de determinación PRUEBA 3

Cuadro 3.3: Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 3, HEC-HMS



### 3.2.1.2.4 CUARTA PRUEBA

La cuarta prueba de calibración se ejecutó en toda la cuenca del Paute, se utilizó información de período común de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980 a nivel diario con datos de la estación hidrológica Paute D.J. Palmira (H898) y datos de las estaciones meteorológicas Soldados (MA45), Aeropuerto (M067), Paute (M138), El Labrado (M141), Sigsig (M664), Palmas Azuay (M045), Peñas Coloradas (M217) y Pan Grande (M538). Para realizar la cuarta prueba de calibración del paquete HEC-HMS, se emplean los siguientes datos:

Tabla 3.27: Área de la cuenca del Paute

<b>CUENCA</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>ÁREA TOTAL (Km<sup>2</sup>)</b>
PAUTE	5055.40	5055.40

Tabla 3.28: Parámetros del modelo de pérdidas para la cuenca del Paute.

<b>MODELO DE PÉRDIDA INICIAL Y TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA</b>			
<b>CUENCA</b>	<b>PÉRDIDA INICIAL (mm)</b>	<b>TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA (mm/h)</b>	<b>IMPERMEABILIDAD (%)</b>
PAUTE	36.79	3.81	20

Estos parámetros del modelo de pérdidas se utilizaron de acuerdo a la información que presenta la cuenca del Paute, en este caso es un suelo tipo B y CN = 58, estos datos son los que predominan dentro de la cuenca y también se realizó mediante calibración.

Tabla 3.29: Parámetros del modelo de escurrimiento directo para la cuenca del Paute

<b>MODELO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK</b>		
<b>CUENCA</b>	<b>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)</b>	<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (h)</b>
PAUTE	50	20

Para los parámetros del modelo de escurrimiento directo, se utilizó mediante fórmulas empíricas y también por calibración.

Tabla 3.30: Flujo base mensual constante para la cuenca del Paute.

<b>MODELO DE FLUJO BASE MENSUAL CONSTANTE</b>	
<b>MESES</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>
Enero	26.29
Febrero	37.52
Marzo	54.66
Abril	86.32
Mayo	78.23
Junio	94.75
Julio	103.32
Agosto	69.88
Septiembre	64.49
Octubre	93.87
Noviembre	73.01
Diciembre	50.87

Para realizar el flujo base constante se realizó con la estación hidrológica Paute D.J. Palmira (H898) para el período de 01 de Enero de 1980 hasta el 31 de Diciembre de 1980.

Tabla 3.31: Parámetros del modelo de flujo de canales para la cuenca del Paute

<b>MODELO DE TIEMPO DE RETARDO</b>	
<b>CUENCA</b>	<b>TIEMPO DE RETARDO (h)</b>
PAUTE	4.56

Tabla 3.32: Área de Influencia de las Estaciones Meteorológicas para la cuenca del Paute.

<b>AREA DE INFLUENCIA</b>		
<b>ESTACIÓN</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>THIESSEN (%)</b>
Soldados (MA45)	766.90	15.17
Aeropuerto (M067)	760.22	15.03
Paute (M138)	643.98	12.74
El Labrado (M141)	622.35	12.31
Sigsig (M664)	1002.61	19.83
Palmas Azuay (M045)	384.21	7.60
Peñas Coloradas (M217)	682.63	13.50
Pan Grande (M538)	192.54	3.82

Para evaluar la calibración del modelo se compara mediante el factor de determinación entre los caudales observados con los caudales simulados, con la estación Paute D.J. Palmira (H898), ambas series de caudales presenta un factor de determinación  $R^2 = 0.7008$  y un factor de correlación  $R = 0.8371$ , estos resultados muestran que la calibración de los caudales simulados permiten reproducir el 70 % del caudal observado. *Lo cual lleva establecer que la precipitación media ponderada de las ocho estaciones que se encuentran dentro de la cuenca del Paute, nos permite simular de manera aceptable la tendencia estacional de los caudales de la cuenca.*

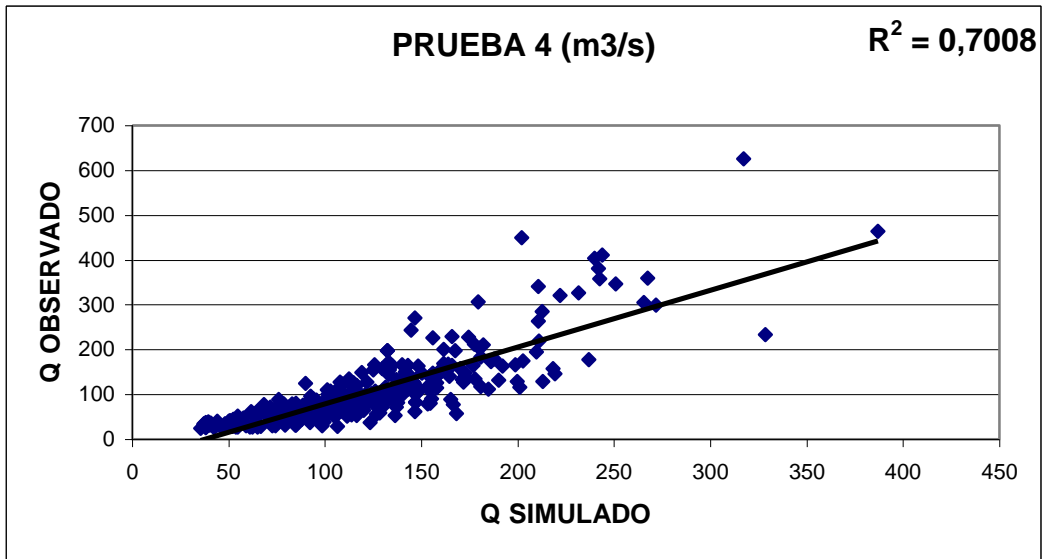


Figura 3.6: Factor de determinación PRUEBA 4

Cuadro 3.4: Hietograma e Hidrograma obtenido en la PRUEBA 4, HEC-HMS

### **3.2.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DEL MODELO HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL PAUTE**

Para el análisis de sensibilidad de parámetros, se empleará el modelo calibrado en la PRUEBA 4 de la cuenca del Paute para el período enero a diciembre del año 1980.

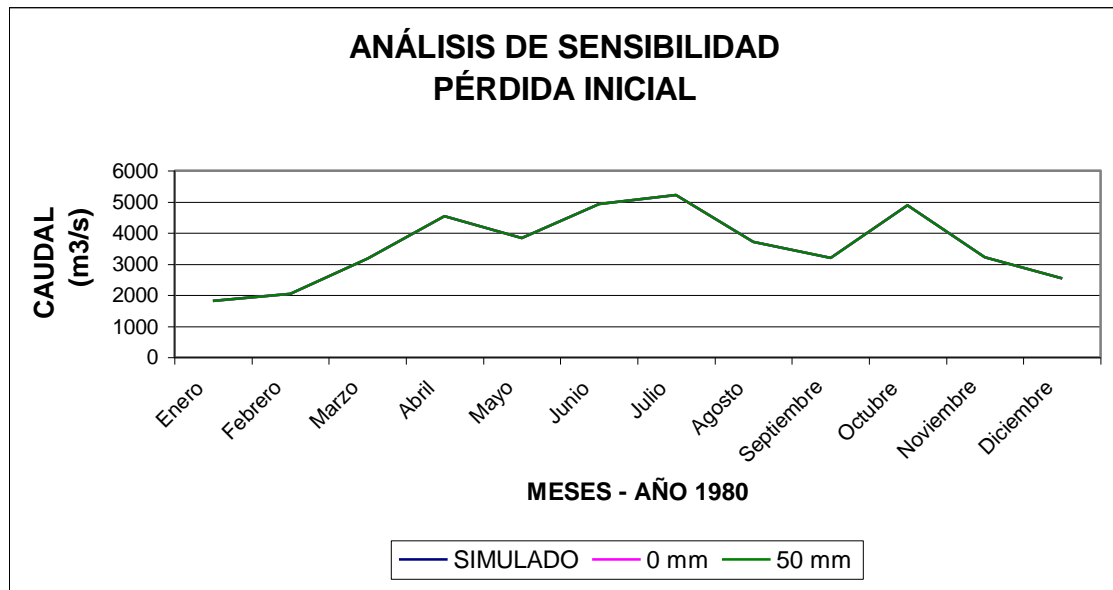
#### **PÉRDIDA INICIAL**

Este parámetro tiene relación directa con el tipo de suelo y las condiciones de la cuenca; es decir, si el suelo de la cuenca está saturado, la pérdida inicial será aproximadamente cero, pero si el suelo de la cuenca es seco, entonces la pérdida se incrementará y será igual a la precipitación máxima que puede caer dentro de la cuenca sin generar escurrimiento.

En la mayor parte de la cuenca del Paute es una zona húmeda; es decir es un suelo de moderada humedad, por lo que las condiciones del suelo son generalmente saturadas. Es por eso que para este análisis la pérdida inicial se toma valores dentro de un rango de 0 mm a 50 mm.

En el cuadro 3.5 se observa que al variar este parámetro no presenta cambio en los caudales, las tres series de caudales son iguales.

Cuadro 3.5: Análisis de sensibilidad variando la pérdida inicial.



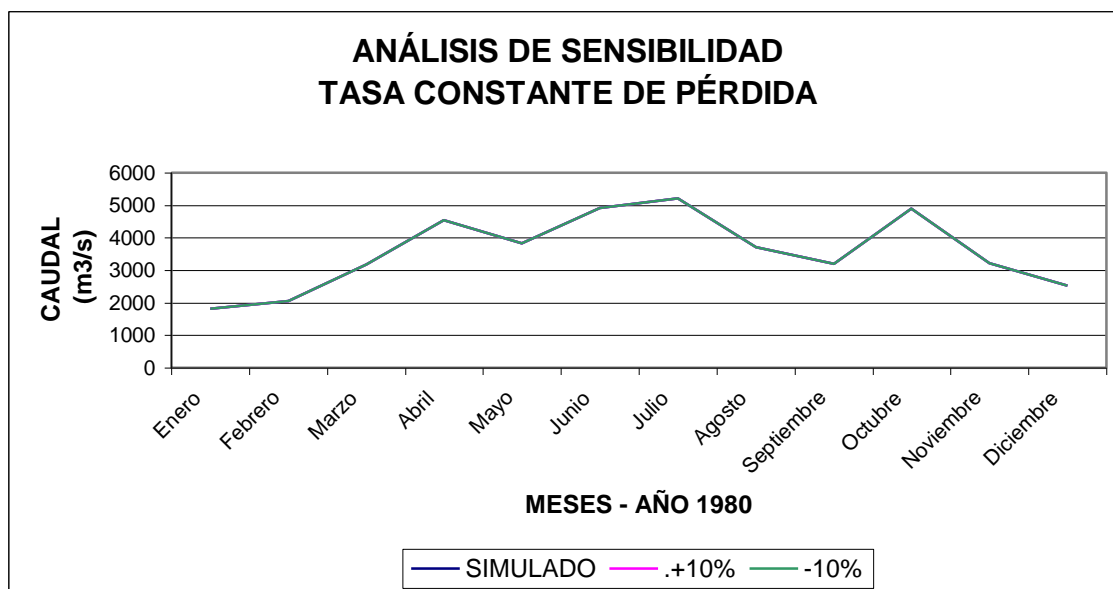
### TASA CONSTANTE DE PÉRDIDA

Este parámetro puede definirse como la capacidad última de infiltración del suelo y está ligado directamente al tipo de suelo de la cuenca. Para el análisis no se cuenta con suficiente información para definirlo, es por eso que se lo representa mediante calibración o mediante las tablas del SCS.

La mayoría de las subcuencas presenta un tipo de suelo B, se opta por variarlos dentro de un rango de  $\pm 10\%$ , para así poder observar la influencia de este parámetro sobre toda la cuenca del Paute.

En la cuadro 3.6 se observa que al variar este parámetro simultáneamente en todas las subcuencas, no presenta mayor diferencia en los caudales.

Cuadro 3.6: Análisis de sensibilidad variando la tasa constante de pérdida.



### PORCENTAJE DE IMPERMEABILIDAD

El porcentaje de impermeabilidad de la cuenca es un parámetro que está relacionado con el tipo de suelo, uso de suelo y tipo de cobertura vegetal. La mayoría de la cuenca está cubierta de pradera, la población no es tan escasa en esta zona, a pesar de que la ciudad de Cuenca y sus alrededores se encuentra habitada y sus cultivos tienen un porcentaje moderado.

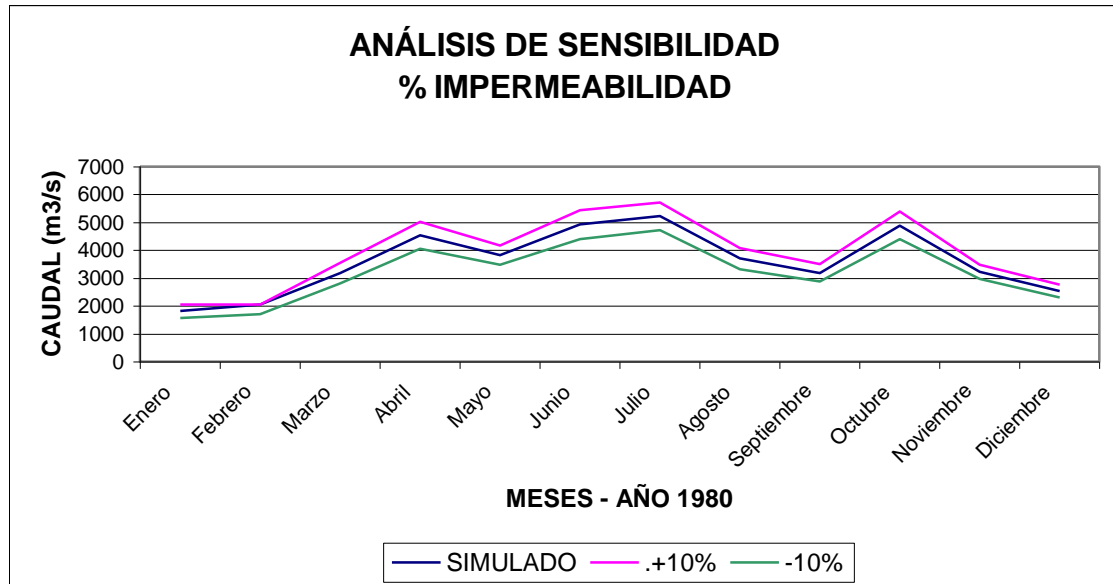
Este parámetro se varía en un rango de  $\pm 10\%$ , según fuente obtenida en el SIGAGRO.

Luego del análisis se establece que al variar el parámetro en el rango establecido es el más sensible ya que este permite elevar el caudal simulado a los picos más altos y presenta un cambio de caudales en un 13.77%.



En la cuadro 3.7 se observa que la impermeabilidad es un parámetro con gran influencia para la tendencia hacia los picos altos.

Cuadro 3.7: Análisis de sensibilidad variando el porcentaje de impermeabilidad.



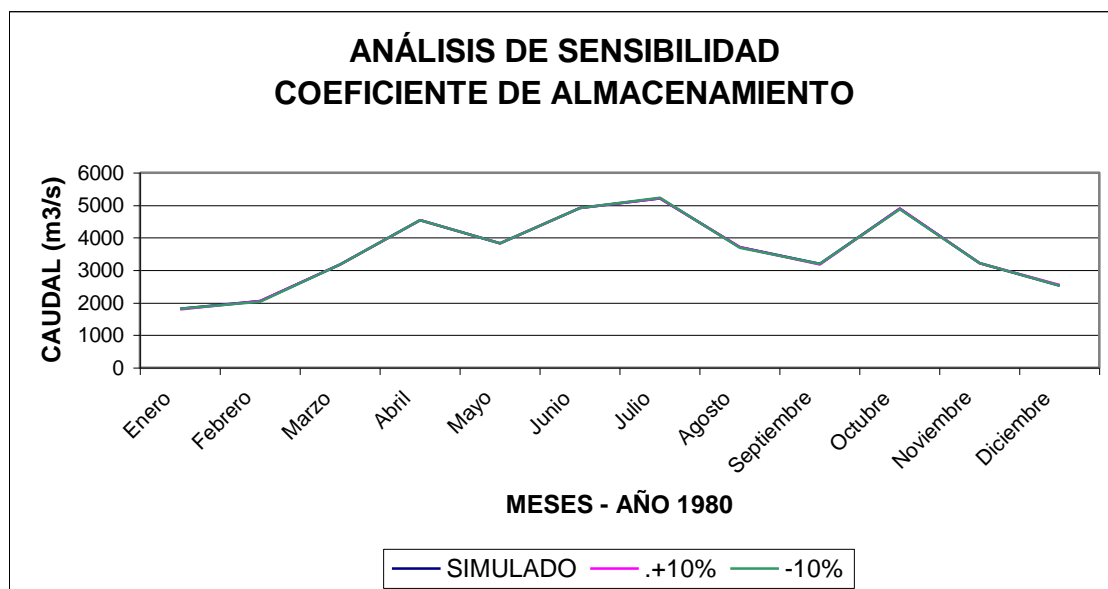
### COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Este parámetro se relaciona con la capacidad de almacenamiento de la cuenca; para este caso la cuenca cuenta con la presencia de cuerpos de agua como lagunas, en las cuales el agua se almacena temporalmente, es por esto que tiene influencia sobre la respuesta hidrológica de la cuenca.

Al variar este parámetro dentro de un rango de  $\pm 10\%$ , los caudales varían aproximadamente en un 4%.

En la cuadro 3.8 se observa el coeficiente de almacenamiento tiene influencia en la generación de caudales.

Cuadro 3.8: Análisis de sensibilidad variando el coeficiente de almacenamiento.



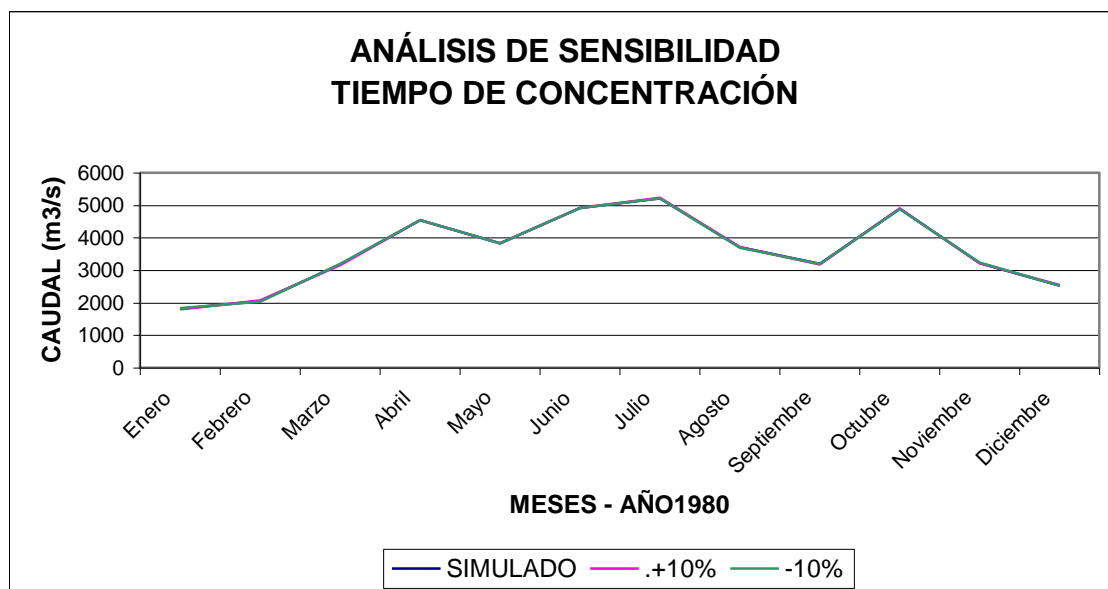
### TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Este parámetro relacionado con las características del hidrograma, se lo estima mediante la longitud del cauce y las curvas de nivel.

Debido a que la velocidad del río puede variar dependiendo del caudal que circule, este parámetro se va variando dentro del rango  $\pm 10\%$ , obteniendo así un cambio del 5 % de los caudales simulados.

En la cuadro 3.9 muestra la variación de este parámetro.

Cuadro 3.9: Análisis de sensibilidad variando el tiempo de retardo.



### 3.2.3 VALIDACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL PAUTE

Para la validación de resultados del modelo después de calibrados los parámetros se hace directamente con la simulación del programa al cual se le ingresa un registro de precipitación de otro año para comparar con el hidrograma de salida registrado para ese mismo evento.

Para la etapa de validación del modelo HEC-HMS se eligió la PRUEBA 4 ya que presenta mejor coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.7001$ ), se emplea la precipitación media ponderada de las estaciones meteorológicas: Soldados (MA45), Aeropuerto (M067), Paute (M138), El Labrado (M141), Sigsig (M664), Palmas Azuay (M045), Peñas Coloradas (M217) y Pan Grande (M538), cuyo registro corresponde al año 1978, se escogió este periodo ya que presenta

mejor información para el requerimiento de la validación del paquete HEC-HMS.

En esta etapa se obtuvo como resultado un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.7682$ , en el cuadro 3.10 se observa que a tendencia estacional del hidrograma simulado es similar a la del hidrograma observado y que entre los picos altos no existe mucha diferencia; lo que quiere decir, que en la etapa de calibración cumple los parámetros definidos para la cuenca del Paute.

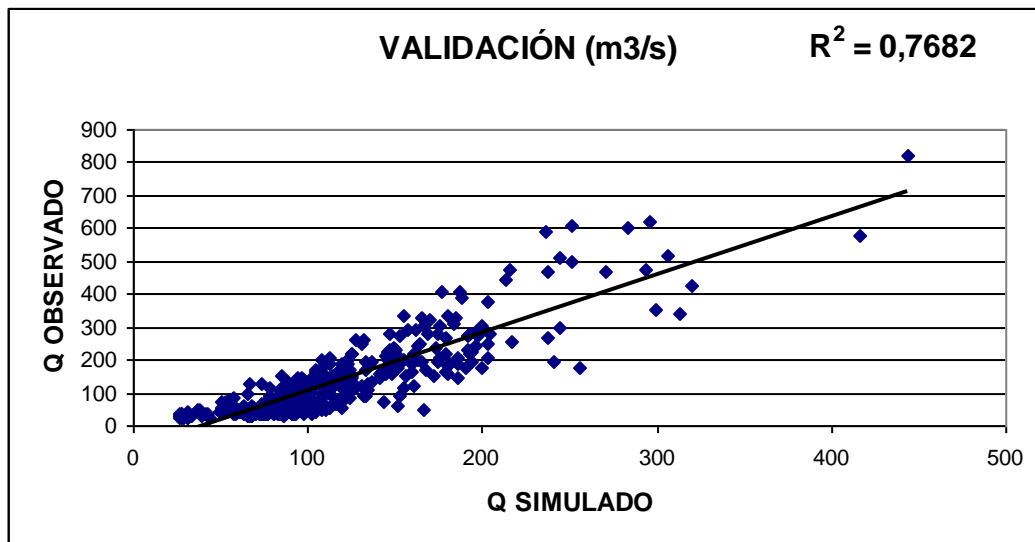


Figura 3.7: Factor de determinación para la validación del paquete HEC-HMS, en la cuenca del Paute

Cuadro 3.10: Hietograma e Hidrograma obtenido en la Validación del paquete HEC-HMS

## VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO HEC-HMS PARA LA CUENCA DEL PAUTE

Para la etapa de calibración del modelo fue necesario realizar varias pruebas para obtener resultados satisfactorios.

Durante el período de calibración (año 1980) se realizó cuatro pruebas, de las cuales la PRUEBA 3 y la PRUEBA 4 se ejecutó en toda la cuenca del Paute.

En la PRUEBA 3 de calibración, se emplea la precipitación ponderada en la cuenca Alta y Media (MA45, M067, M138, M141 y M538) con una estación hidrológica H894 y en la cuenca Baja (M045, M538 y M217) con una estación hidrológica H898, obteniendo como resultado un factor de determinación de  $R^2 = 0.6789$ , dicho resultado es bueno para la calibración; el volumen generado de la simulación (4864776.37 m<sup>3</sup>) excede aproximadamente en un 13.57% al volumen observado (3215699.57 m<sup>3</sup>), y la tendencia estacional tanto como en los caudales picos (cuadro 3.3) presenta similitud con el hidrograma observado.

En la PRUEBA 4 de calibración, se emplea la precipitación media ponderada en toda la cuenca del Paute (MA45, M067, M138, M141, M538, M045, M538 y M217) con una estación Hidrológica H898, obteniendo mejor resultado que en la PRUEBA 3, con un factor de determinación  $R^2 = 0.7008$ , dicho resultado es bueno para la calibración; el volumen generado de la simulación (3720596.97 m<sup>3</sup>) excede aproximadamente en un 33.90% al volumen observado

(3215699.57 m<sup>3</sup>) sin embargo presenta una mejor tendencia que la PRUEBA 3 y los caudales picos (cuadro 3.4) se asemejan al hidrograma observado.

Tabla 3.33: Resumen de la verificación de resultados obtenidos del modelo HEC-HMS en la cuenca del Paute

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS						
PRUEBAS	ELEMENTO	DRENAJE (Km <sup>2</sup> )	CAUDAL PICO (m <sup>3</sup> /s)	FECHA PICO	PREC (mm)	VOLUMEN TOTAL (m <sup>3</sup> )
PRUEBA 3	Alta y Media	3592.70	107.90	20/04/1980	1509.75	1480611.17
	Baja	1462.71	349.75	20/04/1980		3384165.20
	Total	5055.40	457.65	20/04/1980		4864776.37
PRUEBA 4	Paute	5055.40	386.81	20/04/1980	1509.75	<b>3720596.97</b>
OBSERVADO			625.60	19/04/1980	1509.75	3215699.57

Una vez calibrado el modelo se procedió a la etapa de validación de la cual se obtuvo un factor de determinación  $R^2 = 0.7677$ . En el cuadro 3.10 se observa que la tendencia estacional y los caudales picos simulados tienen buena similitud con los observados.

Tabla 3.34: Resumen de la verificación de resultados obtenidos mediante la validación del modelo HEC-HMS en la cuenca del Paute

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS						
PRUEBAS	ELEMENTO	DRENAJE (Km <sup>2</sup> )	CAUDAL PICO (m <sup>3</sup> /s)	FECHA PICO	PREC (mm)	VOLUMEN TOTAL (m <sup>3</sup> )
VALIDACIÓN	Paute	5055.40	438.02	08/06/1978	1486.37	<b>3699846.20</b>
OBSERVADO			823.00	08/06/1978	1486.37	4292851.39

## CAPÍTULO 4

### COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON EL MODELO OPERATIVO EMILE

#### 4.1 MODELO HIDROLÓGICO EMILE

El modelo EMILE, fue desarrollado en el año de 1992, por el equipo de ORSTOM en Abidjan, Costa de Marfil por Servat y Dezatter (1992). El paquete permite la utilización de tres modelos diferentes: CREC, GR3 del Cemagref (Edijatno, Michel, 1989) y MODGLO del ORSTOM. Se basa en un contexto de datos y resultados idénticos para los tres modelos relativamente cercanos, de donde el EMILE proviene de “Esemble Moélisateur Inteégre pour le calcul des Lames d’Eau”.

Estos tres modelos son *modelos globales deterministas*, es decir que éstos consideran la cuenca como una sola entidad, siendo su función de transferencia y reaccionando globalmente a una lluvia y a una ETP media consideradas como constantes en toda la cuenca (modelo global). Por otro lado, ninguna de las diferentes variables utilizadas para la representación matemática del modelo es una variable aleatoria (modelo determinista).

Estos modelos funcionan en un intervalo de tiempo diario y están constituidos por uno o varios reservorios teniendo cada uno sus leyes de llenado o sus leyes de vaciado.



El modelo utilizado para este estudio es el modelo GR3, renombrado por su simplicidad y su robustez debido a un número de parámetros poco elevado (tres parámetros principales) en comparación con los modelos CREC (versión con once parámetros) y MODGLO (versión catorce parámetros).

#### **4.1.1 PARÁMETROS DEL MODELO GR3**

El modelo GR3 tiene en total siete parámetros necesarios para permitir la realización de una simulación de caudal:

**A:** Capacidad del reservorio suelo, en mm.

**B:** Capacidad del reservorio agua-gravitaria, en mm.

**C:** Coeficiente que controla en función de un valor comprendido entre cero y uno la repartición de la lluvia neta en el hidrograma unitario.

**CET:** Coeficiente de corrección sin unidad aplicada para datos de ETP cuando los datos provienen de una estación alejada de la cuenca.

**K0:** Nivel inicial del reservorio suelo, comprendido entre cero y uno.

**Q0:** Caudal de la víspera del primer día del período de ajuste, en  $m^3/s$ .

**DESFASE:** Valor máximo de días en el cual se suman los coeficientes de repartición para llegar al valor uno (en días, limite superior = 7, limite inferior = 1).

El modelo GR3 tiene en realidad siete parámetros. Sin embargo, los parámetros K0 y Q0 no son verdaderos parámetros su rol esta dedicado ante

todo a la inicialización de los procedimientos de ajuste. Si se considera un largo período de ajuste, el rol de estos parámetros se torna muy despreciable.

El parámetro de DESFASE no es un verdadero parámetro, sino un medio enfocado a limitar el desfase del parámetro C. Por el contrario el parámetro CET, aparece como un verdadero cuarto parámetro del modelo si se le permite tomar otro valor que 1. Este proporciona efectivamente la posibilidad de modificar el escurrimiento calculado por el modelo, cambiando el balance hidrológico.

En la realidad cuatro de estos siete parámetros deben ser finalmente ajustados: A, B, C y CET.

El modelo permite entonces, una vez definidos sus siete parámetros, generar con la ayuda de los datos de lluvia y de evaporación un caudal a la salida de la cuenca considerada.

#### **4.1.2 AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

La fase de ajuste propone determinar el juego de parámetros que permitirá reproducir lo más fiable posible el hidrograma observado.

Dos tipos de ajuste están disponibles en el programa EMILE:

- *El ajuste manual*, que consiste simplemente en fijar un juego de siete parámetros lo que permite al modelo generar caudales para el período de tiempo considerado.
- *El ajuste automático*, que gracias a la utilización de un método de optimización, permite encontrar el juego óptimo de parámetros para las series de lluvia, de caudal y de ETP datos. Este ajuste automático es posible gracias a la utilización del método de optimización de Rosenbrock. Este es un método de optimización numérico directo, lo que significa que no utiliza el cálculo de derivadas. El método es iterativo con la búsqueda de un mínimo de una función criterio previamente definida.

Es suficiente por tanto, definir para cada parámetro a optimizar un intervalo de valor en el cual, el procedimiento automático buscara el óptimo así como, un número de iteraciones que fijara el tiempo de búsqueda (se considera que solamente 50 iteraciones son necesarias para cada parámetro a optimizar).

La etapa de validación consiste en utilizar los parámetros resultantes de un ajuste y empleados para generar los caudales en otro período. Si el modelo es capaz de restituir los hidrogramas, se admitirá, entonces, que el modelo es validado con éxito. Las fases de validación permiten así, verificar la eficacia y calidad del ajuste.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> INAMHI, Modelación Hidropluviométrica - EMILE

Para la simulación del EMILE se obtuvo información en el INAMHI, esta información se encuentra operativa, fue trabajada como un modelo semidistribuido con las siguientes estaciones hidrológicas: Tomebamba en Monay (H895), Paute D.J. Jadán (H914), Paute en Paute (H894), Paute A.J. Dudas (H900), Paute D.J. Llavircay (H917) y Paute D.J. Palmira (H898). Obteniendo como factor de determinación  $R^2 = 0.7147$  y factor de correlación  $R = 0.8454$ , estos resultados muestra que la calibración por EMILE reproduce el 71% del caudal observado (Figura 4.1).

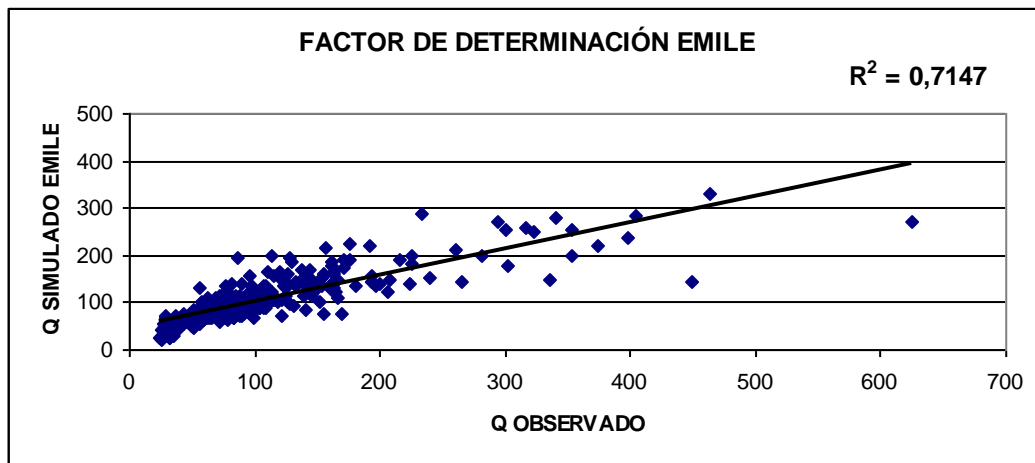


Figura 4.1: Factor de determinación EMILE

Mientras que para el proyecto trabajado con HEC-HMS, se realizó la calibración con la PRUEBA 4, de la cual se obtuvo mejor coeficiente de determinación  $R^2 = 0.7008$  reproduciendo el 70% del caudal observado.

Analizado el factor de determinación entre EMILE y HEC-HMS se observa que tiene un buen factor entre los dos caudales simulados, siendo  $R^2 = 0.8445$ . (Figura 4.2).

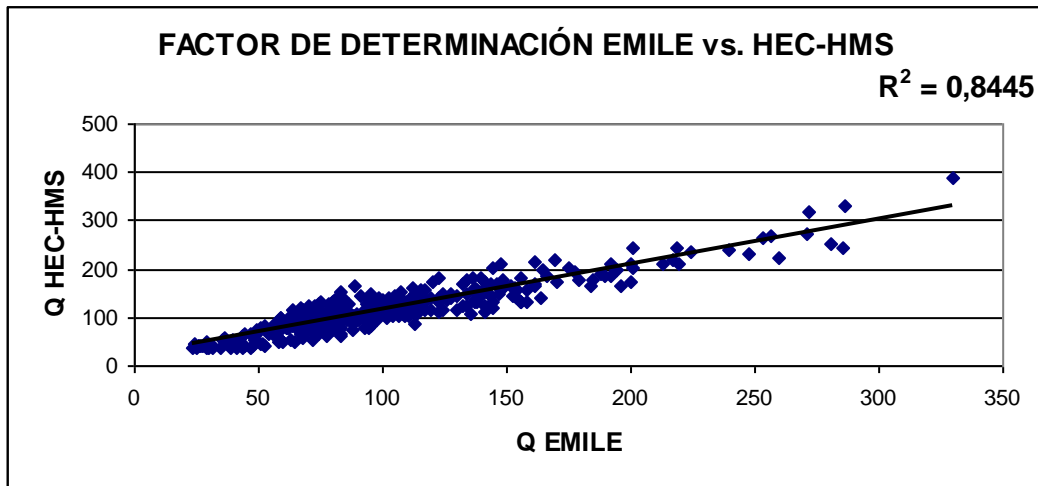


Figura 4.2: Factor de determinación EMILE vs HEC-HMS

Al analizar los hidrogramas por los modelos calibrados, se observa que existe entre las dos gráficas una similitud en la tendencia estacional y los caudales picos generados tienen una mayor semejanza a los caudales picos observados. (Cuadro 4.1)

Al comparar los dos modelos hidrológicos, quiere decir que el HEC-HMS cumple con los parámetros establecidos dentro del estudio en este proyecto para la cuenca del Paute.

Los resultados obtenidos tanto caudal observado como simulado de los dos modelos hidrológicos se visualiza en el ANEXO H.

## CAPÍTULO 5

### MANUAL INTRODUCTORIO PARA EL USO DEL PAQUETE

#### HEC-HMS 3.0

##### 5.1 BREVE INTRODUCCIÓN

El paquete HEC-HMS, es un software que permite simular transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sean concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales.

##### 5.2 CONFIGURACIÓN INICIAL

Una vez realizado la descarga del programa HEC-HMS versión 3.0 para Windows XP, de la dirección electrónica: <http://www.hec.usace.army.mil/>, para empezar un nuevo proyecto o una simulación hidrológica se dirige a *Inicio/Todos los Programas/HEC/HEC-HMS*. (Figura 5.1)

Se toma como valor decimal el punto y no la coma pues el programa reconoce como números enteros y no como decimal. Es conveniente que se grabe cada paso que se realice, para no tener ningún problema con el paquete.

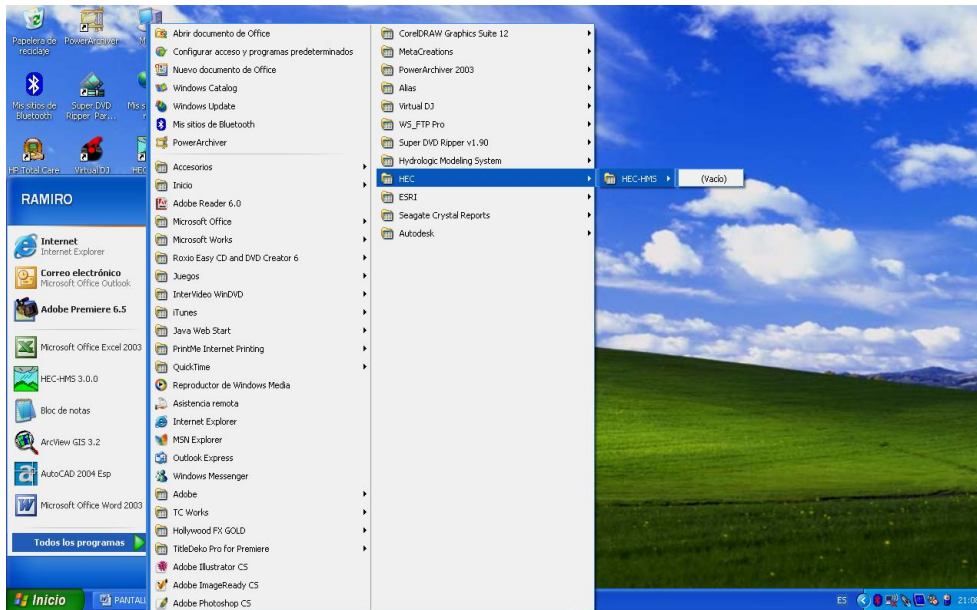


Figura 5.1: Configuración Inicial

Antes de realizar cualquier tipo de simulación se debe investigar las características requeridas para el modelo a emplearse dentro del paquete, para el presente proyecto fue de ayuda la información obtenida en el Sistema de Información Geográfica (SIG) en la cual se obtuvo la información de uso y tipo de suelo, cartografía base, modelo digital del terreno, estaciones limnigráficas y pluviográficas, grupo hidrológico del suelo y delineaciones de subcuencas.

### 5.3 DESCRIPCIÓN DE LA PANTALLA DEL HEC-HMS 3.0

La ventana del HEC-HMS contiene las siguientes secciones:

- **Barra de menú:** En esta se indica todos los componentes que el usuario necesita para realizar cualquier tipo de simulación.

- **Barra de herramientas:** HEC-HMS 3.0 esta constituido para definir la estructura de la cuenca, el cual esta constituido de los siguientes componentes:
  - a. Subcuencas (subbasins)
  - b. Tramos de tránsito (routing reach)
  - c. Uniones (junctions)
  - d. Embalses (reservoirs)
  - e. Fuentes (Sources)
  - f. Sumideros (sinks)
  - g. Derivaciones (diversions)

Con estos siete componentes, se puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que se está tratando y como permita la información de campo disponible.

- **Ventana de descripción de la cuenca:** El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:
  - a. Módulo de precipitación: Permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.



b. Módulo de la cuenca: Permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrograma total de salida.

c. Módulo de control: Incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos.

- **Ventana del modelo a emplearse:** Esta ventana muestra los modelos matemáticos requerido en las diferentes simulaciones.
- **Ventana de mensaje:** Muestra paso a paso todo lo que el usuario esta ejecutando.
- **Pantalla Principal:** Muestra el esquema gráfico de los componentes de la cuenca.

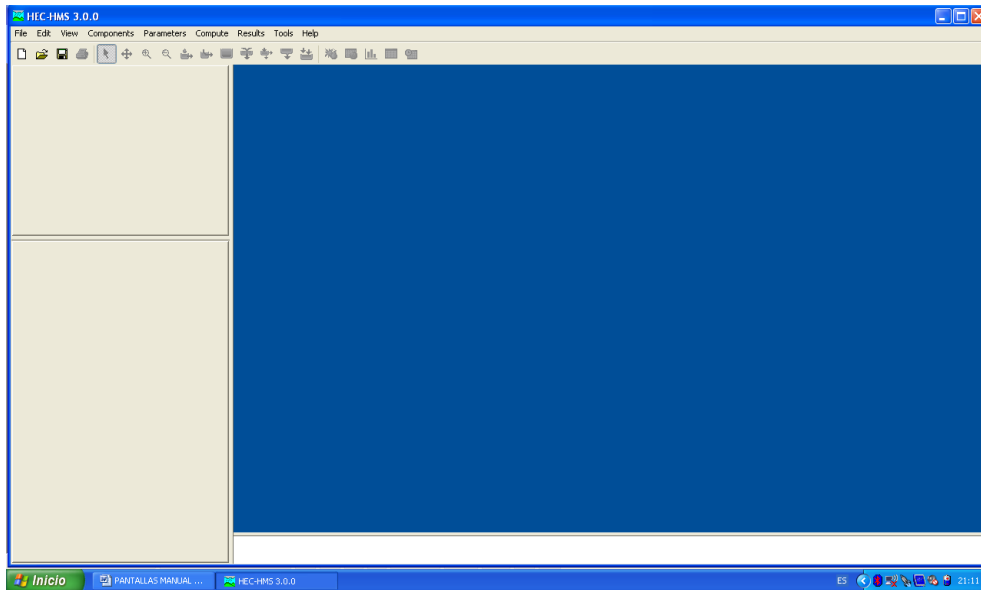


Figura 5.2: Pantalla Principal del HEC-HMS 3.0

#### 5.4 EL MODELO DE LA CUENCA

Se ingresa a *File/New*, y se hace el modelo de la cuenca, poniendo el nombre, descripción y unidades (Sistema Internacional), luego *OK*. (figura 5.3)

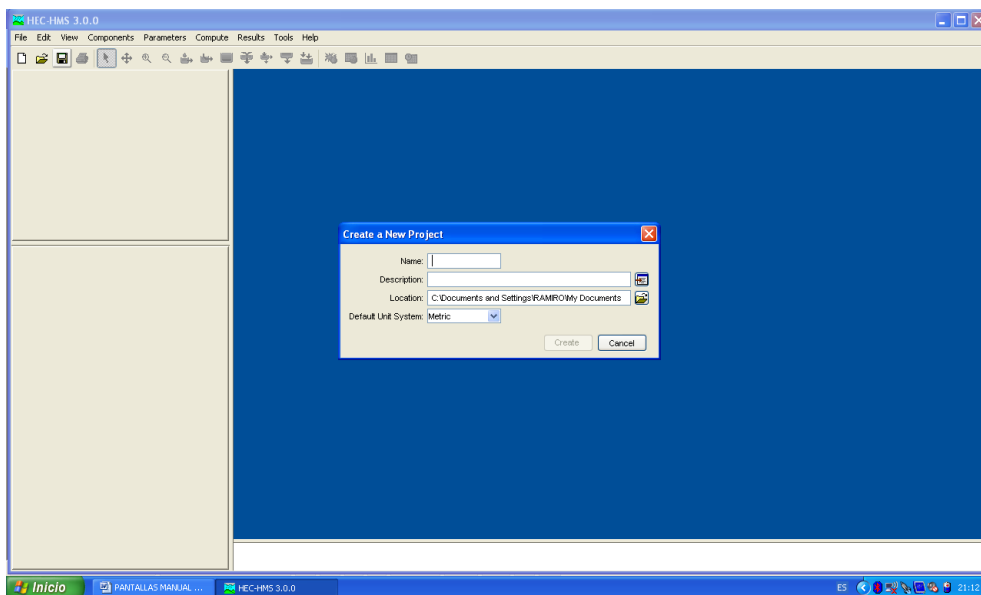


Figura 5.3: Modelo de la cuenca

Luego se dirige a la barra de menú donde se encuentran todos los componentes para realizar la simulación de una cuenca:

Para crear subcuencas se dirige a: *Components/Basin Model Manager/New/Name/Create.*

Para crear los modelos meteorológicos se dirige a: *Components/Meteorologic Model Manager/New/Name/Create.*

Para crear las especificaciones de control se dirige a: *Components/Control Specifications Manager/New/Name/Create.*

Para crear los datos de lluvia se dirige a: *Components/Time-Series Data Manager/Precipitation Gages/New/Name/Create.*

Para crear los datos de descarga se dirige a: *Components/ Time-Series Data Manager/Discharge/New/Name/Create.*

Estos son los componentes principales o fundamentales que requiere el programa para ejecutar una simulación. (figura 5.4)

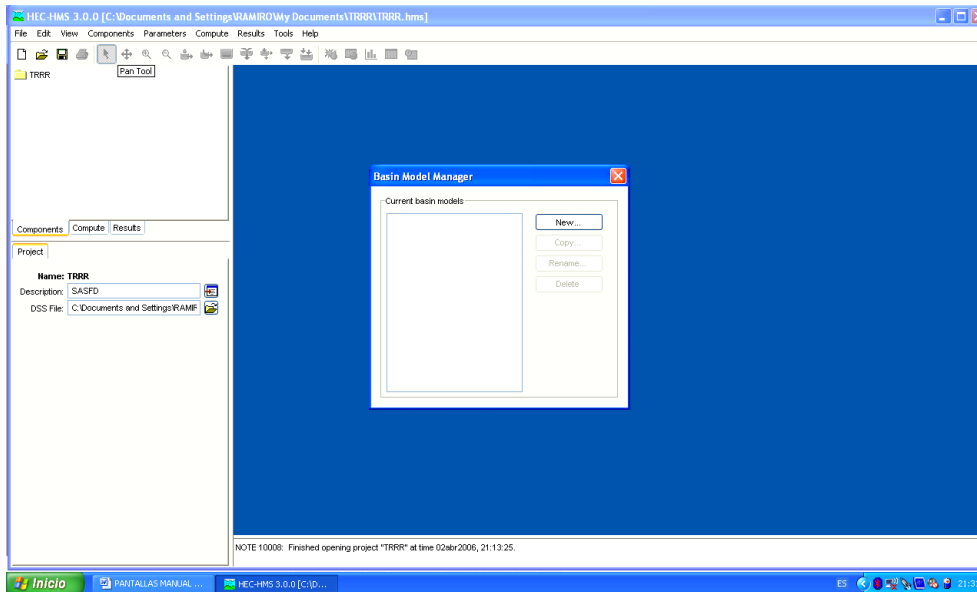


Figura 5.4: Componentes del modelo de la cuenca

Para ingresar la subcuenca dentro de la pantalla principal se dirige a la ventana de descripción de la cuenca, luego se va a barra de herramientas haciendo clic izquierdo y se arrastra hacia la pantalla principal; y se tiene la subcuenca para ingresar los datos correspondientes a la subcuenca. (Figura 5.5)

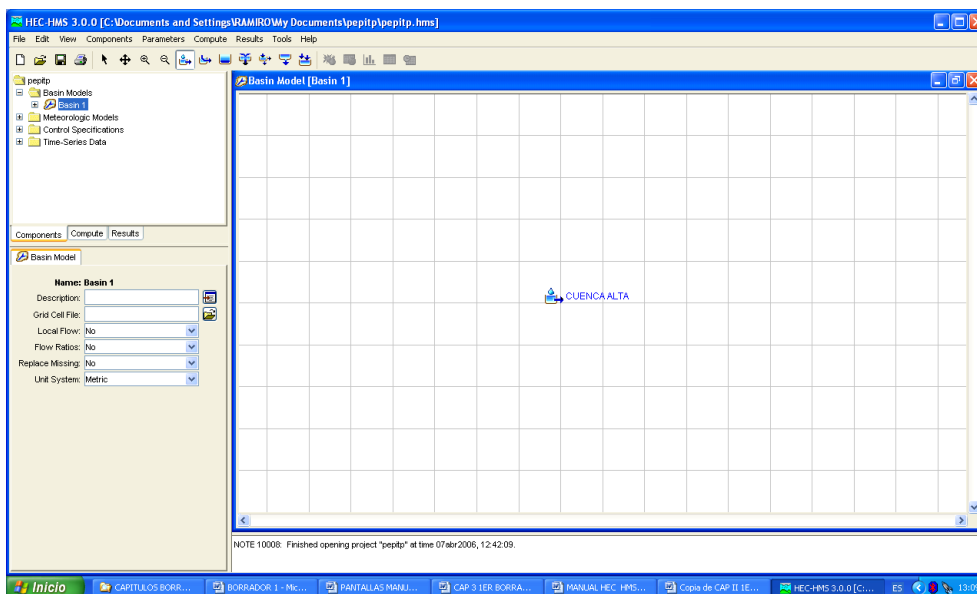


Figura 5.5: Ingreso de la subcuenca

Se hace clic izquierdo dentro de la subcuenca creada, luego aparece dentro de la ventana de descripción de la cuenca los modelos que requiere la simulación, para esto nos dirigimos a: *Parameters* y aparecerá una ventana donde indica la infamación sobre las condiciones de humedad de suelo, precipitación histórica o de diseño, morfometría de la subcuenca, proceso de transformación de lluvia a escorrentía y tránsito de caudales a través de canales embalses.

Para el proyecto se ingreso: las condiciones de humedad del suelo en el que se utilizó el método de pérdidas iniciales y constantes, precipitación histórica o de diseño se utilizó el método del hidrograma especificado por el usuario, en el proceso de transformación de lluvia en escorrentía se utilizó el método del hidrograma unitario sintético de Clark y para el tránsito de caudales a través de canales y embalses se empleó el método de Tiempo de Retardo.

Para la simulación se requiere ingresar un caudal base, el cual se encuentra en *baseflow method*, en el proyecto se ingreso el método del caudal base mensual.

Una vez escogido los métodos para la simulación se procede a ingresar los datos requeridos por el paquete según el método seleccionado.(Figura 5.6)

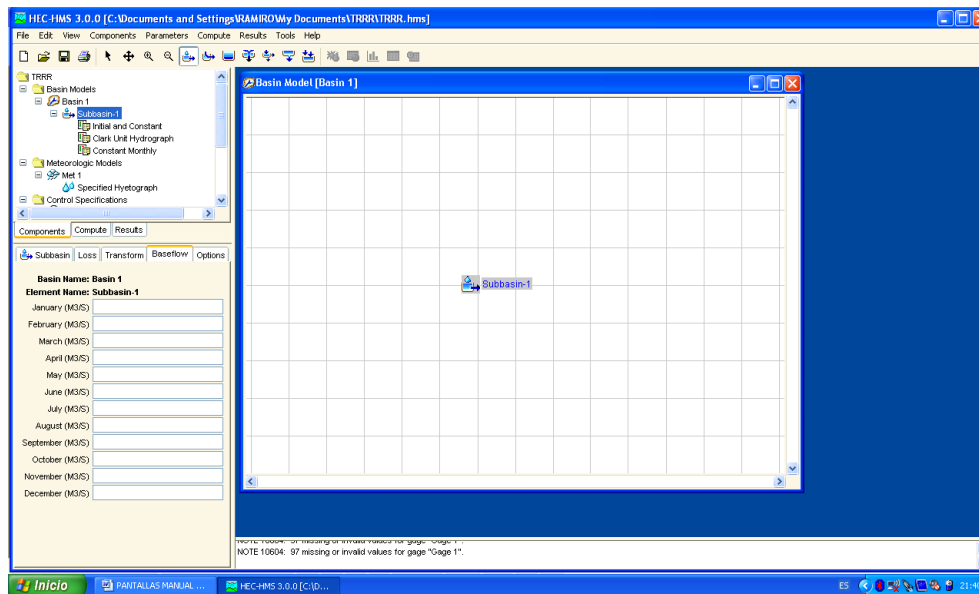


Figura 5.6: Métodos requeridos, HEC-HMS

## 5.5 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Se le asigna un control, que se va observar como circula el caudal a través de la cuenca, se coloca el día en que caerá la tormenta (*Start date y End date*), un intervalo de tiempo (*Time interval*) que sea menor que el 29% del intervalo de tiempo que se usará para introducir los datos de los pluviómetros, y el inicio y el final del tiempo de observación lluvia (*Start time y End time*), que tendrá que ser mayor que el tiempo que se supondrá que dura la lluvia, porque si no se hace así entonces no le dará tiempo a observar como baja todo el caudal y por lo tanto no tendrá hidrogramas completos (es obvio que el caudal termina de pasar por la salida de la cuenca tiempo después de dejar de llover). (Figura 5.7)

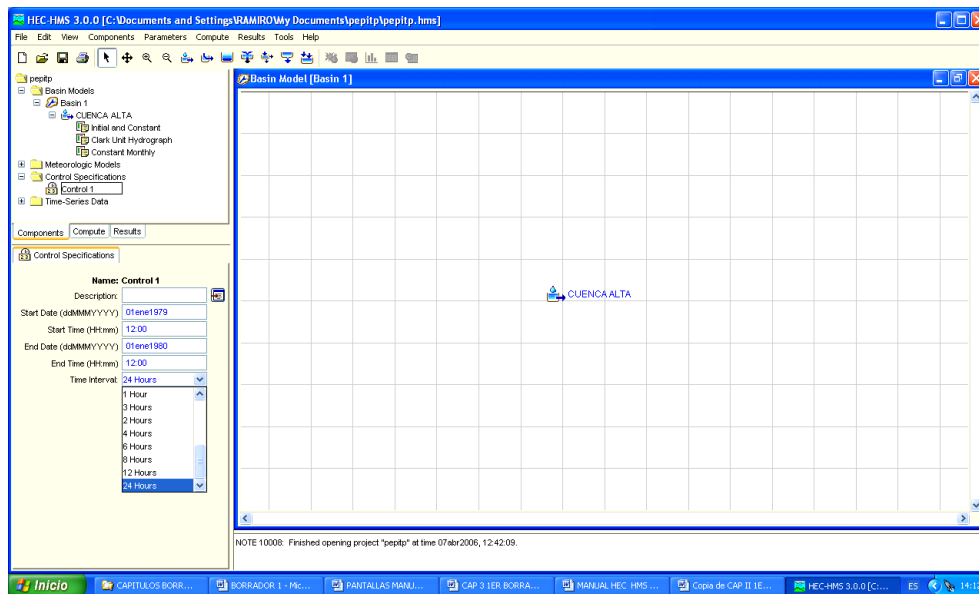


Figura 5.7: Especificaciones de Control, HEC-HMS

## 5.6 INGRESO DE DATOS DE LLUVIA

Se ingresan datos en los pluviómetros. Decir que el programa está preparado para ingresar datos de pluviómetros reales, con lo cual un solo modelo meteorológico puede tener varios pluviómetros y pueden llevar sus correspondientes coordenadas geográficas y datos particulares.

Si se tiene varias tormentas de proyecto para diferentes períodos de retorno, se crea varios modelos meteorológicos (uno por cada periodo de retorno) y en cada modelo consideramos que existe un solo pluviómetro que no importa donde este situado, y asume que el pluviómetro ha recogido la serie de datos de la tormenta de proyecto. Es decir que se asume que un pluviómetro ficticio representa la lluvia que caerá sobre esa cuenca (media ponderada) y se introduce los datos de dicha lluvia.

En la ventana del modelo a emplearse saldrá en el menú desplegable *Data Type: Incremental precipitation*, si es que se tiene los datos por incrementos, o sea, la lluvia que cae esta medida cada intervalo de tiempo considerado en nuestra tormenta de proyecto. También se colocará en *Units: Millimeters* y se deja activada la casilla de *Manual entry*.

Se hace clic en *OK* y saldrá otro menú donde se ingresa el intervalo de tiempo considerado (*Time Interval*), el día de la lluvia, que será el mismo que se introdujo en el control y el cual puede ser cualquier día (*Start date y End date*); las horas de inicio y final de la lluvia (*Start time y End time*), que coincidirán en su inicio con el tiempo de inicio del control y que obviamente corresponderá a un intervalo de tiempo mayor o igual que el tiempo de concentración total para la cuenca (para poder obtener el caudal máximo). La hora de finalización de la lluvia será menor que la hora de finalización de control.

Se hace clic en *OK* y aparece la tabla para empezar a ingresar los datos de lluvia (milímetros caídos, olvidar las intensidades). Que corresponderá a la siguiente entrada de datos:

Al final el *Precipitation manager* muestra las diferentes lluvias (Serie de datos pluviométricos) que se introdujo anteriormente. (Figura 5.8)

Este procedimiento es similar para el ingreso de datos de la descarga del caudal (*Discharge Gages*).



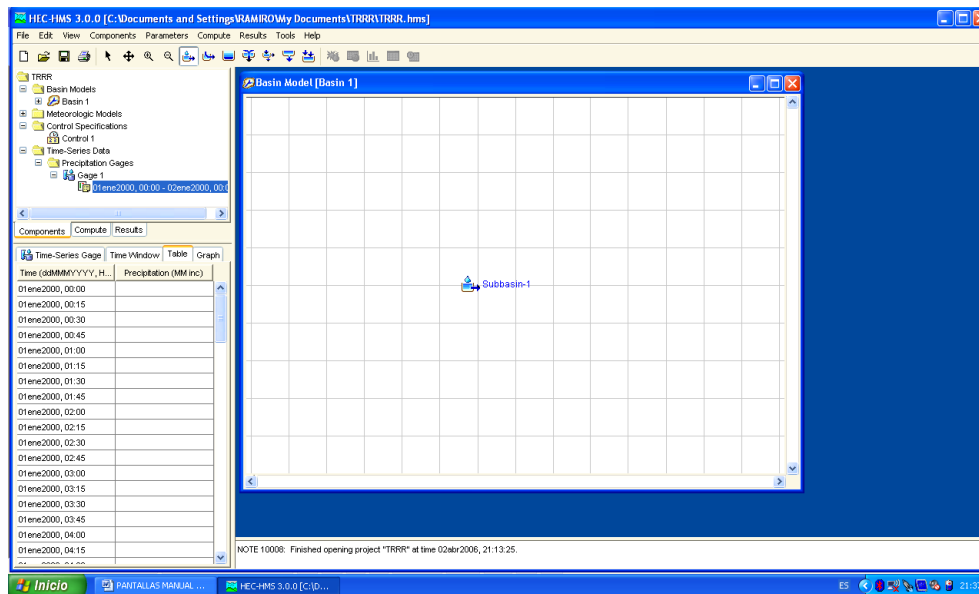


Figura 5.8: Ingreso de datos de lluvia, HEC-HMS

## 5.7 MODELOS METEREOLÓGICOS

Una vez ingresada la media ponderada como lluvias a considerar, creadas y definidas las subcuencas, entonces se crea los modelos meteorológicos, luego se pondrá el nombre, descripción y clic en *OK*.

Luego aparece un menú donde se ingresa una lista de subcuencas (*Subbasin list*), y aparece otro menú donde hacemos un clic en *Yes* a lado derecho de *Basin* (la cuenca) y aparece todas las subcuencas que tenemos en dicha cuenca y se hace clic en *OK*.(Figura 5.9)

Ahora se va *Specified Hyetograph* se elige el nombre de la subcuenca con su respectivo pluviógrafo y se digita la cantidad de lluvia en milímetros (*Total Depth*). (Figura 5.10)

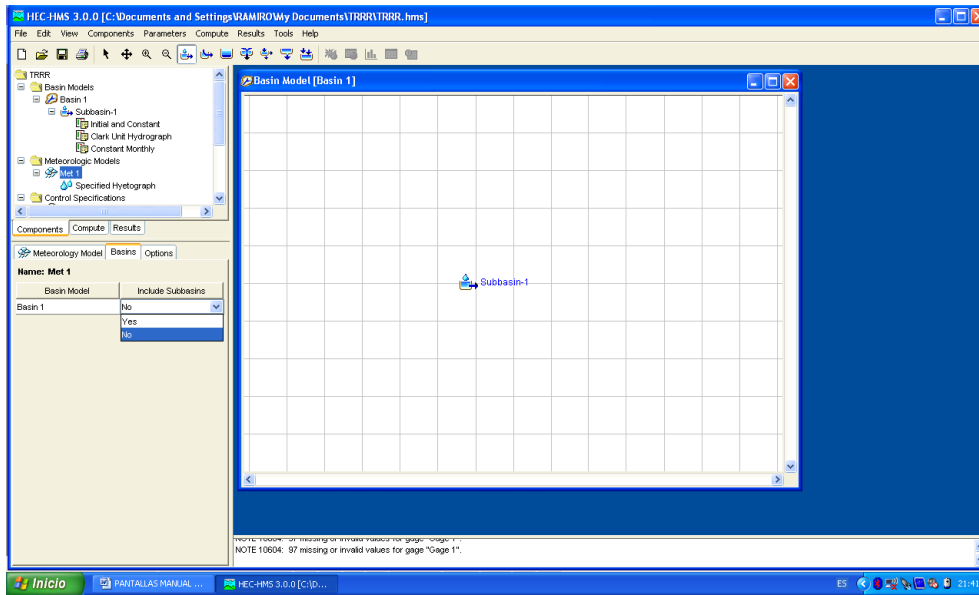


Figura 5.9: Modelo Meteorológico, HEC-HMS

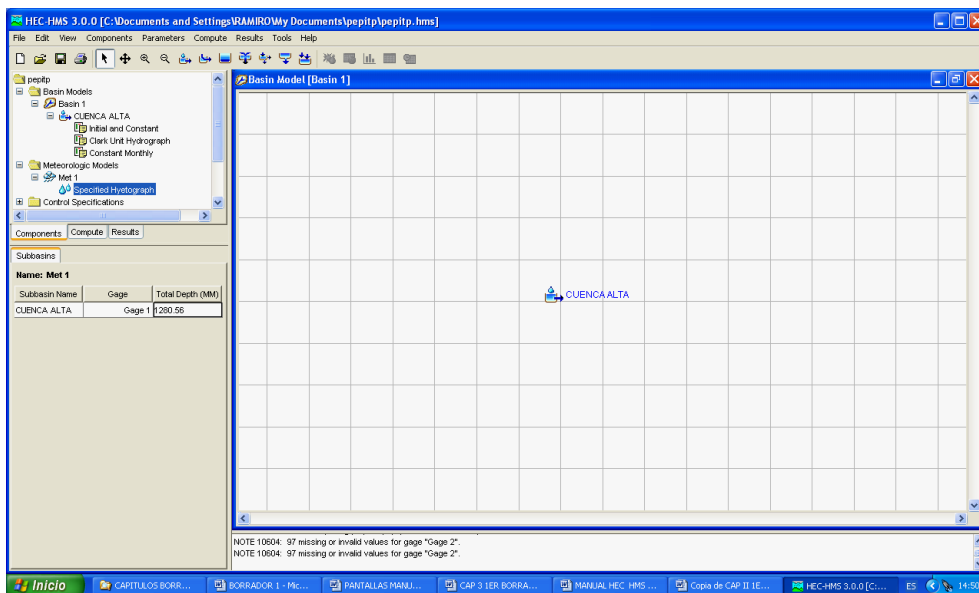


Figura 5.10: Especificaciones del Hietograma, HEC-HMS

## 5.8 CORRIDA DEL PROGRAMA HEC-HMS

Una vez ingresada la información que requiere cada modelo se procede a correr el proyecto simulado-

Se dirige a la barra de menú y se selecciona: *Compute/Create Simulation Run/Name (Run 1)/Next/Basin 1/Next/Met 1/Next/Control 1/Finish*. (Figura 5.11)

Nuevamente se dirige a *Compute*, se selecciona la corrida (*Select Run/Run 1*) y finalmente corremos el programa (*Compute/Compute Run (Run1)*). (Figura 5.12)

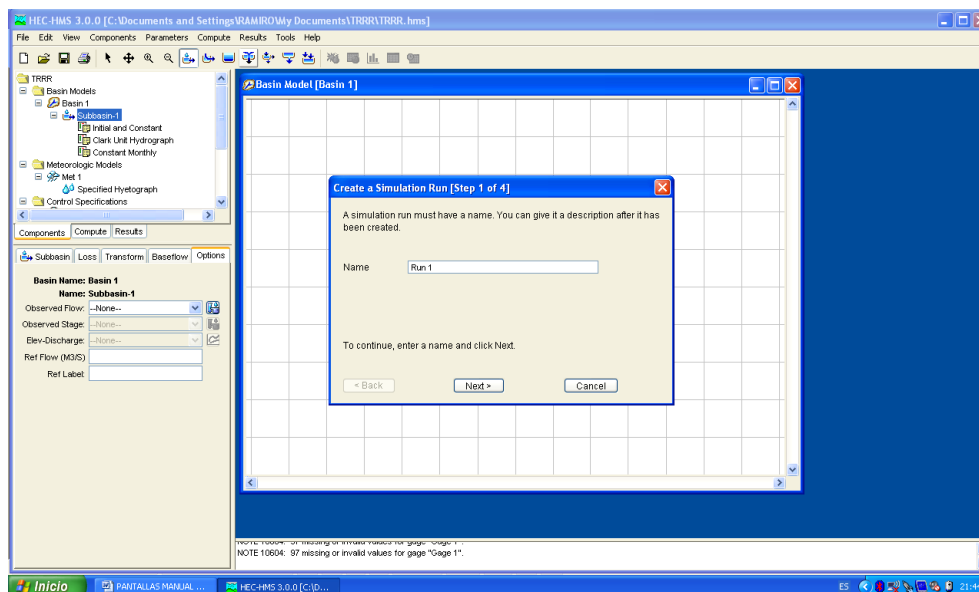


Figura 5.11: Selección de la corrida (Run1), HEC-HMS

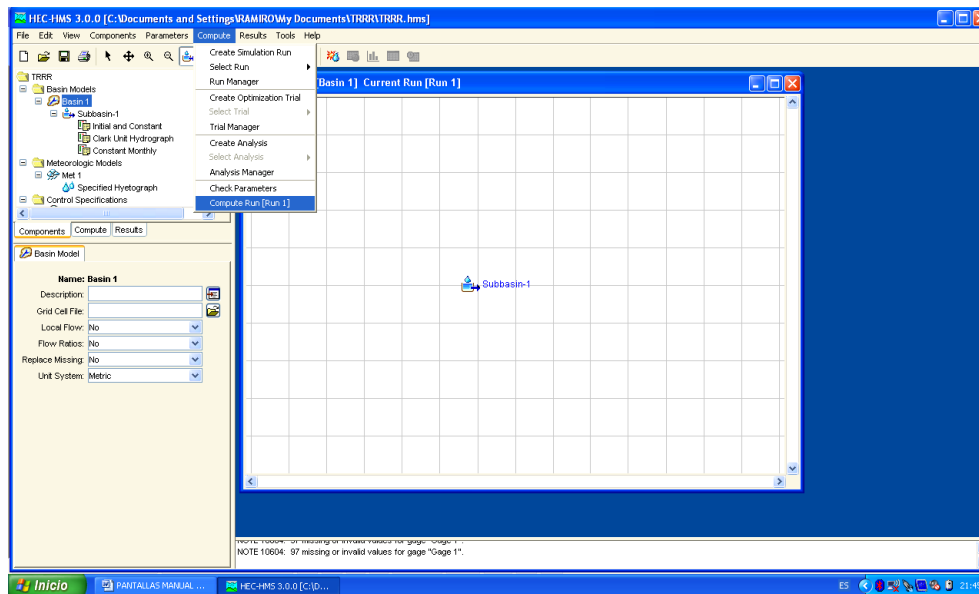


Figura 5.12: Corrida del programa HEC-HMS

## 5.9 LISTADO DE RESULTADOS

Para ver los datos generados por el programa se podrá seleccionar en la barra de menú desplegable del modelo de la cuenca: *Result/Global Summary Table*, o bien se podrá situar el puntero del ratón sobre cualquiera de los electos del modelo, clic derecho y seleccionar cualquiera de las opciones del submenú *View Results*. (Figura 5.13)

En el programa las unidades metros cúbicos por segundo que es la unidad con la que se miden los caudales, en milímetros que es la unidad de precipitación. Los hidrogramas e hietogramas se ven en *View Results/Graph*. (Figura 5.14)

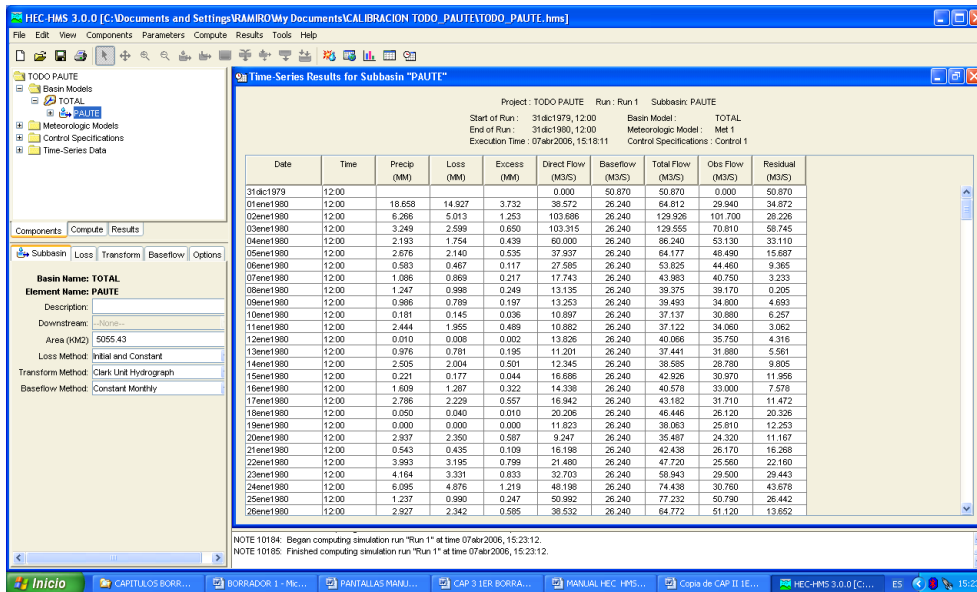


Figura 5.13: Tabla de Resultados, HEC-HMS

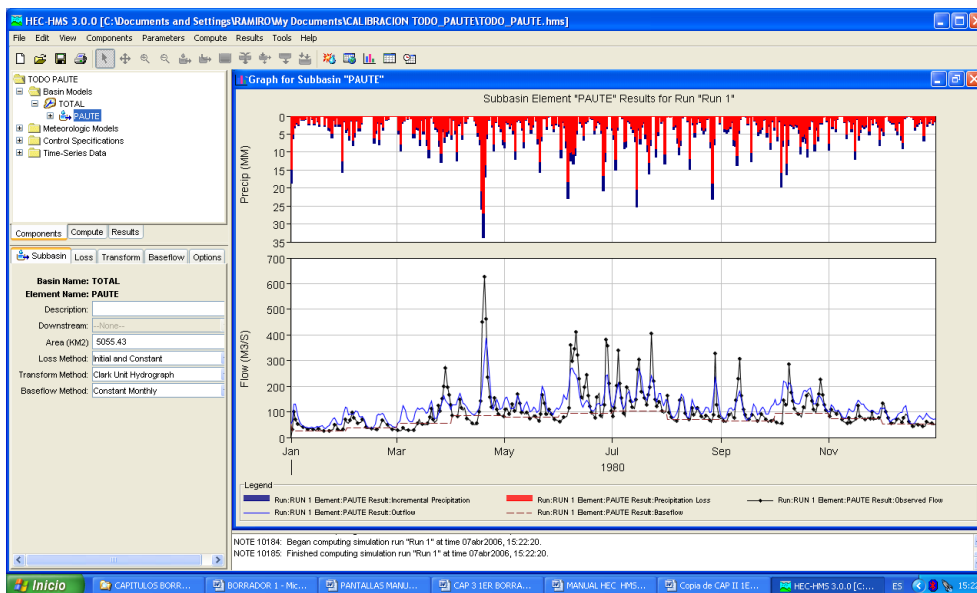


Figura 5.14: Grafica de Hietograma e Hidrograma, HEC-HMS

## CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

La cuenca del Paute es particularmente heterogénea principalmente por la diversidad de las influencias climáticas que le afectan.

Como herramienta computacional el software ArcView 3.2 es de gran ayuda para obtener información de las características morfométricas de la zona estudiada.

En la cuenca hidrográfica del Paute la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede operar para la determinación de una modelación hidrológica, pues a través de este tenemos datos de tipo de suelo, el uso del suelo, cobertura vegetal, u otro tipo de variable que se presente ante una respuesta hidrológica.

El modelo HEC-HMS presenta varios métodos para determinar la respuesta hidrológica de una cuenca, por esto es necesario elegir un método para cada uno de los componentes del paquete. Para el proyecto se escogió información disponible en el SIG, la cual está acorde con la cuenca del Paute. Es necesario aclarar que en el Ecuador no se dispone de información requerida para ciertos métodos requeridos por el paquete HEC-HMS.

De los métodos escogidos para el pronóstico de caudales con el paquete HEC-HMS debemos enfatizar que los parámetros con mayor incidencia para la calibración del modelo están relacionados con la impermeabilidad, capacidad de almacenamiento y tiempo de concentración de la cuenca.

El paquete HEC-HMS trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca: Modulo de precipitación, modulo de la cuenca y modulo de control; Estos tres módulos deben definirse completamente antes de iniciar la [corrida de la simulación](#).

Ya que el paquete HEC-HMS es un modelo matemático, para este proyecto se trabaja como modelo continuo, su diseño está programado para varios años y además se basa en reproducir fenómenos que son continuos en el tiempo.

Durante el proceso de calibración se realizó cuatro pruebas; de las cuales se obtuvo mejor coeficiente de determinación en la prueba 3 aportando las cinco subcuencas y logrando un  $R^2 = 0.6789$ , notándose que en el año 1980 los caudales simulados son mayores a los caudales observados teniendo la misma tendencia estacional en los picos dentro del hidrograma, mientras que en la prueba 4 aportando como una sola cuenca (Paute) y logrando un  $R^2 = 0.7008$ , notando una mejor tendencia estacional del hidrograma y reproduce caudales picos semejantes a los observados. Para el proceso de lluvia - escurrimiento se trabaja para las dos pruebas con la media ponderada de las ocho estaciones meteorológicas mencionadas.

Para el proceso de validación se trabajó con las mismas estaciones pero con diferente período de información (1978) tiempo en el cual no varían los parámetros establecidos para la cuenca; obteniendo un factor de determinación  $R^2 = 0.7682$ , esto quiere decir que el modelo genera una buena tendencia estacional del hidrograma y reproduce caudales pico semejantes a los observados.

Como se aprecia en el hidrograma de comparación de resultados simulados entre los paquetes EMILE y HEC-HMS (Cuadro 4.1), los caudales pronosticados para el año 1980 presenta entre las dos una buena tendencia estacional, además se observa que los caudales picos simulados por HEC-HMS en comparación a los de EMILE tienen mejor similitud a los caudales observados esto se debe a las altas precipitaciones registradas en la cuenca del Paute.

## **6.2 RECOMENDACIONES**



Cuando el área de estudio es muy extensa es recomendable dividir a la cuenca principal en varias subcuencas para diferenciar tipo y uso de suelo, características morfométricas y climatológicas, etc.

Se recomienda para la etapa de calibración obtener mayor información de período, para así obtener resultados más satisfactorios en la verificación de los modelos.

Al ser la precipitación variables preponderantes en la generación de caudales, se aconseja mejorar la calidad de información en las estaciones meteorológicas realizando un registro continuo a nivel diario.

Se recomienda en la subcuenca Alta 2, conocida como la subcuenca del Tarqui colocar más estaciones meteorológicas, ya que en esta no presenta buena información de lluvia.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## TEXTOS

- AGUAMARKET, Diccionario del agua  
<http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?ld=5720>
- CACERES L., 1997- Evidencias del cambio climático en el Ecuador, Informe parcial y preliminar, INAMHI proyecto Ecuador Climate Change Country Study, Día Meteorológico Mundial.
- CALVEZ R. et al, 1996- Constitución de un archivo operacional de precipitaciones diarias de la cuenca del Paute, projet INSEQ serie nº4.
- CHOW, V.T., 1964. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill, New York, N.Y.
- ECHARRI LUIS, 1998, Ciclo hidrológico, “Ciencias de la tierra y del Medio Ambiente”, Editorial Teide.  
<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/423/cap6.html>
- FERNÁNDEZ, N., 1982, Utilización de los modelos de simulación hidrológica con fines de investigación en una cuenca experimental. Trabajo de ascenso. Maracay, Venezuela; Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.  
<http://www.redpav-fpolar.info.ve/danac/printarticle.php?ld=19&layout=html>

- HENDERSON, F.M.,1966, Open Channel Flow. MacMillan Publishing Co. Inc., New York, N.Y.
- HIDALGO MARCELO, 2005, Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y aplicaciones básicas, E.P.N., Ecuador.
- HUDSON N.W., Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO – 68)  
<http://www.fao.org/docrep/T0848S/T0848s09.htm>
- INAMHI, ing. Fernando García, 2004, Pronóstico de caudales de ingreso al Embalse Amaluza para el manejo de la central hidroeléctrica de Paute.
- INAMHI – IRD, 2000, Modelación Hidrológica en la Cuenca del Río Paute.
- INAMHI, 1995, Estaciones Meteorológicas de la Cuenca del Río Paute, serie INSEQ 10, Quito.
- INAMHI, 1996, Estudio Preliminar de los Estiajes en las cuencas de los ríos Paute y Guayas, serie INSEQ 1, Quito.

- INAMHI, 1997, Modelización Hidropluviométrica: Del Modelo Global en un Modelo Distribuido, Aplicación en la cuenca Vertiente del Paute, serie INSEQ 19, Ecuador.
- MANUAL HEC-HMS, 2001 – 2005, Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual,  
[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/hms\\_technical.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/hms_technical.pdf)
- MONSALVE SÁENZ G., 1995, Hidrología en la Ingeniería, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- PILGRIM, D.H., AND CORDERY, I., 1992, “Flood runoff”, D.R. Maidment, ed., Handbook of hydrology, McGraw – Hill, New York, N.Y.
- PROAÑO OSWALDO y UNDA BORIS, 1995, Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWRRB (Simulador de recurso hídrico en cuencas rurales) a cuenca hidrográfica del Ecuador.
- SCS, 1986, Soil Conservation Service. Urban Hydrology for small watersheds, Technical Release 55. USDA, Springfield, VA.
- SIGAGRO, Estudio de Suelos y Uso de Suelos, escala de mapas digitales 1:250000, Ecuador

- SINGH. VIGAY P., 1992, Elementary Hidrology, Prentice – Hall, Englewood Cliffs
- SKAGGS, R.W., Y KHALEEL, R., 1982, Infiltration Hydrologic modelling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI.
- TEMEZ JOSÉ, 1978, Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.

## **SOFTWARE**

- ArcView, versión 3.2, Mapas Digitales
- HEC-HMS, Hidrologic Modeling System, versión 3.0  
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms>