VALIDACION DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA. CASO: CUENCA DEL RIO UNARE (ESTADOS GUÁRICO-ANZOÁTEGUI).

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL

VALIDACION DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA. CASO: CUENCA DEL RIO UNARE (ESTADOS GUÁRICO-ANZOÁTEGUI).

Autores:
Br. Melissa Barrera
Br. César Morales
Br. Juan C. Rodrigo

Tutor: Ing. Adriana Márquez

BÁRBULA, JUNIO 2012

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL

VALIDACION DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA. CASO: CUENCA DEL RIO UNARE (ESTADOS GUÁRICO-ANZOÁTEGUI).

Autores:
Br. Melissa Barrera
Br. César Morales
Br. Juan C. Rodrigo

Trabajo presentado ante la Escuela de ingeniería Civil de la Universidad De Carabobo para optar al Título de Ingeniero Civil

BÁRBULA, JUNIO 2012

DEDICATORIA

“A mi Hermana Lidia Verónica Rodrigo Chacón, por su ayuda incondicional y por todo su apoyo, espero nunca olvidar todo lo que ha trabajado por mi, como muestra de todo el aprecio, este trabajo es dedicado solo para ella”. Juan Carlos Rodrigo Chacón

“A mis padres y a mi hermano, a quienes jamás encontraré la forma de agradecer su constante el cariño, apoyo y confianza brindado en los momentos buenos y los no tan buenos, sólo espero que comprendan que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos e inspirados en ustedes”. César Enrique Morales Michelena

“A mis padres y hermanos por brindarme su apoyo incondicional, a todas as personas que aportaron su granito de arena para que yo pudiera culminar esta etapa”

AGRADECIMIENTOS

“A mis compañeros de tesis Melissa Barrera y Cesar Morales por acompañarrme al realizar el presente trabajo sin ellos no creo que una labor de tal envergadura llegara a su fin, a la Ing. Adriana Márquez, por estar hombro a hombro en esta tarea tan ambiciosa y por preocuparse por nosotros y empujarnos para que nuestro trabajo finalizara a tiempo”. Juan Carlos Rodrigo Chacón.

“A todas aquellas personas quienes aportaron su granito de arena en el desarrollo de esta investigación; a JUAN y a MELISSA porque sin su labor, esfuerzo, dedicación y constancia no habría sido posible llevar a termino este trabajo; a nuestra tutora por su guía, por compartir con nosotros sus conocimientos; a Oriana Castrillo por que sin ella haber llegado a esta meta de alcanzar este grado universitario hubiese llevado mas tiempo; al CineClub Ing UC y toda la gente que durante estos años de vida universitaria ha pasado por él, quienes han sido una extensión de mi familia y el lugar que es y será como una segunda casa dentro de la universidad”. César Enrique Morales Michelena

“Gracias a Dios por siempre hacer sentir su Presencia, a mis padres y hermanos por creer en mi, por darme ánimo, por ser siempre mi sostén, sin ustedes mi vida estaría incompleta; Gracias a mis amigos en especial Mi clau, por esta amistad incondicional, eres el ángel que Dios puso en mi camino; gracias a mis compañeros de trabajo Juan y César por no desistir”; Melissa Barrera

INTRODUCCIÓN

En Venezuela son evidentes los problemas creados por el uso inadecuado de modelos; es decir, la mayoría de las veces se suelen importar sin un análisis de adaptabilidad a las condiciones locales. Por tal motivo, con esta investigación se llevará acabo un estudio sobre la aplicabilidad de los modelos HEC para evaluar el comportamiento de variables hidrológico – ambientales con énfasis en la zonificación de las planicies de inundación en la cuenca del río Unare – Estados Guarico y anzoátegui, de tal manera de reproducir más fidedignamente el comportamiento de la relación lluvia-escurrimiento y en consecuencia determinar parámetros coherentes que permitan a los organismos gubernamentales tener criterios con una base científica para la toma de decisiones en planificación territorial, en función de la expansión urbana.

El estudio de las variables hidrológico-ambientales lluvia-escurrimiento permite considerar las problemáticas relacionadas con las inundaciones, como es el caso del río Unare donde al producirse crecidas naturales, éstas afectan a un representativo número de asentamientos humanos próximos al río, debido a estas situaciones, surge la necesidad de realizar una investigación que proporcione una metodología para determinar la extensión y la profundidad del agua en las planicies para eventos cuya probabilidad de ser excedidos son del 1%, 2% y 10%. Para tal fin, se generaran datos

hidrológicos, cartográficos y geomorfológicos, de tal manera que nos permitan seleccionar los modelos hidrológicos más adecuados suministrados por HEC para la obtención de los resultados.

Esta investigación se ha dividido en cuatro capítulos. El Capítulo I, plantea el problema de investigación, sus objetivos, justificación y el alcance y las limitaciones. El Capítulo II, presenta el marco teórico, el cual está compuesto por los antecedentes y las bases teóricas relativas a la modelación matemática con cada software HEC. El Capítulo III, describe el marco metodológico, donde se puntualiza el tipo de investigación, su diseño, la descripción de la metodología, esta última involucrará en primer lugar la determinación de las características físicas de las subcuencas de estudio con HEC-GeoHMS, luego se continua con los pasos para generar las crecientes de diseño con HEC-HMS, posteriormente se explica cómo determinar las zonas inundables mediante el uso de HEC-RAS para generar los perfiles de superficie del agua y la exportación de esta información hacia HEC-GeoRAS para la delimitación de la extensión de las zonas inundables y su profundidad para los distintos eventos de probabilidad de excedencia mencionados con anterioridad. Finalmente, el Capítulo IV se refiere a los resultados y El Capítulo V se refiere a las conclusiones y recomendaciones.

Con respecto a los datos utilizados y a los resultados generados, los mismos se encontrarán soportados en la sección de Apéndices del presente estudio.

VALIDACION DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA. CASO: CUENCA DEL RIO UNARE (ESTADOS GUÁRICO-ANZOÁTEGUI).

C. Morales, J. Rodrigo, M. Barrera, A. Márquez
Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería
Email: moralesmcesare@gmail.com,
j_rodrigo_chacon@hotmail.com, melissambu@gmail.com, ammarqueztesistas2@gmail.com

RESUMEN

La Depresión de Unare comprende parte de los Estados Anzoátegui y Guárico cubriendo un área aproximada de 22.753 Km2, la población de la zona ha sido afectada por el desbordamiento de los ríos, situación que pone en riesgo el desarrollo de las actividades económicas y sociales de la región. En consecuencia es necesario evaluar las planicies de inundación. El objetivo general de la investigación es validar modelos de estimación del proceso lluvia-escorrentía basado en modelos HEC para analizar variables hidrológico-ambientales considerando como caso de estudio la zonificación de las manchas de inundación en la cuenca. La metodología empleada involucra el diagnóstico de la zona, el procesamiento de los datos de las estaciones pluviométricas y sensores de nivel proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), procesamiento de los datos con el software Statgraphics Centurion XV v.15.2.06; digitalización de cartografía oficial del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) mediante el uso del software Autodesk Raster Design 2010; generación y manipulación del Modelo de Elevación Digital (MDT) a escala 1:100.000 mediante el uso del software ArcGIS 10, combinación de bases de datos digitalizadas de tipos de suelos y uso de la tierra, procesamiento de datos hidrológicos para generación de tormentas de periodos de retorno de 2, 10, 25, 50 y 100 años. Se establecieron modelos digitalizados espaciales de las características físicas y parámetros hidrológicos para los modelos de pérdidas por infiltración, transformación de lluvia en escorrentía y flujo base a partir de los cuales se generaron las crecientes utilizadas para los perfiles superficiales del agua obtenidos con los métodos tradicionales de modelación de flujo estable bajo régimen combinado subcrítico y supercrítico a través del río, para generar la extensión y profundidad de inundación de la zona en estudio para crecientes de los periodos de retorno en estudio.

Palabras claves: transformación lluvia-escorrentía, manchas de inundación, ArcGIS

Autor: César Morales, Juan Rodrigo, Melissa Barrera **Tutor:** Adriana Márquez

INDICE DE FIGURAS

N°	Descripción	Pág.
Figura 1	Tormenta de diseño. Método de bloques alternos……	23
Figura 2	Hidrograma Unitario Adimensional del SCS…….	34
Figura 3	Representación de los términos de la Ecuación de Energía…….	51
Figura 4	Método de Subdivisión de Conducción Predefinido por defecto en HEC-RAS…….	54
Figura 5	Método Alternativo de Subdivisión de Conducción……	55
Figura 6	Definición de la pendiente de las orillas para los cálculos de valor compuesto, n_c	57
Figura 7	Ejemplo de obtención de la energía media…….	59
Figura 8	Diagrama de Energía vs. Elevación de la superficie del agua…….	69
Figura 9	Aplicación del Principio de Cantidad de Movimiento…..	74
Figura 10	Dispositivo electrónico para almacenamiento y procesamiento de datos de escorrentía…….	86
Figura 11	Componentes del sistema de medición de precipitación……..	87
Figura 12	Formato de recolección de datos de escorrentía……	88
Figura 13	Ubicación de las cartas geográficas que forman la cuenca…….	91
Figura 14	Archivos CAD del proyecto…….	96

Figura 15	Icono de ArcMap 10…….	97
Figura 16	Icono de ArcMap 10 en el Menú Inicio…….	97
Figura 17	Abrir un Mapa en Blanco…….	97
Figura 18	Selección de la opción Extensions (Extensiones) en ArcGIS 10…….	98
Figura 19	Selección de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10.	99
Figura 20	Selección de las barras de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10…….	100
Figura 21	Barras de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10…	100
Figura 22	Ubicación del archivo de Curvas de Nivel del proyecto en ArcCatalogo…….	101
Figura 23	Añadir una Referencia Espacial al archivo de trabajo…….	102
Figura 24	Convertir archivos (.dwg) en un Archivo de Forma (.shp)	103
Figura 25	Añadir Capas de Archivos de trabajo…….	104
Figura 26	Archivo de Curvas de nivel Cargadas en ArcMap…….	104
Figura 27	Creando TIN a partir de las curvas de nivel…….	105
Figura 28	Creando TIN a partir de las curvas de nivel……..	106
Figura 29	Guardando el archivo Tincurvas…….	106
Figura 30	Creando TIN desde Características……..	107
Figura 31	Guardando el TIN desde Características……..	107
Figura 32	Resultado de la creación del TIN…….	108

Figura 33	Convirtiendo TIN a Raster……..	108
Figura 34	Guardando el Raster generado……..	109
Figura 35	Resultado de la creación del Raster…….	109
Figura 36	Menú del Preprocesamiento del terreno……..	112
Figura 37	Menú de Gestión de Datos……..	113
Figura 38	Comparación de las técnicas de quemado…….	115
Figura 39	Editor del Reacondicionamiento del DEM…….	117
Figura 40	Resultado del Reacondicionamiento del DEM	117
Figura 41	Editor de la Construcción de Muros…….	119
Figura 42	Resultado de la Construcción de Muros…….	119
Figura 43	Editor del Llenado de Sumideros……..	121
Figura 44	Resultado del Llenado de Sumideros…….	122
Figura 45	Direccionamiento del flujo…….	123
Figura 46	Editor de la Dirección de Flujo…….	124
Figura 47	Resultado de la Dirección de flujo……..	124
Figura 48	Editor de la Acumulación de Flujo…….	125
Figura 49	Resultado de la Acumulación de Flujo……..	126
Figura 50	Editor de la Definición de Corrientes…….	127
Figura 51	Resultado de la Definición de Corrientes…….	128
Figura 52	Editor de la Segmentación de Corrientes…….	129

Figura 53	Resultado de la Segmentación de Corrientes…….	130
Figura 54	Editor de la Delimitación de Subcuencas…….	131
Figura 55	Resultado de la Delimitación de Subcuencas…….	132
Figura 56	Editor del Procesamiento de los polígonos de la cuenca…….	133
Figura 57	Resultado del Procesamiento de los polígonos de la cuenca…….	133
Figura 58	Editor del Procesamiento de los Segmentos de Corriente……...	134
Figura 59	Resultado del Procesamiento de los Segmentos de Corriente…….	135
Figura 60	Menú de la Configuración de proyectos HMS…….	136
Figura 61	Gestión de Datos para generar proyectos HMS……..	136
Figura 62	Ubicación de destino del proyecto…….	137
Figura 63	Selección de nombres para las Capas de Area y Punto de salida…….	137
Figura 64	Editor de la Definición del nuevo proyecto…….	138
Figura 65	Proyecto Generado Satisfactoriamente…….	139
Figura 66	Editor de nombre de las Capas que componen el proyecto……..	140
Figura 67	Proyecto de la Cuenca Unare…….	141
Figura 68	Proyecto de la Subcuenca Ipire……..	141
Figura 69	Proyecto de la Subcuenca Guere……..	142

Figura 70	Proyecto de la Subcuenca Guanape…….	142
Figura 71	Proyecto de la Subcuenca Guaribe……..	143
Figura 72	Proyecto de la Subcuenca Tamanaco…….	143
Figura 73	Opciones para determinar las características de las cuencas…….	149
Figura 74	Editor de Calculo de longitud de los ríos…….	150
Figura 75	Resultado de Calculo de longitud de los ríos……..	150
Figura 76	Editor de Pendientes de Río……..	151
Figura 77	Resultado del Cálculo de las pendientes de los ríos….	152
Figura 78	Editor de Cálculo de pendientes de la cuenca…….	153
Figura 79	Resultado de Cálculo de pendientes de la cuenca……	153
Figura 80	Editor de Longitud del tributario más largo…….	155
Figura 81	Resultado de Longitud del tributario más largo…….	155
Figura 82	Editor de Centroide de las subcuencas…….	156
Figura 83	Resultado de Centroide de las subcuencas…….	157
Figura 84	Editor de Elevación del centroide…….	158
Figura 85	Resultado de Elevación del centroide…….	158
Figura 86	Editor de la ruta del flujo centroidal…….	160
Figura 87	Resultado de la ruta del flujo centroidal…….	160
Figura 88	Menú para estimación de los parámetros hidrológicos	162
Figura 89	Menú de Selección de los procesos HMS…….	163

Figura 90	Menú Dar nombre automáticamente a los ríos…….	164
Figura 91	Menú Dar nombre automáticamente a las subcuencas	166
Figura 92	Menú 1 Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid…….	169
Figura 93	Menú 2 del Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid…….	170
Figura 94	Resultado de la creación de la capa intersección de la celdas GRID del projecto…….	170
Figura 95	Resultado de la creación de la capa SGH……	171
Figura 96	Editor de Parámetros de la subcuenca desde archivo RASTER…….	172
Figura 97	Metodología para la estimación del Número de Curva para las Subcuencas…….	173
Figura 98	Porcentajes de grupos de suelos hidrológicos y uso de la tierra……..	174
Figura 99	Creación de tablas de búsqueda de CN para distintas condiciones de humedad del suelo…….	175
Figura 100	Polígonos del número de curva…….	176
Figura 101	Temas grid en la Tabla de contenidos y muestra de mapas……..	177
Figura 102	Ingreso de temas para la estimación del número de curva…….	177
Figura 103	Icono HMS……..	179
Figura 104	Pantalla del Programa…….	180
Figura 105	Creación del nuevo proyecto……..	181

Figura 106	Selección de Archivos a Importar desde Hec-GeoHMS.	182
Figura 107	Corrida de simulación importado desde Hec-GeoHMS..	182
Figura 108	Componentes del Editor de Modelo de la Cuenca y opciones de cálculos de flujo…….	184
Figura 109	Selección del método de pérdidas SCS Curve Number para la simulación de la cuenca del río Ipire…….	185
Figura 110	Variables del método de pérdidas SCS Curve Number para la simulación de la cuenca del río Ipire…….	185
Figura 111	Selección del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire……..	186
Figura 112	Variables del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire…….	186
Figura 113	Selección del método Mensual Constante para el Flujo base en la simulación de la cuenca del río Ipire……..	188
Figura 114	Variables del método de Constante Mensual para el Flujo Base en la simulación de la cuenca del río Ipire..	188
Figura 115	Selección del método Muskungum para el tránsito de crecientes en la simulación de la cuenca del río Ipire..	189
Figura 116	Variables del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire…….	190
Figura 117	Administrador de Series de Tiempo para la generación de pluviómetros……..	191
Figura 118	Editor de características de los pluviómetros……..	192
Figura 119	Editor de Fecha y hora inicial y final de la precipitación.	193

Figura 120	Editor de Tabla de valores de precipitación…….	194
Figura 121	Hietograma correspondiente de la Precipitación…….	195
Figura 122	Administrador de Series de Tiempo para introducir la descarga observada correspondiente a la precipitación introducida……..	196
Figura 123	Editor de características del dispositivo de Descarga…	197
Figura 124	Editor de Fecha y hora inicial y final de la descarga…..	197
Figura 125	Editor de Tabla de valores de Descarga……..	198
Figura 126	Hidrograma correspondiente a la descarga observada introducida…….	199
Figura 127	Visualizador de Modelo Meteorológico importado desde Hec-GeoHMS…….	200
Figura 128	Visualizador del Control de Especificaciones. Intervalo de tiempo de la simulación…….	201
Figura 129	Creación de la Corrida de Simulación……..	202
Figura 130	Asignación de Nombre a la Corrida de Simulación…….	203
Figura 131	Asignación del Modelo de Cuenca a utilizar en la Corrida de Simulación……..	204
Figura 132	Asignación del Modelo Meteorológico a usar en la corrida de Simulación……..	204
Figura 133	Asignación del Control de la Corrida de Simulación…...	205
Figura 134	Tabla de Resultados Resumen Global…….	206
Figura 135	Gráfico de Resultados a la Salida de la Cuenca del río Ipire…….	207

Figura 136 Resumen de Resultados a la salida de la Cuenca del río Ipire…… 207

Figura 137 Tabla de Datos de Serie de tiempo para la salida de la cuenca del río Ipire…….. 208

Figura 138 Resultado de Caudal Calculado a la salida de la cuenca del río Ipire……... 209

Figura 139 Resultado de Caudal Observado a la salida de la cuenca del río Ipire……... 209

Figura 140 Resultado de Caudal Residual a la salida de la cuenca del río Ipire…… 210

Figura 141 Resultado de la Entrada combinada de Caudales a la salida de la cuenca del río Ipire…….. 211

Figura 142 Menú RAS Geometry de la barra de Herramientas de Hec-GeoRas 4.3…….. 212

Figura 143 Menú RAS Geometry - barra de Herramientas de Hec-GeoRas 4.3…… 213

Figura 144 Nombre de la Capa del Eje Central de la corriente……. 214

Figura 145 Editor de Crear Características y la Herramienta Construcción…….. 215

Figura 146 Menú de edición Construcción de Características…….. 215

Figura 147 Eje del Cauce……. 216

Figura 148 Ventana River and Reach IDs……. 217

Figura 149 Ventana Flow Paths……. 217

Figura 150 Ventana XS Cut Lines…….. 218

Figura 151 Editor de Ventana Ventana XS Cut Lines……. 219

Figura 152 Secciones Transversales del cauce…….. 220

Figura 153 Superficie Requerida……. 221

Figura 154 Capas Requeridas……. 221

Figura 155 Capas opcionales……. 222

Figura 156 Tablas Opcionales……. 222

Figura 157 Menú de Atributos del eje central de la corriente…… 223

Figura 158 Topología del rio creada satisfactoriamente……. 224

Figura 159 Longitud del rio y distancias de las estaciones creadas satisfactoriamente……. 225

Figura 160 Alerta en la Creación de la Capa de rio 3D……. 225

Figura 161 Creación de la Capa de rio 3D…….. 226

Figura 162 Menú de Atributos de las secciones transversales…… 227

Figura 163 Asignación de nombres de los ríos y tramos……. 228

Figura 164 Estaciones en las secciones transversales……. 228

Figura 165 Longitud de los tramos hasta salida de la cuenca……. 229

Figura 166 Secciones transversales creadas satisfactoriamente…. 230

Figura 167 Exportar datos RAS…….. 231

Figura 168 Datos Ras exportados satisfactoriamente……. 231

Figura 169 Icono de HEC-RAS…….. 233

Figura 170 Ventana Principal de HEC-RAS……. 233

Figura 171 Ventana HEC-RAS – File – New Project…….. 234

Figura 172 Ventana HEC-RAS – Units Sistem……. 235

Figura 173 Ventana *HEC-RAS – Geometric Data*…….. 235

Figura 174 Ventana File - New Geometry Data……. 236

Figura 175 Ventana de importación de la data geométrica……. 236

Figura 176 Archivo de Importación creado en PreRAS…….. 237

Figura 177 Datos de Secciones Transversales……. 238

Figura 178 Ventana de Edición de valores n de Manning…….. 240

Figura 179 Selección de la opción para editar el flujo estable…….. 242

Figura 180 Edición del nombre de los perfiles……. 243

Figura 181 Ingreso de los caudales picos de crecientes en el editor de datos de flujo estable…….. 243

Figura 182 Ingreso las condiciones límites para el flujo estable….. 244

Figura 183 Almacenamiento de los datos de flujo estable……. 245

Figura 184 Ventana principal, selección de Steady Flow Data desde el menú RUN……. 245

Figura 185 Título para el plan 03……. 246

Figura 186 Identificador del Plan……. 246

Figura 187 Selección del botón Compute para correr el Plan 03… 247

Figura 188 Ventana de Ejecución……. 247

Figura 189 Ventana principal de HEC-RAS para proyecto del Plan 03……. 248

Figura 190 Creación del archivo de exportación……. 249

Figura 191	Confirmación de la creación del archivo de exportación……	249
Figura 192	Generación del Reporte Final……	250
Figura 193	Reporte Final……	251
Figura 194	Conversión del archivo de exportación de .SDF a .XML	252
Figura 195	Archivo de Exportación convertido a XML…….	253
Figura 196	Configuración de capas para el Postprocesamiento…..	254
Figura 197	Menú importación de los datos RAS…….	255
Figura 198	Avance de la importación de datos…….	256
Figura 199	Finalización de la importación…….	256
Figura 200	Capas creadas en la importación de datos……..	258
Figura 201	Creación de la superficie de agua…….	259
Figura 202	TIN de superficie de agua generado…….	260
Figura 203	Delimitación de la planicie de inundación…….	262
Figura 204	Capas y delimitación de la planicie de inundación generadas……..	263
Figura 205	Selección del perfil para generar el mapa de velocidades……..	264
Figura 206	Mapa de velocidades generado satisfactoriamente……	265
Figura 207	Capas y mapa de velocidades generado……..	265
Figura 208	Selección del perfil para generar el mapa de fricción ene le lecho del canal……..	266

Figura 209	Mapa de fricción en el lecho del canal generado satisfactoriamente……	267
Figura 210	Resultado del mapa de Fricción en el lecho del canal…	267
Figura 211	Selección del perfil para generar el mapa de energía de flujo…….	268
Figura 212	Mapa de energía de flujo generado satisfactoriamente.	269
Figura 213	Resultado del mapa de energía de flujo…….	269
Figura 214	Pronostico de Lluvia Media, Estación Bella Vista Edo. Guárico Latitud: 09°05'30" Longitud: 65°24'00"……..	275
Figura 215	Autocorrelaciones Residuos para ajuste de Precipitación ARIMA(0,0,0)x(2,0.2)12 con constante….	276
Figura 216	Hietograma, Pariaguan Edo. Anzoátegui (05/11/11) hora inicio: 03:00 P.M……..	282
Figura 217	Hietograma, El Carito Edo. Anzoátegui (11/06/2010) hora inicio: 09:30 P.M…….	283
Figura 218	Hietograma, Boca de Uchire Edo. Anzoátegui (02/11/2011) hora inicio: 06:40 P.M……...	283
Figura 219	Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 2 años duración una hora……..	284
Figura 220	Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 10 años duración una hora…….	284
Figura 221	Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 25 años duración una hora…….	285
Figura 222	Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 50 años duración una hora…….	285
Figura 223	Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de	

retorno 100 años duración una hora…….. 285

Figura 224 Hidrograma. Estación Clarines Edo. Anzoátegui, Julio 2011……. 286

Figura 225 Hidrograma. Estación Clarines Edo. Anzoátegui, Junio-Marzo 2012……. 287

Figura 226 Hidrograma. Estación Zaraza Edo. Guárico, Marzo 2012……. 287

Figura 227 Hidrograma. Estación Zaraza Edo. Guárico, Junio-Marzo 2012……..... 288

Figura 228 Lluvia total de 4.44 mm de 1h de duración en la Subcuenca del río Ipire Edo. Anzoategui…….. 289

Figura 229 Hidrograma de creciente observado en la cuenca del río Ipire……. 289

Figura 230 Mapa de Subdivisión de la Cuenca del río Ipire…….. 290

Figura 231 Resultados de la calibración del modelo MBPF1. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire, con el modelo de Servicio de Conservación de Suelos (SCS)……. 297

Figura 232 Resultados de la calibración del modelo MBPF2. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire……. 304

Figura 233 Resultados de la calibración del modelo MBPF3. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire……. 311

Figura 234 Ajuste de modelo de SCS a los caudales observados en la etapa de calibración……. 313

Figura 235 Ajuste de modelo de Clark a los caudales observados en la etapa de calibración…….. 314

Figura 236 Ajuste de modelo de Snyder a los caudales observados en la etapa de calibración…….. 314

Figura 237 Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 2 años…….. 316

Figura 238 Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 10 años…….. 316

Figura 239 Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 25 años…….. 317

Figura 240 . Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 50 años…….. 317

Figura 241 Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 100 años……. 318

Figura 242 Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Guanape para T=2años……... 321

Figura 243 Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Guaribe para T=2años…… 322

Figura 244 Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Güere para T=2años……. 323

Figura 245 Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Ipire para T=2años……. 324

Figura 246 Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Tamanaco para T=2años……. 325

Figura 247 Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Guanape……. 330

Figura 248 Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Guanape……. 330

Figura 249 Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con

	respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Guaribe……..	331
Figura 250	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Guaribe……..	332
Figura 251	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Güere……..	332
Figura 252	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Güere…….	333
Figura 253	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Ipire…….	334
Figura 254	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Ipire…….	334
Figura 255	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Tamanaco……..	335
Figura 256	Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Tamanaco……..	336
Figura 257	Caudal Observado y Caudal Estimado con SCS, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire…….	337
Figura 258	Caudal Observado y Caudal Estimado con Clark, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire…….	338
Figura 259	Caudal Observado y Caudal Estimado con Snyder, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire…….	339

INDICE DE TABLAS

Número	Descripción	Página
1	Número N de Manning……	239
2	Coeficientes de Contracción y Expansión……	241
3	Comparación de modelos, Estación Bella vista, serial: 2512……..	272
4	Parámetros de modelo seleccionado, Estación Bella vista, serial: 2512……..	274
5	Estadísticos de ajuste en la etapa de calibración para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui)……	278
6	Estadísticos de ajuste en la etapa de pronóstico para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui)……	280
7	Parámetros para aplicación del Modelo basado procesos Físicos 1……	296
8	Parámetros para aplicación del Modelo basado procesos Físicos 2……..	296
9	Parámetros para aplicación del Modelo basado procesos Físicos 3……..	296
10	Resultado de Caudal Máximo y Volumen de los Modelos lluvia-escorrentía……	312
11	Caudal Pico de Las Cuencas de los ríos Guanape, Guaribe, Güere, Ipire y Tamanaco, que Pertenecen a la cuenca del Río Unare……	320
12	Valores de Caudal Pico Calculado para cada modelo de proceso de transformación de lluvia-escorrentía, para Periodos de Retorno de 2 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años……	329

INDICE GENERAL

		Pág.
	INTRODUCCIÓN……	1
	CAPITULO I: EL PROBLEMA	3
1.1	Planteamiento del Problema.....	3
1.2	Formulación del Problema.....	5
1.3	Objetivos de la Investigación…….....	5
	1.3.1 Objetivo General……	5
	1.3.2 Objetivos Específicos……	5
1.4	Justificación de la Investigación……	6
1.5	Alcances y Limitaciones……	7
	CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1	Antecedentes de la Investigación……	9
2.2	Bases Teóricas……	15
2.3	Modelación con Hec-Geohms y Hms……..	16
2.4	características Físicas de la unidad hidrológica …….	16
	2.4.1 Longitud del flujo Superficial……	17
	2.4.2 Longitud de las corrientes……	17
	2.4.3 Pendiente del canal……..	17
	4.4.4 Longitud al centroide……	18
	2.4.5 Centroide de la cuenca……	18
2.5	Estimación de los Parámetros Hidrológicos y Modelación Hidrológica……	19
	2.5.1 Modelación de la precipitación para HEC-HMS…….	20
	2.5.2 Modelación del volumen de escurrimiento con HEC-HMS……..	23
	2.5.3 Modelación de la escorrentía directa con HEC-HMS…	31
	2.5.3.1 Modelo de HU del SCS……	32

2.5.3.2 Modelo del HU de Clark…….. 36
2.5.3.3 Modelación del flujo base con HEC-HMS……. 41
2.5.3.4 Modelación del tránsito en canales con HEC-HMS… 42

2.6 Modelación con Hec-Ras…….. 45

2.7 Filosofía General Del Sistema Modelado……. 46

2.8 Descripción De Las Capacidades Hidráulicas……. 47

2.9 Perfiles De La Superficie Del Agua En Flujo Permanente…… 48

2.10 Teoría Básica Para Los Cálculos Del Flujo Unidimensional… 49

2.11 Perfiles De La Superficie Del Agua Para Flujo Permanente… 49

2.12 Ecuaciones Para El Cálculo De Los Perfiles Básicos……... 50

2.13 Cálculos De La Conductividad Mediante La Subdivisión De Las Secciones Transversales……. 53
2.14 Composición Del Coeficiente De Manning Para El Canal Principal……. 56
2.15 Evaluación De La Carga Media De Energía Cinética……. 58

2.16 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA POR FRICCIÓN……. 61

2.17 Procedimiento De Cálculo……. 63

2.18 Determinación De La Profundidad Crítica……... 67

2.19 Aplicaciones De La Ecuación De Momentum……. 72

2.20 Limitaciones Del Programa En Flujo Permanente……. 77

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO 81

3.1 Tipo de Investigación…….. 81

3.2 Diseño de Investigación……. 82

3.3 Población y Muestra……. 83

3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos…….. 84

3.5 Criterios de Selección del Sitio de Muestro……. 89

3.6 Fases de la Investigación……. 89

3.7 Fase Diagnóstico……. 90

3.8 Fase de Recolección de Datos……. 90

3.8.1 Cartas Topográficas…….. 91
3.8.2 Uso de la tierra y tipo de suelo……. 92
3.8.3 Información Hidrológica……. 92

3.9 Fase de Procesamiento de Datos……. 93

3.10 Análisis de Resultados…….. 94

3.11 Procesamiento con Hec-Geohms……. 95

3.12 Trabajo en Arcgis 10…….. 96

3.12.1 Creación de un proyecto en ArcGIS 10…….. 96
3.12.2 Extensiones……. 98
3.12.3 Agregar Barras de Herramientas al menú principal…. 99
3.12.4 Carga de archivos para la generación del MDT……. 100
3.12.5 Asignar un sistema de coordenadas…….. 101
3.12.6 Crear un Archivo de Forma (Shape File)……. 102
3.12.7 Añadir Datos (Add Data)……. 103
3.12.8 Crear una triangulación de Redes Irregulares (Triangular Irregular Networks – TIN)…….. 105
3.12.9 Crear un TIN desde un archivo de Características (Create TIN from Features)……. 106
3.12.10 Convertir un TIN a un archivo Raster (Convert Tin to Raster)…….. 108

3.13 Preprocesamiento del Terreno (Terrain Preprocessing)…….. 110

3.13.1 Características y Funcionalidad…….. 111
3.13.2 Gestión de Datos……... 112
3.13.3 Terrain Reconditioning (Reacondicionamiento del terreno)…….. 114
3.13.4 Build Walls (Construcción de Muros)…….. 118
3.13.5 Relleno de Depresiones (Fill Sink)…….. 120
3.13.6 Direccionamiento del flujo (Flow Direction)……. 123
3.13.7 Acumulación del flujo (Flow Accumulation)……... 125
3.13.8 Definición de corrientes (Stream Definition)……. 126

3.13.9 Segmentación de corrientes (Stream Segmentation).. 128
3.13.10 Delimitación de subcuencas (Catchment Grid Delineation)…….. 130
3.13.11 Procesamiento de los polígonos de la cuenca (Catchment Polygon Processing)……. 132
3.13.12 Procesamiento de los segmentos de corrientes (Drainage Line Processing)……... 134

3.14 Arranque de Proyectos en Hms (Hms Project Setup)…….. 135

3.14.1 Inicio de un nuevo proyecto (Start New Project)……. 137
3.14.2 Generación del proyecto (Generate Project)……. 139

3.15 Proyectos Generados……. 140

3.16 Procesamiento de la Cuenca (Basin Processing)…….. 144

3.16.1 Unión de Cuencas (Basin Merge)……... 144
3.16.2 Reglas para la unión de cuencas……. 145
3.16.3 Subdivisión de Subcuencas……. 146
3.16.3.1 Método 1: División de una cuenca con una corriente existente..... 146
3.16.3.2 Método 2: División de una cuenca con cuando no existe una corriente……. 146
3.16.4 Unión de ríos (River Merge)……. 147

3.17 Características de la Cuenca (Basin Caracteristics)……. 148

3.17.1 Longitud de ríos (River Length)……... 149
3.17.2 Pendiente de ríos (River Slope)……. 150
3.17.3 Pendiente de la cuenca (Basin Slope)……. 152
3.17.4 Longitud del tributario más largo (Longest Flow Path). 154
3.17.5 Centroide de las subcuencas (Basin Centroid)……. 156
3.17.6 Elevación del centroide (Centroid Elevation)……. 157
3.17.7 Ruta de flujo centroidal (Centroidal Flow Path)……. 159

3.18 Estimación de Parámetros Hidrológicos…….. 161

3.18.1 Selección de los procesos HMS (Select HMS Processes)……. 162
3.18.2 Dar nombre automáticamente a los ríos (River Auto Name)……. 164
3.18.3 Dar nombre automáticamente a las subcuencas (Basin Auto Name)…….. 165
3.18.4 Procesamiento de las celdas en archivos formato

Grid (Grid Cell Processing)……. 167
3.18.5 Parámetros de la subcuenca desde un archivo Raster. (Subbasin Parameters from Raster)…….. 171

3.19 Estimación del Número de Curva para la Subcuenca…….. 172

3.19.1 Procesamiento del tipo de suelo……. 173
3.19.2 Unión de la bases de datos para suelos y creación del uso de la tierra……. 173
3.19.3 Combinación del uso de la tierra y tipo de suelos con la tabla de búsqueda del Número de Curva……. 174
3.19.4 Conversión del Tema de Polígonos del Número de Curva a un tema de Número de Curva en cuadrículas (Grid). 176
3.19.5 Uso del tema en cuadrículas del Número de Curvas.. 177

3.20 Método Cálculo del Tiempo de Retardo de la Cuenca Basado en el Número de Curva (Cn Lag Method)……. 178

3.21 Trabajo En Hec-Hms…….. 179

3.21.1 Pantalla del programa……... 179
3.21.2 Configuración Inicial…….. 180
3.21.3 Ingreso de datos compartidos……. 181

3.22 Edición de Parámetros de la Cuenca…….. 183

3.22.1 Modelo de Cuenca……. 183
3.22.2 Menú de Parámetros……. 184

3.23 Edición de Series de Tiempo……. 190

3.23.1 Pluviómetros…….. 190
3.23.2 Descarga……. 195

3.24 Modelo Meteorológico……. 199

3.25 Especificaciones de Control…….. 200

3.26 Simulacion Hidrologica…….. 201

3.26.1 Creación de la corrida de simulación……. 202

3.27 Resultados de la Corrida de Simulación……. 205

3.27.1 Tabla Resumen global…….. 205

3.27.2 Resultados de Elementos Individuales…….. 206

3.28 Preprocesamiento con Hec-Georas…….. 211

3.28.1 Creación de las Capas RAS (Create RAS layers)…… 212
3.28.2 Eje Central de la corriente (Stream Centerline)…… 213
3.28.3 Creación de líneas que permiten medir la distancia recorrida por el flujo en los márgenes del cauce del río (FLOW PATH CENTERLINES)…….. 217
3.28.4 Creación de las líneas de corte de las secciones transversales (CROSS-SECTIONAL CUT LINES)……. 218

3.29 Configuración de Capas (Layer Setup)…….. 220

3.30 Atributos del Eje Central de la Corriente…….. 223

3.30.1 Topología (Topology)…….. 223
3.30.2 Longitud y Estaciones del Eje central de la corriente (Length/Stations)…….. 224
3.30.3 Elevaciones (Elevations)…….. 225

3.31 Atributos de las Líneas de Corte de las Secciones Transversales (Xs Cut Line Attributes)…….. 226

3.31.1 Nombres de los rios y tramos (River/Reach Names)... 227
3.31.2 Estaciones (Stationing)…….. 228
3.31.3 Longitud de los tramos hasta la salida de la cuenca (Downsrtream Reach Lengths)…….. 229
3.31.4 Elevaciones (Elevations)…….. 229

3.32 Exportar Datos (Export Ras Data)…….. 230

3.33 Trabajo En Hec-Ras…….. 232

3.33.1 Creación del proyecto…….. 234
3.33.2 Edición de los Datos Geométricos…….. 235
3.33.3 Importación del archivo de datos Geométricos……. 236

3.34 Completación de los Datos para las Secciones Transversales…….. 237

3.34.1 Asignación de los números de Manning……. 238
3.34.2 N de Manning…….. 239
3.34.3 Coeficientes de Contracción y Expansión……. 240

3.35 Edición de los Datos de Flujo……. 241

3.36 Ejecución de la Corrida del Flujo Estable……. 245

3.37 Desarrollo del Archivo de Exportación hacia Hec-Georas….. 248

3.38 Procesamiento del Archivo de Exportacion Ras2gis desde Hec-Georas…….. 251

3.38.1 Leer el archivo de exportación ras2gis en hec-georas 252
3.38.2 Configuración de las capas para el postprocesamiento (layer setup)…….. 253
3.38.3 Importar los Datos RAS (Import RAS Data)…….. 255

3.39 Procesamiento de los Resultados de Ras…….. 258

3.39.1 Resultados de Inundación……. 258
3.39.1.1 Generación de las Superficies de Agua (Water Surface Generation)…….. 259
3.39.1.2 Delimitación de la Planicie de Inundación (Floodplain Delineation)……. 261
3.39.2 Resultados de Velocidad de flujo (Velocity)…….. 263
3.39.3 Resultados de La Fricción en el Lecho del Canal (Shear Stress)……. 265
3.39.4 Resultados de la Energía del Flujo (Stream Power)…….. 267

CAPITULO IV: RESULTADOS 271

4.1 Descripción de las Características del Proceso Lluvia-Escorrentía mediante la obtención de datos de la Red de Estaciones de Monitoreo Hidromteorológica de la Cuenca del Rio Unare…….. 271

4.1.1 Lluvia……. 271
4.1.1.1 Descripción de las series de tiempo de las lluvias medias mensuales…….. 271
4.1.1.2 Eventos de lluvia aislados observados……. 282
4.1.1.3 Descripción de eventos de lluvia aislados sintéticos.. 283
4.1.2 Escorrentía……. 286
4.1.2.1 Descripción de hidrogramas observados……. 286

4.2 Calibrar Modelos Del Proceso Lluvia-Escorrentía Adaptados A La Cuenca Del Rio Unare…….. 288

4.2.1 Variable de entrada…….. 288

4.2.2 Variable de salida…….. 289

4.3 Cuenca Seleccionada…….. 290

4.3.1 Modelo Basado en Procesos Físicos 1 (MBPF1)……. 291
4.3.2 Modelo Basado en Procesos Físicos 2 (MBPF2)…….. 297
4.3.3 Modelo Basado en Procesos Físicos 3 (MBPF3)…….. 304

4.4 Simular El Proceso Lluvia-Escorrentía En La Cuenca Del Río Unare…….. 315

4.4.1 Modelo Seleccionado…….. 318
4.4.2 Zonificación de planicies Inundables…… 320

4.5 Comparar Modelos Del Proceso Lluvia-Escorrentía Adaptados A La Cuenca Del Río Unare…….. 326

4.6 Validar Modelos Del Proceso Lluvia-Escorrentía Adaptados A La Cuenca Del Río Unare…….. 336

CONCLUSIONES…….. 341

RECOMENDACIONES…….. 345

BIBLIOGRAFIA…….. 347

APENDICES

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años a nivel mundial se han suscitado frecuentes desastres por fenómenos naturales tales como deslizamientos, inundaciones, movimientos de masa entre otras, ocasionando pérdidas humanas y económicas que afectan seriamente las áreas sociales como salud, vivienda, educación entre otros.

Venezuela está sufriendo un estado de alerta de vulnerabilidad y riesgo ante desastres naturales, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 1994) la magnitud y la severidad del impacto de las inundaciones y deslizamientos en Venezuela evidencia no sólo la fragilidad ambiental, económica y social de la zona afectada sino que la magnitud y frecuencia de este tipo de eventos parecería incrementarse en años recientes.

El estudio de los modelos matemáticos de pronóstico de lluvia-escorrentía, son de gran importancia puesto que se utilizan para obtener el comportamiento del proceso de escurrimiento de los efluentes pertenecientes

a una cuenca, con el propósito de regularizar el uso del agua y darle solución a problemas de ingeniería, ambientales y socio-económicos.

Dado que usualmente no se dispone de toda la información sobre el estado de las aguas, así como el conocimiento de la relación entre el agua y las condiciones socioeconómicas de los habitantes y usuarios de agua de una cuenca, este conocimiento se deberá obtener en un proceso progresivo que incluya la recopilación de datos cuantitativos para controlar y evaluar la incidencia del sistema de gestión de la cuenca sobre el estado y los usos del agua. Para ello se establecerán normas y especificaciones de procesamiento de información que uniformicen y faciliten su uso, de preferencia, capaces de ser vertidos a sistemas de información geográfica. (CEPAL 1999)

La responsabilidad que significa la planificación, diseño y construcción de obras civiles como complejos habitacionales, edificios, sistemas viales entre otros, en zonas susceptibles a eventos de crecidas, recae directamente en la confiabilidad de los parámetros e instrumentos que se utilizan para predecir dichos eventos.

Por lo que se propone estudiar los datos de precipitación y caudal de las estaciones de monitoreo pertenecientes a la cuenca del río Unare, con el fin de calibrar, comparar, validar y simular modelos de proceso lluvia-escorrentía en pro de obtener mapas de planicies inundables que

proporcionan información acerca del comportamiento del cauce de los ríos cuando ocurren eventos extremos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Con qué fin se desea comprobar la validez de los modelos de estimación del proceso lluvia-escorrentía?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.3.1 Objetivo General

Validar modelos de estimación del proceso lluvia-escorrentía. Caso: cuenca del rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Describir las características del proceso lluvia-escorrentía mediante obtención de datos de las red de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas de la cuenca del rio Unare.

2. Calibrar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del rio Unare

3. Simular el proceso lluvia-escorrentía en la cuenca de río Unare.

4. Comparar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca de río Unare.

5. Validar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del río Unare.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación se pretende proporcionar a la comunidad que habita la cuenca del rio Unare; incluyendo habitantes e instituciones como Protección Civil y el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, entre otros; la intensidad, duración y frecuencia en las que ocurren los eventos hidrológicos de lluvia y escorrentía. El propósito es prevenir situaciones de emergencia, en particular en la estación lluviosa; donde existe mayor vulnerabilidad a la ocurrencia de inundaciones; generando pérdidas de vidas y bienes.

De igual modo esta investigación contribuirá a generar una base de datos que permita construir modelos de pronóstico de lluvia-escorrentía. Este

conocimiento permitirá que el personal técnico de las instituciones competentes puedan tomar decisiones operativas mediante las cuales prevengan eventos catastróficos; las cuales incluyan construcción de diques de contención de inundaciones, implementación de sistemas de alerta temprana, entre otros.

Este estudio significará una fuente de consulta para el desarrollo de futuras investigaciones que sean realizadas en otras zonas del país o en medios de transporte análogos como ríos. Así como contribuirá a ampliar la información disponible para evaluación de modelos matemáticos considerados en las asignaturas del área de Ingeniería Ambiental.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

- La investigación comprenderá la caracterización de los parámetros hidrológicos lluvia escorrentía de la zona en estudio, además de las variaciones de caudal presente en el río.

- Los datos obtenidos abarcarán las distintas alteraciones del clima.

- Se logrará incrementar el conocimiento que se tiene en los Estados Guárico y Anzoátegui acerca de los parámetros hidrológicos lluvia escorrentía de la cuenca del río Unare.

- El alcance de este estudio está restringido por las limitaciones de cantidad de información disponible, adicionalmente hay que apuntar que se enfrentarán limitaciones de tiempo y de recursos para el transporte debido a la lejanía del sitio de estudio, además de ser un equipo de trabajo reducido. Sin embargo, dado que estas limitaciones son las mismas que se comparten en la región se emplearán creativamente los recursos y la información disponible.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los antecedentes y las bases teóricas de la investigación. Los antecedentes abarcan aquellos trabajos que se han llevado a cabo con el uso de los programas HEC en Venezuela y a nivel mundial, así como también se presentarán los modelos matemáticos en los cuales se fundamentan los programas utilizados para la elaboración de este estudio.

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La lluvia y la escorrentía son parámetros importantes para el cumplimiento del ciclo hidrológico, su estudio es primordial para determinar diversos aspectos relacionados con el comportamiento de la cuenca como lo es el caudal existente en la misma y así tomar medidas para garantizar el desarrollo del ecosistema, es por ello que se requieren hacer referencia a análisis y trabajos relacionados con este tema, a continuación se describen resúmenes de investigaciones realizadas sobre los parámetros lluvia escorrentía ,las cuales servirán de sustento tanto para la metodología

empleada o como para el desarrollo técnico de este trabajo especial de Grado.

Carvajal y Roldán (2007). El trabajo muestra la calidad del modelo lluvia-escorrentía GR4J en 8 subcuencas de la cuenca del rio Ubarrá. La calibración incluye la optimización de los parámetros. La calidad del ajuste se verificó comparando la serie simulada de caudales y el respectivo registro, la cuervas de duración de caudales, así como mediante 4 criterios de eficiencia. Los resultados muestran en general ajustes aceptables, si se tiene en cuenta la variabilidad del área de las subcuencas, de la precipitación y de la evaporación, y el efecto de la zona urbana en cuanto al aporte de caudales de aguas residuales. Este trabajo proporcionó información teórica para la calibración de los modelos de lluvia-escorrentía.

Rojas, (2005). Se realizó una evaluación preliminar del modelo HEC-HMS, con la finalidad de verificar las bondades del mismo en simular hidrogramas medidos, eventos máximos anuales y extremos. La evaluación se realizó en tres fases: a) con eventos medidos en cuencas experimentales, b) con eventos máximos anuales de cuencas Venezolanas y c) con eventos extremos de cuencas venezolanas. Los resultados iniciales indican que el modelo simula satisfactoriamente los eventos medidos. Para el caso de las cuencas venezolanas, las simulaciones realizadas con eventos sintetizados, indican que el modelo se comporta muy bien para estos casos. Este trabajo nos sirve para tener datos de referencia acerca del comportamiento de las cuencas en Venezuela.

- **Estudios realizados de aplicación de los programas HEC en diferentes partes del mundo y en nuestro país**

El HEC-HMS ha sido empleado de la siguiente manera:

M. Palencia y A. Machado (2005) realizaron una investigación que utilizó el software HEC-HMS para simular las crecientes de distinto período de retorno que se generan en la confluencia de los ríos Canoabo y Temerla y efectuar el tránsito de la creciente superpuesta hasta el Dique Toma, lugar donde se contaba con crecientes conocidas a partir de las cuales se efectuó la simulación, estas crecientes serán usadas como datos de entrada en el HEC-RAS. La modelación hidrológica para simular los procesos de la precipitación-escurrimiento se realizó mediante la aplicación del método del SCS y así generar las crecientes, dichas crecientes se transitaron desde la confluencia hasta el Dique-Toma "José Laurencio Silva" empleando el modelo de Muskingum. Una vez obtenidas las crecientes, éstas fueron comparadas con las propuestas por el estudio de HIDROCENTRO.

Cordero, M.; Crecente, R., y Cancela, J. (1999) adscritos a la Escuela Politécnica Superior, Campus Universitario s/n, Lugo, España, realizaron un estudio en la cuenca alta del río Tea. O Covelo (Pontevedra), este río se encuentra ubicado en el Municipio de O Covelo (Pontevedra) Galicia- España. Los objetivos del estudio fueron evaluar los impactos y los campos donde se debía actuar para proteger el cauce y su cuenca

alimentadora que presenta fuertes pendientes y una elevadísima pluviosidad (hasta 3000 mm) por lo que el tramo alto de la cuenca presenta características torrenciales. El estudio hidrológico se dividió en tres apartados; Estudio de avenidas en el cauce del río Tea: obtención de caudales y niveles; alcanzados para distintos períodos de retorno con los programas HEC-HMS (antiguo HEC-1) (HEC 1990) y HEC-RAS (antiguo HEC-2) (BRUNNER, G.W.1997). Estudio de la evolución del riesgo de erosión mediante la USLE (WISCHMEIER, W.H. y SMITH, D.D. 1978). Estudio del impacto de la red de pistas en la red de drenaje natural: mediante la extensión Hidrology Modeling del GIS ArcView GIS.3.2 se calculó la red fina de drenaje natural de la cuenca y su interacción con la red de pistas. Simultáneamente por un estudio de campo se analizaron los factores más importantes en la destrucción por erosión de las pistas y las formas de evitarlo, se ejecutaron obras de caminos rurales en tres zonas de Concentración Parcelaria.

J. Velázquez (1998), profesor adscrito al Centro de Investigaciones en Desarrollo Sostenible y a la Universidad de Costa Rica, realizó un estudio con el objetivo de analizar los efectos que la expansión urbana ha generado sobre la hidrología de las cuencas urbanas de la ciudad de San José, con el fin de identificar zonas de riesgo y dar recomendaciones de ordenamiento territorial en torno a la mitigación y prevención de este problema. El análisis se dividió a su vez en dos grandes áreas: el análisis de la expansión urbana

y la evaluación hidrológica. Para la primera, se derivaron mapas de cobertura urbana para distintos años dentro del período de estudio, mediante interpretación de imágenes Landsat TM. Para la segunda, se analizó la respuesta hidrológica, con la cual se identificaron las características del proceso de precipitación-escorrentía, el cual es en gran medida, el responsable de las inundaciones. El modelo de simulación empleado fue el HEC-HMS, utilizando como parámetros de calibración el *número de curva* y las abstracciones iniciales, y utilizando el modelo de *Hidrograma Unitario* para asignar las características temporales de la respuesta hidrológica. Finalmente, se realizaron estimaciones de caudal para eventos probables de precipitación, se recopiló información histórica de inundaciones y se identificaron las causas de estos eventos y las zonas más vulnerables.

El uso de HEC-GeoHMS se ha reseñado de la siguiente manera:

V., Ponce (1994), realizó un estudio para analizar las condiciones hidrológicas de la cuenca del Arroyo Alamar, determinar la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de los escurrimientos, así como calcular la avenida de diseño correspondiente a la llamada "cuenca libre." Con el objeto de definir el gasto de diseño más apropiado para utilizar en la demarcación de las zonas federales en el Arroyo Alamar, donde se empleo el programa HEC-GeoHMS.

Con respecto a las investigaciones realizadas que guardan relación con el uso del software HEC-RAS, se tiene que:

V. Obregón, I. Saavedra y M. Nava (2005), realizaron la evaluación del flujo de agua superficial y subterránea en la Ciudad Universitaria de Caracas, esto debido a que se ha venido apreciando una serie de fallas en las edificaciones, las cuales han motivado a las autoridades responsables de la conservación y preservación de este patrimonio mundial a la caracterización del acuífero existente. Para esto se hace imperativa la obtención de una serie de datos reales correspondientes a diversos parámetros hidrológicos, hidráulicos y geológicos que permitan la aplicación de un modelo de simulación de flujo, mediante el estudio de la sensibilidad por el Modelo Unidimensional HEC-RAS, específicamente aplicado en el sector piloto, a los diferentes parámetros y condiciones de borde que se especifican en la data de entrada, permitiendo la estimación de las profundidades para los gastos máximos de diversas crecientes (TR= 2.33 ,5, 10, 25, 100, 500 años) y la mancha de inundación producida por ellas, complementando este estudio con el Modelo Bidimensional FLO-2D.

E. Chavarri (1999), adscrito a la Universidad Nacional Agraria La Molina - Perú, llevó a cabo una aplicación del HEC-RAS para obtener los perfiles hidráulicos para diversos caudales de crecidas, en el estudio río Tumbes desde la Estación Puerto El Cura hasta 900.0 m aproximadamente aguas abajo del Puente Tumbes. Después de los eventos ocurridos por el

fenómeno El Niño-98, la configuración del río varió considerablemente por lo que fue necesario este tipo de estudios para que acompañados de otros como el estudio del transporte de sedimentos, se pudiera realizar la planificación hidráulica del río. Las principales partes del estudio consistieron en la revisión hidrológica de la información hidrometeorológica así como el procesamiento de la información topográfica. La ejecución del programa HEC-RAS, consideró subcrítico el régimen hidráulico del río, la simulación del perfil de flujo del evento ocurrido 09-02-98 tuvo como finalidad calibrar los cálculos que realiza el cálculo del programa. Sin embargo al realizar la simulación respectiva los resultados no concuerdan con lo observado en el Puente Tumbes, esto debido a la escasez de precisión de los datos de entrada al programa y a la sobrestimación de los caudales máximos extraídos de la información hidrológica.

Algunos ejemplos del uso de HEC-GeoRAS en el mundo, son:

El proyecto Hydraulic Modeling of the Salt River, Arizona, donde se estudió el impacto de las alternativas de restauración del ecosistema y los efectos asociados a los daños por inundación para el área en estudio.

2.2 BASES TEÓRICAS

Las bases teóricas que serán presentadas están fundamentadas en los modelos matemáticos usados para este estudio que administran los

programas HEC. Se iniciará con los modelos usados por los programas HEC-GeoHMS y HMS, para luego finalizar con detalles de la modelación HEC-RAS

2.3 MODELACIÓN CON HEC-GEOHMS Y HMS

La modelación con HEC-GeoHMS y HEC-HMS está relacionada ya que HEC-GeoHMS genera archivos de importación de las características físicas, tales como delimitación de subcuencas, longitud de ríos, áreas de las subcuencas, pendientes de ríos, pendientes de subcuencas, y también parámetros hidrológicos para la aplicación de los modelos matemáticos en HEC-HMS; para determinar pérdidas por infiltración, escorrentía superficial, flujo base, tránsito de crecientes a lo largo de ríos

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA UNIDAD HIDROLÓGICA

Las características físicas que serán descritas para la cuenca y el río que genera GeoHMS son las siguientes:

- Longitud del flujo superficial.
- Longitud de las corrientes.
- Pendiente del canal.

- Longitud al centroide.
- Centroide de la cuenca.

2.4.1 Longitud del flujo superficial

Es la longitud del recorrido del flujo no canalizado desde un punto sobre la divisoria del drenaje hasta un punto del cauce adyacente, proyectado sobre la horizontal.

2.4.2 Longitud de las corrientes

Para obtener la longitud media del cauce de orden u, se divide la longitud total por el número de segmentos N_u de ese orden. La longitud promedio de un segmento de cauce de orden u es una propiedad dimensional reveladora del tamaño característico de los componentes de una red de drenaje y de las superficies de sus cuencas contribuyentes.

2.4.3 Pendiente del canal

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales. A mayor pendiente mayor velocidad. Los perfiles típicos de los cauces naturales son cóncavos hacia arriba; además, todas las cuencas, exceptuando las más pequeñas, tienen varios

canales cada uno con un perfil diferente. Es por esta razón que definir la pendiente promedio de un cauce en una cuenca es muy difícil.

2.4.4 Longitud al centroide

Es la distancia siguiendo el cauce desde el punto más bajo hasta el centro de gravedad de la cuenca, definido este último con un punto ubicado en el cauce principal.

2.4.5 Centroide de la cuenca

La localización del centroide de la cuenca puede ser estimada de cuatro maneras. El enfoque de ingeniería para la localización del centroide con cálculo del momento alrededor de los ejes X y Y no es implementada aquí, porque el centroide puede estar fuera de la cuenca en el caso de cuencas en forma de U o de cuencas con formas extrañas. Los cuatros métodos usados por GeoHMS para aproximar la ubicación del centroide son; Rectángulo circunscrito, la elipse, el canal de flujo y el especificado por el usuario.

- **Cuadro Circunscrito**: El método de cuadro circunscrito, circunscribe una subcuenca dentro de un rectángulo y aproxima el centroide como el centro del cuadro. Este método funciona bastante rápido pero puede no ser aplicable a muchas formas de cuenca.

- **Método de la Elipse:** El método de la elipse circunscribe una subcuenca dentro de una elipse y aproxima el centroide como el centro de la elipse. Este método es más lento que el del cuadro circunscrito pero generalmente produce mejores estimados de los centroides de la cuenca. Este método solo funciona en subcuencas de 2.000.000 (dos millones) de celdas o menos.

- **Canal de Flujo**: El método de la canal de flujo dibuja la mayor longitud de flujo para la subcuenca y aproxima el centroide al punto medio en la corriente de mayor longitud

- **Localización del Centroide especificada por el usuario**: Cuando los tres métodos previos no producen estimados satisfactorios del centroide, el programa le permite al usuario mover el centroide a cualquier localización dentro de la subcuenca.

2.5 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA

A continuación se presentan los modelos matemáticos hidrológicos que hacen uso de los parámetros hidrológicos calculados por GeoHMS. Los modelos matemáticos hidrológicos involucrados son:

- Modelación de la precipitación para HEC-HMS

- Modelación del volumen de escurrimiento con HEC-HMS
- Modelación de la escorrentía directa con HEC-HMS
- Modelación del flujo base con HEC-HMS
- Modelación del tránsito en canales con HEC-HMS

2.5.1 Modelación de la precipitación para HEC-HMS

HEC-HMS ofrece tres alternativas de tormentas basadas en estándares:

1. Tormentas basadas en frecuencias
2. Tormentas de proyecto estándares; y
3. Alturas de tormentas definidas por el usuario y distribución temporal.

En este estudio se aplicaran las tormentas basadas en frecuencias debido a que se poseen datos para ello.

Tormentas hipotéticas basadas en Frecuencia en HEC-HMS: El objetivo de las tormentas hipotéticas basadas en las frecuencias incluidas en HEC-HMS es definir un evento para el cual la altura de precipitación para distintas duraciones dentro de la tormenta tiene una probabilidad de excedencia consistente. Para desarrollar las tormentas para HEC-HMS:

Uno de los puntos fundamentales para obtener un diagrama de cualquier periodo de retorno es ver cuál es la lluvia de diseño y cómo se reparte en el tiempo. Para ello hay varios métodos, en esta investigación sigue el método de bloques alternados **(Chow, Maidment, 1988),** dado su sencillez y su claro significado físico.

A continuación se resume cual es el proceso del mismo, que permite obtener la tormenta de proyecto en forma de una sucesión de bloques de igual duración donde en cada uno de ellos llueve distinto, dándose el valor máximo a mitad de la duración considerada:

Determinación de la duración de la lluvia: Por definición, la duración de la lluvia más desfavorable y que provoca mayor pico de caudal de hidrograma es la del tiempo de concentración, que es el momento a partir del cual toda la superficie de la cuenca aporta agua en nuestra sección de estudio. Si la duración es menor, hay parte de la superficie de la cuenca que no aporta agua, por lo que el pico de caudal será menor, y si la duración es mayor el pico es el mismo que cuando se toma como duración el tiempo de concentración de la cuenca, ya que la superficie de agua es la misma, no aumenta.

Determinación de los intervalos de lluvia: Ésta se toma de manera que se

obtengan entre 10 y 30 bloques de lluvia en la tormenta de proyecto, logrando una aproximación más a 20, cuanto mayor sea el tiempo de concentración.

Deducción de los valores de intensidad de precipitación:

Para cada una de las duraciones acumuladas de los intervalos considerados. La intensidad de precipitación se determina mediante el modelo empírico determinado para la cuenca del Rio Unare sobre la base de los registros pluviográficos de 29 estaciones, (Rojas, 2012) ha encontrado el modelo de la Ecuación 2.1, para estimar la curva de Intensidad – Duración – Frecuencia:

$$\mathrm{I} = \frac{54.22 \times \mathrm{T}^{0.3677}}{(\mathrm{D}+0.6243)^{1.1635}} \ (R = 2\ a\tilde{n}os) \qquad (2.1)$$

Donde, I es la intensidad máxima para un determinado período de retorno T en mm/hora y D es la duración de la tormenta en mm/hora.

Obtención de la profundidad máxima de precipitación acumulada Como el producto de la intensidad calculada por su duración correspondiente.

Bloques Alternos: Se calcula la profundidad que le corresponde a cada uno de los bloques considerados desacumulando los valores obtenidos en el

punto anterior, estos últimos valores de lluvia a intensidad se reducen dividiendo por la duración del intervalo de lluvia entre las horas para tener mm/h.

Finalmente se ordenaron los bloques de manera que el mayor valor quede en el centro, y los siguientes alternativamente a derecha e izquierda del central.

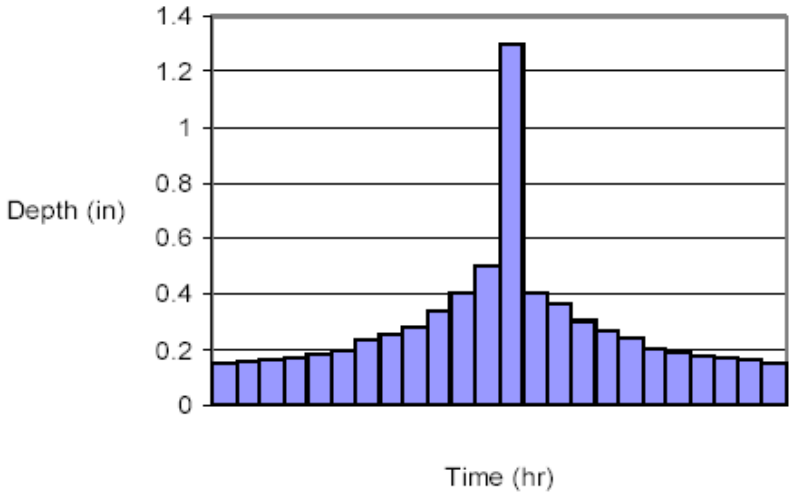


***Figura 1*. Tormenta de diseño. Método de bloques alternos**

2.5.2 Modelación del volumen de escurrimiento con HEC-HMS

HEC-HMS considera que el terreno y el agua en una cuenca se pueden clasificar como sigue:

- Superficie impermeable
- Superficie permeable

La superficie impermeable en la cuenca, es la parte de la cuenca a través de la cual escurre toda la precipitación si no hay infiltración, evaporación, u otros volúmenes de pérdidas. La superficie permeable está sujeta a pérdidas. HEC-HMS involucra los siguientes modelos de alternativas para la determinación de las pérdidas acumuladas:

- Modelo de pérdidas iniciales
- Modelo transformación de lluvia a escorrentía
- Modelo de tránsito
- Modelo de recesión de flujo

Con cada modelo, las pérdidas de la precipitación se encuentran para cada intervalo de tiempo, y se restan de la altura de la precipitación total para ese intervalo. La altura remanente se refiere al exceso de la precipitación. Esta altura se considera uniformemente distribuida sobre toda el área de la cuenca, de manera que representa el volumen de escurrimiento.

Modelo de pérdidas del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos: El modelo de Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) estima el exceso de precipitación como una función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, uso de la tierra, y humedad antecedente, mediante el uso de la Ecuación 2.2:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad (2.2)$$

Donde:

P_e: Exceso de precipitación acumulada en el tiempo.

P: Altura de lluvia acumulada en el tiempo.

I_a: Abstracción inicial (pérdida inicial).

S: Retención máxima potencial, una medida de la capacidad de la cuenca para abstraer y retener la precipitación de la tormenta. Hasta que la lluvia acumulada exceda a la abstracción inicial, el exceso de precipitación y en consecuencia el escurrimiento, serán nulos.

A partir del análisis de los resultados de muchas cuencas pequeñas, el SCS desarrolló relaciones empíricas de I_a y S que se según la Ecuación 2.3:

$$I_a = 0.2S \qquad (2.3)$$

Por otro lado, el exceso acumulado en el tiempo t es:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \qquad (2.4)$$

El exceso incremental para un intervalo de tiempo se calcula como la diferencia entre el exceso acumulado y el final y el comienzo del período.

La retención máxima, S, y las características de la cuenca se relacionan mediante parámetros intermedios, el número de curva (abreviado en ingles como CN) interviene como en la Ecuación 2.5:

$$S = \begin{cases} \dfrac{1000 - 10CN}{CN} & Sistema \quad Inglés \\ \dfrac{25400 - 254CN}{CN} & SI \end{cases} \qquad (2.5)$$

El rango de valores de CN va desde 100 (para cuerpos de agua) hasta aproximadamente 30 para suelos permeables con alta velocidad de infiltración.

Estimación del número de curva de escorrentía, CN: Con la precipitación P, y el número de curva de escorrentía CN, la escorrentía P_e, puede ser determinada por la Ecuación 2.6 y 2.7. Para cuencas sin mediciones de caudal, tablas de número de curva de escorrentía CN para varias coberturas complejas hidrológicas del suelo se encuentran ampliamente disponibles.

Las coberturas complejas hidrológicas de suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial, y las condiciones de humedad antecedentes. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una cuenca. El grupo

hidrológico de suelos describe el tipo de suelo. El uso y tratamiento del suelo describe el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para aumentar o impedir la escorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una medida de la cantidad almacenada por la cuenca.

Clasificación hidrológica de los suelos: Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planeamiento de cuencas; para la estimación de escorrentía a partir de la precipitación. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos, A, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

A. (Bajo potencial de escorrentía).Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas bien o excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta transmisión de agua.

B. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C. (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 – 100cm).

D. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial, suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcali y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lenta.

Condición de humedad antecedente: El método del número de curva de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta; la condición de humedad antecedente seca; la condición de humedad antecedente normal y la condición de humedad antecedente húmeda.

Condición I: (Suelo Seco). Es el caso en que los suelos se secan sin perder la cohesión; o sea, cuando se puede arar o cultivar en buenas condiciones (lámina 0-35mm).

Condición II: (Suelo Normal). Es el caso medio para crecidas anuales, es decir, las condiciones medias existentes que produjera la máxima crecida anual en dichas cuencas (lámina 35- 50mm).

Condición III (Suelo Húmedo). Cuando en los 5 días anteriores a al tormenta dada, se han producido lluvias fuertes o lluvias tenues con bajas temperaturas y el suelo esta casi saturado (lámina mayor a 50mm).

La relación entre la precipitación y el escurrimiento para estas tres condiciones se expresa mediante un determinado numero de curva, que depende de la condición de humedad antecedente, de la clasificación de los suelos según sus características hidrológicas (indicador de infiltración), de la condición hidrológica (indicador de la cobertura vegetal) y de los usos de la tierra.

Usos y tratamiento del suelo: El uso de la cuenca tiene efecto sobre la respuesta de la cuenca a los fenómenos hidrometeorológicos. A medida que se deforesta una cuenca aumentan los picos de crecidas y baja el caudal de esquiaje (caudal mínimo del río, a partir del cual se midan las crecidas).

Dependiendo de la clasificación de los suelos, uso de la tierra, tratamiento o práctica y de la condición hidrológica, se determina el número de curva a la condición II de humedad antecedente ya que ésta es representativa de la condición del suelo.

Los valores de CN para las condiciones I y III se estiman mediante las ecuaciones:

$$CNI = \frac{4.2CNII}{10 - 0.058CNII} \qquad (2.6)$$

$$CNIII = \frac{23CNII}{10 - 0.13CNII} \qquad (2.7)$$

Donde:

CN I: Condición de humedad antecedente seca.

CN II: Condición de humedad antecedente normal.

CN III: Condición de humedad antecedente húmeda.

El CN de una cuenca se puede estimar como una función del uso de la tierra, tipo de suelo, y humedad antecedente de la cuenca, con el uso de las tablas publicadas por el SCS. Por conveniencia, se incluyen las tablas de CN desarrolladas por el SCS y publicadas en el Reporte Técnico 55 (comúnmente referenciado como TR-55). Con estas tablas y conociendo el tipo de suelo y el uso de la tierra, se encuentra un valor único de CN. Las diversas tablas referentes a la selección del CN se encuentran en el Apéndice H de este estudio.

Para una cuenca formada por varios tipos de suelo y usos de la tierra, un CN ponderado se calcula mediante la Ecuación 2.7:

$$CN_{pondreado} = \frac{\sum A_i CN_i}{CN_i} \qquad (2.7)$$

Donde:

$CN_{ponderado}$: Numero de Curva ponderado para calcular el volumen de escurrimiento.

I: Índice de subdivisiones de la cuenca para tipo de suelo y uso de la tierra

CN_i: Número de Curva para la subdivisión i.

A_i: Área de drenaje de la subdivisión i.

Los usuarios del modelo SCS como se implementa en HEC-HMS deberían notar que las tablas incluyen un CN ponderado para distritos urbanos, distritos residenciales, y áreas de clasificación reciente. Esto es, el CN que se muestra son valores compuestos para un área impermeable conectada directamente y espacios abiertos. Si se selecciona un CN para estos usos de la tierra, no se requiere la determinación del área impermeable no conectada en HEC-HMS.

2.5.3 Modelación de la escorrentía directa con HEC-HMS

En este punto se describen los modelos de interés para este estudio que simulan los procesos de escurrimiento directo del exceso de precipitación sobre la cuenca. HEC-HMS se refiere a estos procesos como “transformación” del exceso de precipitación en un punto de escurrimiento. Con HEC-HMS, existen dos opciones para métodos de transformación:

- **Modelos empíricos (se refieren a modelos teóricos de sistemas)**. Estos involucran modelo de hidrogramas unitarios (HU) tradicionales. Los modelos teóricos de sistemas buscan establecer un enlace casuístico, entre el exceso de precipitación y el escurrimiento sin considerar los detalles de los procesos internos. Las ecuaciones y los parámetros del modelo tienen significado físico limitado. Sin embargo, ellos han sido seleccionados atendiendo a criterios de optimización de bondad de ajuste.

- **Modelo conceptua**l. El modelo conceptual incluido en HEC-HMS es el modelo de onda cinemática de flujo superficial. Este representa, en su mayor extensión, todos los mecanismos físicos que gobiernan el movimiento del exceso de precipitación sobre la superficie de la tierra de la cuenca y pequeños canales colectores en la cuenca.

En este estudio se dispone de datos para utilizar los modelos empíricos del SCS y de Clark, es por ello que serán los detallados a continuación.

2.5.3.1 Modelo de HU del SCS

El Servicio de conservación de Suelos (SCS) propuso un modelo paramétrico de Hidrograma Unitario (HU). Este HU adimensional, el cual se muestra en la Figura 2-2, expresa el HU de descarga, U_t , como la relación de la descarga pico del HU, U_p, para cualquier tiempo t, una fracción de T_p, el tiempo al pico del HU.

Las investigaciones del SCS sugieren que el pico del HU y el tiempo al pico del HU se relacionan mediante la Ecuación 2.8:

$$U_p = C\frac{A}{T_p} \qquad (2.8)$$

En el cual A=área de la cuenca; y C= constante de conversión (2.08 en SI y 484 en el sistema libra-pie). El tiempo al pico (también se conoce como tiempo de incremento) se relaciona con la duración de la unidad de exceso de precipitación mediante la Ecuación 2.9:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \qquad (2.9)$$

Donde Δt=duración de la precipitación en exceso (el cual es un intervalo de cálculo en HEC-HMS); y t_{lag}=retardo de la cuenca, definido como el tiempo diferencia entre el centro de masa del exceso de lluvia y el pico del HU. [*Observe que para una definición adecuada de las ordenadas sobre la curva ascendente del HU del SCS, se debe usar un intervalo de cálculo, Δt, menor del 29% del t_{lag} (USACE,1998).]*

Cuando se especifica el tiempo de retardo, HEC-HMS resuelve la Ecuación 2.8 para encontrar el tiempo al pico del HU, y la Ecuación 2.9 para encontrar el pico del HU. Conocidos U_p y T_p, el HU se encuentra a partir del formato dimensional, el cual se incluye en HEC-HMS, por multiplicación

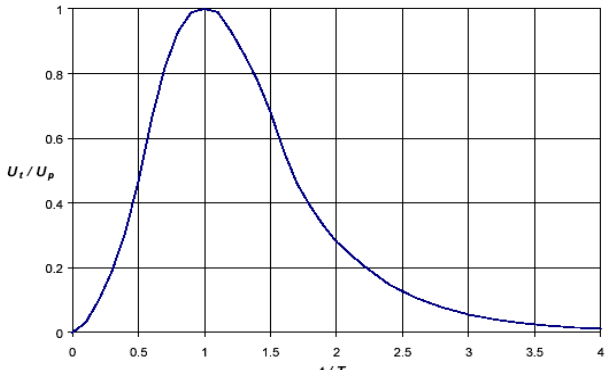


***Figura 2*. Hidrograma Unitario Adimensional del SCS**

Estimación de los parámetros del HU del SCS: Para cuencas sin medición, el SCS sugiere que el tiempo de retardo del HU se debe relacionar con el tiempo de concentración, t_C, con la Ecuación 2.10:

$$t_{lag} = 0.6 t_C \qquad (2.10)$$

El tiempo de concentración es un parámetro cuasi-físico que se puede estimar con la Ecuación 2.11:

$$t_C = t_{sheet} + t_{shalow} + t_{channel} \qquad (2.11)$$

Donde t_{sheet}=suma del tiempo de viaje en los tramos de flujo laminar sobre la superficie del terreno de la cuenca; $t_{shallow}$= suma del tiempo de viaje en tramos de flujo turbulento, partes bajas de la calles, cunetas, quebradas y arroyos; y $t_{channel}$= suma del tiempo de viaje en tramos del canal.

Identificar los canales abiertos donde la información de la sección transversal esté disponible. Obtener las secciones transversales de

levantamientos topográficos de campo, planos, o fotografías aéreas. Para estos canales, la velocidad se estima mediante la Ecuación de Manning (2.12):

$$V = \frac{CR^{2/3}S^{1/2}}{n} \qquad (2.12)$$

Donde V=velocidad promedio; R=radio hidráulico (definido como la relación del área de la sección transversal entre el perímetro mojado); S=pendiente de la línea de energía (con frecuencia se aproxima a la pendiente del lecho); y C=constante de conversión (1.00 para el SI y 1.49 para el sistema libra-pie). Los valores de n, los cuales comúnmente se conocen como coeficiente de rugosidad de Manning, se puede estimar de tablas de textos, tales como en Chaudhry (1993). Una vez que la velocidad en el canal se ha estimado, el tiempo de viaje en el canal se calcula con la Ecuación 2.13:

$$t_{channel} = \frac{L}{V} \qquad (2.13)$$

Donde L=longitud del canal

El flujo laminar es el flujo sobre la superficie de la tierra, antes de que el agua llegue al canal. Las distancias son cortas – en el orden de 10 – 100 metros (30 – 300 pie). El SCS sugiere que el tiempo de viajes del flujo laminar se puede estimar con la Ecuación 2.14:

$$t_{sheet} = \frac{0.0007(NL)^{0.8}}{(P_2)^{0.5} S^{0.4}} \qquad (2.14)$$

Donde N=coeficiente de rugosidad del flujo sobre la tierra; L= longitud del flujo; P_2=2 años, 24 horas de altura de lluvia, en pulgadas, y S=pendiente de la línea hidráulica, la cual se puede aproximar a la pendiente del terreno. (Esto se estima basado en la solución aproximada de las ecuaciones de onda – cinemática, las cuales se describen posteriormente en este capítulo). En el Apéndice I se encuentran tabulados los valores de N para varias superficies.

El flujo laminar generalmente se convierte en turbulento después de 100 metros. La velocidad promedio para el flujo en completa turbulencia se puede estimar como:

$$V = \begin{cases} 16.1345\sqrt{S} & para\ superficies\ sin\ pavimento \\ 20.3282\sqrt{S} & para\ superficies\ pavimentadas \end{cases} \qquad (2.15)$$

A partir de esto, el tiempo de viaje se estima con la Ecuación 2.13

2.5.3.2 Modelo del HU de Clark

El modelo de Clark genera un HU para una cuenca mediante

representación explicita de dos procesos críticos en la transformación del exceso de precipitación en escurrimiento.

- **Traslación** o movimiento del exceso desde el origen hacia el drenaje hacia la salida de la cuenca; y

- **Atenuación** o reducción de la magnitud de la descarga a medida que el exceso se almacena a lo largo de la cuenca

Conceptos Básicos y Ecuaciones: El almacenamiento del agua a través de la cuenca –en el suelo, sobre la superficie, y en los canales- juega un papel importante en la transformación del exceso de precipitación a escurrimiento. El modelo de embalse lineal es una representación común de los efectos de este almacenamiento. El modelo deriva de la ecuación de continuidad, Ecuación 2.16:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \qquad (2.16)$$

Donde dS/dt=velocidad de cambio en el tiempo del almacenamiento en el tiempo; I_t=caudal de entrada promedio para el almacenamiento en el tiempo t; y O_t=caudal de salida desde el almacenamiento en el tiempo t.

Con el modelo lineal del embalse, el almacenamiento en tiempo t se relaciona con el caudal de salida con la Ecuación 2.17:

$$S_t = RO_t \qquad (2.17)$$

Donde R=constante lineal del parámetro del embalse. La combinación y resolución de las ecuaciones usa una aproximación de diferencias finitas simples produce:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \qquad (2.18)$$

Donde C_A, C_B = coeficientes de tránsito. Los coeficientes se calculan a partir de:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \qquad (2.19)$$

$$C_B = 1 - C_A \qquad (2.20)$$

El caudal de salida promedio es:

$$\overline{O_t} = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \qquad (2.21)$$

Con el modelo de Clark, los embalses lineales representan las consecuencias agregadas de almacenamiento de la cuenca. De manera que, conceptualmente, el embalse se considera que deba ubicarse en la salida de la cuenca.

Adicionalmente a este modelo de soporte del almacenamiento, el modelo de Clark determina el tiempo requerido para que el agua se mueva hasta la salida de la cuenca. Esto supone un modelo lineal de canal **(Dooge, 1959)**, en el cual el agua “transitó” desde los puntos remotos hasta el embalse lineal en la salida con retardo (translación), pero sin atenuación

Este retardo se representa implícitamente en el hidrograma de área-tiempo. Con ello se especifica el área de la cuenca contribuyente al caudal en la salida como una función del tiempo. Si el área se multiplica por una altura unitaria se divide entre Δt, el calculo del período de tiempo, el resultado es el caudal de entrada I_t, para un almacenamiento lineal.

La solución de la Ecuación 2.21 se encuentra por iteración, una vez definido el caudal de entrada, produce valores de $\overline{O_t}$. Sin embargo, si la ordenada del caudal de entrada en la Ecuación 2.18 representa el escurrimiento a partir de una unidad de exceso de lluvia, las ordenadas del caudal de salida son, de hecho, U_t, en el HU.

[Observe que como la solución de la Ecuación es iterada, el caudal de salida teóricamente continuará para una duración infinita. HEC-HMS continua el cálculo de las ordenadas del HU hasta que el caudal de salida excede 0.995 pulgadas o mm. HEC-HMS ajusta las ordenadas del HU usando una consideración de altura ponderada para producir una altura uniforme equivalente por cada unidad]

Estimación de los Parámetros del Modelo del HU de Clark: La aplicación del modelo de Clark requiere determinar:

- Propiedades del histograma de área-tiempo
- Coeficiente de almacenamiento, R

Propiedades del histograma de área-tiempo: Como se observa, las propiedades del modelo de tránsito lineal se definen implícitamente mediante un histograma área-tiempo. Los estudios en HEC muestran que, aun cuando se han desarrollado relaciones específicas para la cuenca, una función semejante se ajusta a las relaciones de área –tiempo representa una distribución temporal adecuada para la generación de un HU para la mayoría de las cuencas. Esta relación área-tiempo común, incluida en HEC-HMS es:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414\left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & parat \le \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414\left(1 - \frac{1}{t_c}\right) & parat \ge \frac{t_c}{2} \end{cases} \qquad (2.22)$$

Donde A_t=área acumulada de la cuenca que contribuye en el tiempo t; A=área total de la cuenca; y t_c=tiempo de concentración de la cuenca, y t_c=tiempo de concentración de la cuenca. Para la aplicación del HEC-HMS, sólo se necesita el parámetro t_c, el tiempo de concentración. Este se puede estimar mediante el procedimiento descrito con anterioridad en la sección del HU del SCS de este capítulo.

Coeficiente de almacenamiento, R: El coeficiente de almacenamiento, R, es un índice de almacenamiento temporal de la precipitación en exceso en la cuenca así como del drenaje hacia el punto de salida. Éste se puede estimar también mediante calibración, si la data de caudal y precipitación medida

está disponible. Aunque R tiene unidades de tiempo, tiene sólo un significado cualitativo en sentido físico. **Clark (1945)** indicó que R se puede calcular como el caudal en punto de inflexión sobre la curva descendente del hidrograma dividido por el tiempo derivado del caudal.

2.5.3.3 Modelación del flujo base con HEC-HMS

Dos componentes distinguibles de un hidrograma de escurrimiento son (1) la directa, escorrentía rápida debida a la precipitación, y (2) flujo base. El flujo base es el escurrimiento sostenido o de “buen tiempo” antes de que la precipitación se almacene temporalmente en la cuenca, sumado al escurrimiento superficial retardado de la tormenta actual.

HEC-HMS incluye tres modelos alternativos de flujo base:

- Variación mensual Constante
- Modelo de recesión exponencial, y
- Modelo de determinación del volumen de un depósito lineal

En este estudio se tratará el modelo que considera la variación mensual por disponer de datos para ello.

Variación mensual contante: El modelo del flujo base en HEC-HMS, representa al flujo base como una constante y considera su variación

mensualmente. El flujo es especificado por el usuario y se adiciona al escurrimiento directo calculado a partir de la lluvia para cada periodo de tiempo de la simulación.

2.5.3.4 Modelación del tránsito en canales con HEC-HMS

Los modelos de flujo en canales que se incluyen en HEC-HMS; estos son conocidos como modelos de tránsito. Los modelos de tránsito disponibles en HEC-HMS incluyen:

- Retardo
- Muskingum
- Suma modificada, también conocido como almacenamiento en tránsito
- Onda cinemática; y
- Muskingum-Cunge

Cada uno de estos modelos calcula un hidrograma de escurrimiento aguas abajo, conocido el hidrograma de escurrimiento aguas arriba como condición límite. Para cada uno se resuelve la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento. En capítulo se presenta el modelo de Muskingum-Cunge por disponer de datos par él.

Muskingum-Cunge: Aunque conocido y fácil para su uso, el modelo de Muskingum incluye parámetros que no están basados en la física y de esta manera son difíciles de estimar. Además, el modelo se basa en suposiciones que con frecuencia no se cumplen en los canales naturales. Como una ampliación el Modelo Muskingum-Cunge supera estas limitaciones. El modelo se basa en una solución de la siguiente ecuación de continuidad (con un caudal de entrada lateral, q_L, incluye):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \qquad (2.23)$$

Y la forma de difusión de la ecuación de cantidad de movimiento:

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} \qquad (2.24)$$

La combinación de éstos y el uso de la aproximación lineal da lugar a la ecuación de difusión convectiva **(Millar y Cunge, 1975):**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} = \mu\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \qquad (2.25)$$

Donde c=celeridad (velocidad) de la onda; y $\mu =$ difusividad hidráulica. La celeridad de la onda y la difusividad hidráulica se expresa como:

$$c = \frac{\partial Q}{dA} \qquad (2.26)$$

$$\mu = \frac{Q}{2BS_o} \qquad (2.27)$$

Donde B= ancho superior de la superficie del agua. Una aproximación por diferencias finitas de las derivadas parciales, combinadas con la ecuación de continuidad, produce:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_t - 1 + C_4 (q_L \Delta x) \quad (2.28)$$

Los coeficientes son:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (2.29) \qquad C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (2.30)$$

$$C_3 = \frac{2(1 - X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (2.31) \qquad C_4 = \frac{2\left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (2.32)$$

Los parámetros K y X son (Cunge, 1969; Ponce, 1978):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (2.33) \qquad X = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x}\right) \quad (2.34)$$

Pero c, Q, y B cambian con el tiempo, de manera que los coeficientes C_1, C_2, C_3 y C_4 deben cambiar. HEC-HMS los recalcula para cada intervalo de tiempo y distancia, Δt y Δx, con el uso de los algoritmos propuestos por Ponce (1986)

De nuevo, la selección del intervalo de tiempo y distancia es crítica. HEC-HMS selecciona estos para garantizar exactitud y estabilidad. El Δt seleccionado es el mínimo de los siguientes: intervalo de tiempo del usuario

a partir de las especificaciones de control; el tiempo de viaje a lo largo del tramo; o 1/20 del tiempo de incremento del flujo de entrada pico con la selección de una curva de crecimiento pronunciado, redondeando un múltiplo próximo o divisor del intervalo de tiempo del usuario. Una que se elige Δt, HEC-HMS calcula Δx como:

$$\Delta x = c\Delta t \qquad (2.35)$$

El valor está limitado de esta manera:

$$\Delta x \langle \frac{1}{2}\left(c\Delta t + \frac{Q_o}{BS_o c} \right) \qquad (2.36)$$

Aquí Q_o= caudal de referencia, calculado a partir del hidrograma de entrada como.

$$Q_o = Q_B + \frac{1}{2}(Q_{peak} - Q_B) \qquad (2.37)$$

Donde Q_B= flujo base; y Q_{peak}= flujo de entrada pico

2.6 MODELACIÓN CON HEC-RAS

La información que se presenta a continuación ha sido extraída del Manual Técnico de Referencia Hidráulica generado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Las bases teóricas para HEC-RAS se han estructurado de la siguiente manera:

- Filosofía General del sistema modelado.
- Descripción de las capacidades hidráulicas.
- Teoría básica para los cálculos del flujo unidimensional.
- Datos básicos requeridos en HEC-RAS.
- Descripción de las capacidades opcionales.
- Modelado de puentes.

2.7 FILOSOFÍA GENERAL DEL SISTEMA MODELADO

El software del Sistema de Análisis de ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS), permite la modelación hidráulica de flujo unidimensional permanente y no permanente. Las versiones futuras apoyarán los cálculos de transporte de sedimento.

HEC-RAS es un sistema integrado de software, diseñado para el uso interactivo en un ambiente de red multi-tarea, y multi-usuario. El sistema se comprende de una interfase gráfica de usuario (GUI; Graphical user interface), componentes del análisis hidráulico por separado, almacenamiento de datos y capacidades de orientación, facilitando informes y gráficos.

El sistema finalmente manejará tres componentes para el análisis hidráulico unidimensional: Cálculos de los perfiles de la superficie de agua con flujo permanente, simulación de flujo no permanente y los cálculos de los límites variables de transporte de sedimento. Un elemento importante en común es que los tres componentes usarán una representación de datos geométricos comunes y geometría común y rutinas de cálculos hidráulicos. Además de los tres componentes del análisis hidráulico, el sistema contiene varias características hidráulicas de diseño que pueden ser solicitadas una vez que los datos básicos de perfiles de la superficie de agua son calculados.

2.8 DESCRIPCIÓN DE LAS CAPACIDADES HIDRÁULICAS

HEC-RAS esta diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales para una red llena de canales naturales y construidos por el hombre. A continuación se presenta una descripción de las principales capacidades hidráulicas de HEC-RAS, entre las cuales se describirán:

- Perfiles de la superficie del agua en flujo permanente.
- Simulación de flujo no permanente.
- Cálculo del transporte de sedimentos y límites variables.

2.9 PERFILES DE LA SUPERFICIE DEL AGUA EN FLUJO PERMANENTE

Este componente del sistema modelador se utiliza para calcular los perfiles de la superficie de agua para flujo permanente gradualmente variado. El sistema puede ocuparse de un solo tramo del río, un sistema dendrítico, o una red llena de cauces. El componente de flujo permanente es capaz de modelar perfiles de la superficie de agua en régimen subcrítico, supercrítico y en transición.

El procedimiento básico computacional esta basado en la solución de la Ecuación de Energía unidimensional. La pérdida de energía es evaluada por fricción (Ecuación de Manning) y contracción/expansión (coeficiente multiplicado por el cambio en la carga de velocidad). La Ecuación de Momentum se utiliza en situaciones donde el perfil de superficie de agua varía rápidamente. Estas situaciones incluyen los cálculos de régimen de flujo mixto (es decir, resalto hidráulico), hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en las confluencias del río (uniones de riachuelos).

Los efectos de varias obstrucciones tales como los puentes, alcantarillas, aliviaderos, vertederos y otras estructuras en el cauce del río pueden ser considerados en los cálculos. El sistema de flujo permanente está diseñado para la aplicación en estudios de manejo de planicies de inundación y seguridad de inundación para evaluar los encauzamientos en el

curso de la inundación. También, es capaz de evaluar los cambios en los perfiles de la superficie de agua debido a las mejoras del canal y dique.

Las características especiales del componente de flujo permanente contienen: los análisis de planes múltiples; los cálculos de perfiles múltiples; análisis de aberturas múltiples en puentes y/o alcantarillas, y optimización del flujo dividido por uniones de riachuelos, vertederos laterales y aliviaderos.

2.10 TEORÍA BÁSICA PARA LOS CÁLCULOS DEL FLUJO UNIDIMENSIONAL

A continuación se describen las metodologías usadas dentro de HEC-RAS para realizar los cálculos de flujo unidimensional, las ecuaciones básicas que se necesitan y las bases teóricas para el cálculo de los perfiles de la superficie de agua para un flujo unidimensional. Las discusiones contenidas a continuación se limitan al cálculo de los perfiles de la superficie del agua para flujo permanente.

2.11 PERFILES DE LA SUPERFICIE DEL AGUA PARA FLUJO PERMANENTE

El HEC-RAS es actualmente capaz de realizar cálculos de perfiles de la superficie de agua para flujo permanente gradualmente variado en canales

naturales o artificiales. Pueden ser calculados perfiles de la superficie de agua en régimen de flujo subcrítico, supercrítico y mixto.

A continuación se describirán las ecuaciones y teorías involucradas con los perfiles de superficie del agua para flujo permanente, las cuales son:

- Ecuaciones para el Cálculo de los Perfiles Básicos.
- Cálculos de la conductividad mediante la subdivisión de las secciones transversales.
- Composición del Coeficiente de Manning para el canal principal.
- Evaluación de la carga media de Energía Cinética, de la pérdida por fricción, de la pérdida por contracción y expansión.
- Determinación de la profundidad crítica.
- Aplicación de la Ecuación de Momentum.
- Limitaciones del programa en flujo permanente.

2.12 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS PERFILES BÁSICOS

Los perfiles de superficie del agua son calculados entre una sección transversal y la próxima mediante la resolución de la Ecuación de Energía con un proceso iterativo llamado método del paso estándar. La Ecuación de Energía es la siguiente:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \qquad (2.38)$$

Donde:

Y_1, Y_2 : Profundidad del agua en la sección transversal

Z_1, Z_2 : Elevación del canal principal

V_1, V_2 : Velocidades medias en la sección (descarga total / área de flujo total)

α_1, α_2: Coeficientes de velocidad en los extremos del tramo

g: Aceleración de la gravedad

h_e: Pérdidas de energía

A continuación se muestra un diagrama con los términos de la Ecuación de Energía.

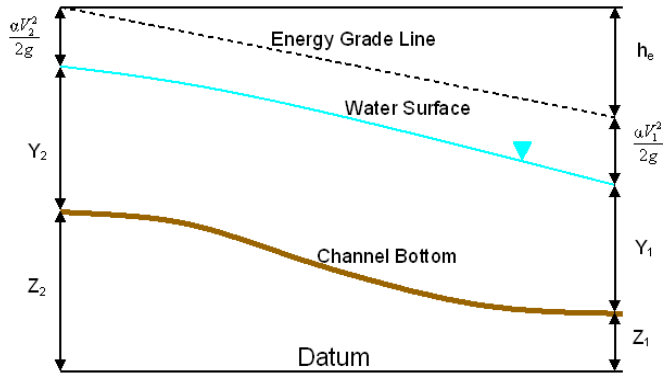


Figura 3. **Representación de los términos de la Ecuación de Energía**

La pérdida de energía (h_e) entre dos secciones transversales, se evalúa con la siguiente ecuación:

$$h_e = L\overline{S_f} + C\left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right] \qquad (2.39)$$

Donde:

L : Longitud del tramo ponderado con caudal

$\overline{S_f}$: Pendiente de fricción entre dos secciones

C : Coeficiente de pérdida por contracción y expansión.

La longitud del tramo ponderado con caudal, L, se calcula así:

$$L = \frac{L_{lob}\overline{Q}_{lob} + L_{ch}\overline{Q}_{ch} + L_{rob}\overline{Q}_{rob}}{\overline{Q}_{lob} + \overline{Q}_{ch} + \overline{Q}_{rob}} \qquad (2.40)$$

Donde:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}: longitud del tramo de la sección transversal especifica para el caudal en el margen izquierdo, canal principal y el margen derecho, respectivamente.

Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{rob}: Promedio aritmético de caudales entre secciones para el margen izquierdo, canal principal y el margen derecho, respectivamente.

2.13 CÁLCULOS DE LA CONDUCTIVIDAD MEDIANTE LA SUBDIVISIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

La determinación de la conductividad total y del coeficiente de velocidad para una sección transversal requiere que ésta se subdivida en unidades para las cuales la velocidad esté uniformemente distribuida. La aproximación usada en HEC-RAS, está basada en la subdivisión del flujo en las áreas de las márgenes mediante el ingreso de los valores de n para las secciones transversales separadas por puntos (ubicación donde cambian los valores de n) como base para la subdivisión (Figura2.4). La conductividad se calcula para cada subdivisión siguiendo la ecuación de Manning (basado en unidades inglesas):

$$Q = K S_f^{1/2} \qquad (2.42)$$

$$K = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} \qquad (2.43)$$

Donde:

K = conductividad para la subdivisión

n = Coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión

A = Área de flujo para la subdivisión

R = Radio hidráulico para la subdivisión (área / perímetro mojado).

El programa suma todos los incrementos de conductividad en los márgenes para obtener una conducción del margen izquierdo y derecho. La conducción en el canal principal normalmente se calcula como un elemento individual de conducción. La conducción total para la sección transversal se obtiene sumando las tres conducciones subdivididas (izquierda, canal y derecha).

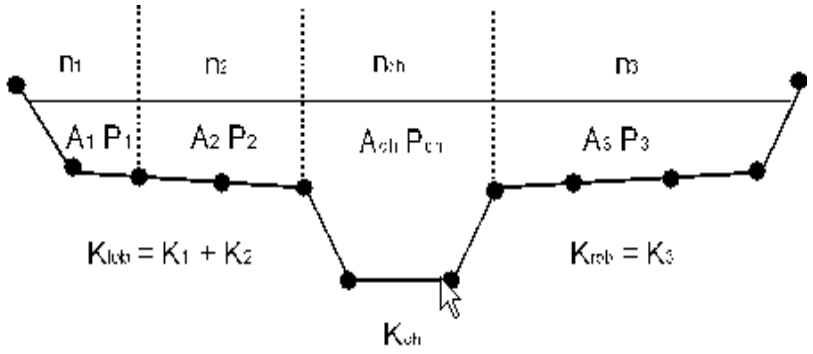


Figura 4. **Método de Subdivisión de Conducción Predefinido por defecto en HEC-RAS**

Un método alternativo disponible en el HEC-RAS, es el cálculo de la conductividad entre la coordenada de cada punto en los márgenes (Figura 2.5). La conductividad se suma para conseguir los márgenes izquierdos totales y valores de los márgenes derechos. Este método se usa en el programa de HEC-2. El método ha permanecido como una opción dentro del HEC-RAS para reproducir los estudios que fueron originalmente desarrollados con el HEC-2.

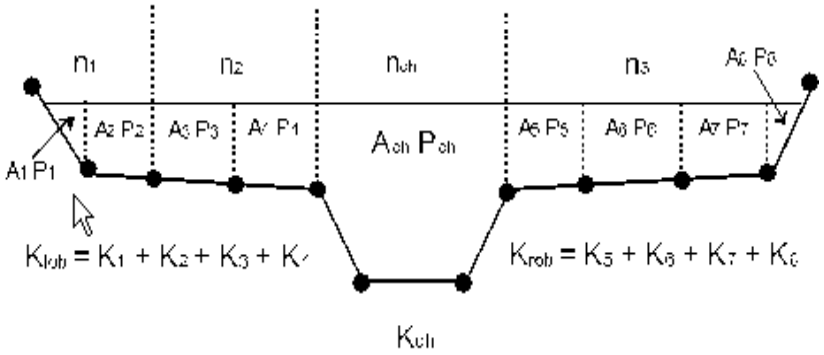


Figura 5. **Método Alternativo de Subdivisión de Conducción**

Los dos métodos para calcular las conductividades producirán respuestas diferentes cuando las partes sobre las márgenes tengan secciones de terreno con pendiente vertical significativa. En general las aproximaciones por defecto en el HEC-RAS suministraran una conducción total más baja para la misma elevación de la superficie del agua.

Primero que todo, para las pruebas la importancia de las dos formas de cálculos de conductividad, fue el estudio exacto de comparaciones que se realizaron usando un conjunto de 97 datos de los perfiles del HEC (HEC 1986). Los perfiles de la superficie del agua se calcularon para un evento de probabilidad del 1% mediante el uso de dos métodos para el cálculo de la conductividad en el HEC-RAS. Los resultados del estudio mostraron que la aproximación por defecto en HEC-RAS generalmente produciría una elevación mayor de la superficie del agua calculada. Además de las 2048 ubicaciones de la sección transversal, 47.5% habían sido calculadas para las elevaciones de la superficie del agua dentro de 0.10 pies (30.48 mm), 71% dentro de 0.20 pies (60.96 mm), 94.4% dentro de 0.4 pies (121.92 mm),

99.4% dentro de 1.0 pies (304.8 mm), y una sección transversal tenía una diferencia de 2.75 pies (0,84 m). Debido a que las diferencias tendían a estar en la misma dirección, algunos efectos pudieron ser atribuidos a la propagación de diferencias aguas abajo.

Los resultados de las comparaciones de conductividad no muestran qué método es más exacto, ellos sólo muestran las diferencias entre los mismos. En general, se percibe que en HEC-RAS el método predefinido es más proporcional a la ecuación de Manning y al concepto de elementos de flujo separados. Más allá de la investigación, con los perfiles de la superficie del agua observados, se necesitará hacer cualquier conclusión sobre la exactitud de los dos métodos.

2.14 COMPOSICIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING PARA EL CANAL PRINCIPAL

El flujo del canal principal no se subdivide, excepto cuando el coeficiente de rugosidad cambia en el interior del área del canal. HEC-RAS prueba la aplicabilidad de la subdivisión de la rugosidad dentro de las partes del canal principal para una sección transversal, y si no es aplicable, el programa calculará un único valor de n compuesto para el canal principal completo. El programa determina si la parte del canal principal de la sección transversal puede subdividirse o si un canal principal compuesto de n valores

será utilizado basado en el siguiente criterio: si en un canal principal la pendiente lateral es más inclinada que 5H : 1V y el canal principal tiene más que un valor n, una composición de rugosidad, n_c, será calculado [Chow, 1959]. La pendiente lateral del canal usada por HEC-RAS, se define como la distancia horizontal entre las estaciones de n valores adyacentes en el canal principal, y la diferencia en la elevación de estas dos estaciones (vea S_L y S_R de la Figura 2.4).

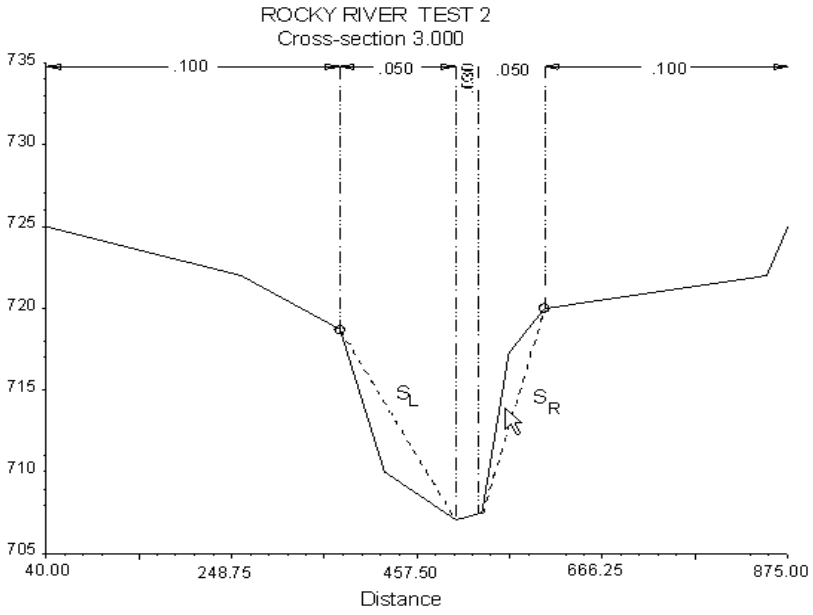


Figura 6. **Definición de la pendiente de las orillas para los cálculos de valor compuesto, n_c**

Para la determinación de n_c, el canal principal está dividido en las N partes, cada uno con un perímetro mojado conocido P_i y un coeficiente de rugosidad n_i .

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i\,1}^{N} \left(P_i \, n_i^{1.5} \right)}{P} \right]^{2/3} \qquad (2.43)$$

Donde:

n_c = coeficiente de rugosidad compuesto o equivalente.

P = perímetro mojado para el canal principal completo.

P_i = perímetro mojado de la subdivisión 1.

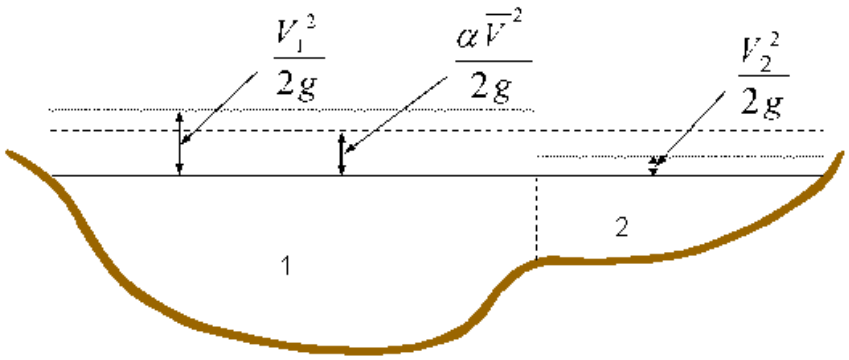
n_i = coeficiente de rugosidad para la subdivisión 1.

La composición calculada n_c debe verificarse razonablemente. El valor calculado es la composición para el canal principal del valor n que se muestra en las tablas resumidas de salida.

2.15 EVALUACIÓN DE LA CARGA MEDIA DE ENERGÍA CINÉTICA

Debido a que el software HEC-RAS es un programa para perfiles de flujo de la superficie de agua unidimensional, sólo una superficie de agua y por consiguiente una sola energía media son calculadas para cada sección transversal. Para una elevación de la superficie de agua dada, la energía media se obtiene mediante el cálculo de la carga de energía del flujo a partir de tres subsecciones de una sección transversal (margen izquierdo, canal

principal y margen derecho). La Figura 2.5 muestra como la energía media se podría obtener para una sección transversal con un canal principal y un margen derecho (sin área para el margen izquierdo).



V_1 = velocidad media para la subsección 1.

V_2 = velocidad media para la subsección 2.

Figura 7. **Ejemplo de obtención de la energía media**

Para calcular la energía cinética media es necesario obtener el coeficiente alfa.

El coeficiente alfa se calcula de la siguiente manera:

La carga de energía cinética media = Descarga – carga de velocidad

$$\alpha \frac{\overline{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \qquad (2.44)$$

$$\alpha = \frac{2g\left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]}{(Q_1 + Q_2)\overline{V}^2} \qquad (2.45)$$

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2)\overline{V}^2} \qquad (2.46)$$

En General:

$$\alpha = \frac{\left[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + ... + Q_N V_N^2 \right]}{Q\overline{V}^2} \qquad (2.47)$$

El coeficiente de velocidad, α, se calcula basado en la conductividad de los tres elementos de flujo: margen izquierdo, margen derecho y el canal principal. También puede escribirse por lo que se refiere a la conducción y área como en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \qquad (2.48)$$

Donde:

A_t = área de flujo total de la sección transversal

A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} = áreas del flujo en el margen izquierdo, canal principal y el margen derecho, respectivamente.

K_t = conducción total en la sección transversal

K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} = conducción del margen izquierdo, canal principal y el margen derecho, respectivamente.

2.16 EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA POR FRICCIÓN

La perdida por fricción se evalúa en HEC-RAS como el producto de S_f y L, dónde S_f es la pendiente por fricción para un tramo y L longitud del tramo. La pendiente de fricción (pendiente del gradiente de energía) en cada sección transversal se calcula por la ecuación de Manning como sigue:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \qquad (2.49)$$

Las expresiones alternativas para la pendiente por fricción en el tramo representativo (S_f) en HEC-RAS son las siguientes:

Ecuación de la pendiente Media

$$\overline{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2}\right)^2 \qquad (2.50)$$

Ecuación de la Pendiente Media por Fricción

$$\overline{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \qquad (2.51)$$

Ecuación de la Pendiente Media por Fricción Geométrica

$$\overline{S}_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \qquad (2.52)$$

Ecuación de la Pendiente Media por Fricción Armónica.

$$\overline{S}_f = \frac{2(S_{f1} + S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \qquad (2.53)$$

La ecuación 2.50 es por “defecto” la utilizada por el programa; ésta se usa automáticamente a menos que una ecuación diferente sea requerida en la entrada. El programa también contiene una opción para seleccionar las ecuaciones, dependiendo del régimen de flujo y tipo del perfil (Ej. S1, M1, etc.).

Evaluación de las pérdidas por contracción y expansión

Las pérdidas por contracción y expansión en HEC-RAS son evaluadas con la siguiente ecuación:

$$h_{ce} = C\left|\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right| \qquad (2.54)$$

Donde:

C = coeficiente de contracción o expansión

El programa asume que una contracción está ocurriendo cuando la carga de velocidad aguas abajo es mayor que la carga de velocidad aguas arriba. Igualmente, cuando la carga de velocidad aguas arriba es mayor que la carga de velocidad aguas abajo, el programa asume que ocurre una expansión del flujo. Los valores comunes de “C” se mencionan mas adelante.

2.17 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

La elevación desconocida de la superficie de agua en una sección transversal es determinada mediante una solución iterativa de las Ecuaciones 2.1 y 2.2. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Se asume una elevación de la superficie de agua en la sección transversal aguas arriba (o en la sección transversal aguas abajo si se calcula un perfil supercrítico).

2. Basado en la elevación de superficie de agua asumida, se determina la conducción total correspondiente y la carga de velocidad.

3. Con los valores del paso 2, se calcula $\overline{S_f}$ y se resuelve la Ecuación 2-2 para h_e.

4. Con los valores de los pasos 2 y 3, se resuelve la Ecuación 2.1 para WS_2.

5. Se compara el valor calculado de WS_2 con el valor asumido en el paso 1, y se repiten los pasos del 1 hasta el 5, hasta que los valores concuerden en 0,01 pies (0,003 m), o en la tolerancia definida por el usuario.

El criterio usado para asumir las elevaciones de la superficie de agua en el procedimiento iterativo varía de ensayo a ensayo. El primer ensayo de la superficie del agua está basado en proyectar la profundidad de agua en la sección transversal anterior hacia la sección transversal actual. El segundo ensayo de la elevación de la superficie del agua se agrega a la elevación de superficie de agua asumida más 70% del error del primer ensayo (W.S. calculado - W.S asumida). En otras palabras, W.S. nuevo = W.S. asumido + 0.70 * (W.S. calculado - W.S. asumido). La tercera y siguiente prueba generalmente se basa en el método “Secante” de proyectar la razón de cambio de la diferencia entre las elevaciones calculadas y las asumidas para los dos ensayos anteriores. La ecuación para el método de la secante es la siguiente:

$$WS_1 = WS_{1-2} - Err_{1-2} * Err_Assum / Eff_Diff \quad (2.56)$$

Donde:

WS_1 = nueva superficie de agua asumida

WS_{1-1} = superficie de agua asumida de la iteración anterior

WS_{1-2} = superficie de agua asumida de dos ensayos anteriores

Err_{1-2} = error de los dos ensayos anteriores (cálculo de la superficie de agua menos la asumida de la iteración 1-2).

Err_Assum = diferencia en las superficies de agua asumida de los dos ensayos anteriores. Err_Assum = WS_{1-2} - WS_{1-1}

Err_Diff = superficie de agua asumida menos la superficie de agua calculada de la iteración anterior (I -1), más el error de dos ensayos anteriores (Err_{1-2}).

Err_Diff = WS_{1-1} - WS $Ca1c_{1-1}$ + Err_{1-2}

El cambio de un ensayo al próximo se acerca a un máximo de 50 por ciento de la profundidad asumida del ensayo anterior. En ocasiones el método de la secante puede fallar si el valor del Err_Diff se hace demasiado pequeño. Si el Err_Diff es menor que 1.0E-2, entonces el método de la secante no se usa. Cuando esto ocurre, el programa calcula una nueva suposición tomando el promedio de la superficie del agua calculado y asumido a partir de las iteraciones anteriores.

El programa esta restringido para un número máximo de iteraciones (el valor predeterminado es 20) para un balance de la superficie de agua. Mientras el programa esta iterando, guarda el camino de las superficies de agua que produce la mínima magnitud de error entre los valores asumidos y calculados. Esta superficie de agua se denomina la *superficie de agua de error mínimo*. Si el número máximo de iteraciones se alcanza antes de lograr

el equilibrio de la superficie de agua, entonces el programa calculará la profundidad crítica (si esto no ha sido realizado). El programa luego, verifica para mostrar si el error asociado con la superficie de agua de error mínimo está dentro de una tolerancia predefinida (por defecto este valor es 0,3 pies o 0,1 m). Si la superficie de agua de error mínimo tiene un error asociado menor que la tolerancia predefinida, y esta superficie de agua está en el lado correcto de la profundidad crítica, entonces el programa usa esta superficie de agua como la respuesta final y muestra un mensaje de advertencia. Si la superficie de agua de error mínima tiene un error asociado que es mayor que la tolerancia predefinida, o está en el lado incorrecto de la profundidad crítica, el programa usará la profundidad crítica como la respuesta final para la sección transversal y pondrá un mensaje de advertencia. La razón para usar la superficie de agua de error mínimo es que posiblemente dé una respuesta aceptable de la profundidad crítica, con tal de que el criterio anterior se cumpla. Ambos, la superficie de agua de error mínima y la profundidad crítica, son solo usados en estas situaciones para permitir que el programa suministre la solución del perfil de superficie de agua. Ninguna de estas dos respuestas son consideradas como soluciones válidas, y por consiguiente se emiten los mensajes de advertencia publicados. En general, cuando el programa no puede equilibrar la Ecuación de Energía de una sección transversal, normalmente es originado por un número inadecuado de secciones transversales (las secciones transversales espaciadas demasiado lejos) o los datos de la sección transversal son errados. De vez en cuando,

esto puede ocurrir porque el programa está intentando calcular una superficie de agua de régimen subcrítico cuando el flujo es realmente de régimen supercrítico.

Cuando una elevación de la superficie de agua “balanceada” se ha obtenido de una sección transversal, se debe de hacer una verificación para confirmar que la elevación este en el lado correcto de la elevación de la superficie de agua critica (por ejemplo, sobre la elevación crítica si un perfil subcrítico ha sido requerido). Si la elevación balanceada está por encima del lado errado de la elevación de superficie de agua crítica, la profundidad crítica es asumida para la sección transversal y un mensaje de “advertencia” se despliega en el programa. El programa debe de estar enterado de la profundidad crítica asumida y determinar las razones para su ocurrencia, porque en muchos casos son el resultado de longitudes del tramo que son demasiado largo o de mala representación de las áreas de flujo efectivas de las secciones transversales.

2.18 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD CRÍTICA

La profundidad crítica para una sección transversal se determinará si se cumplen cualquiera de las siguientes condiciones:

(1) El flujo de régimen supercrítico ha sido especificado.

(2) El cálculo de profundidad crítica se ha solicitado.

(3) Esta es una sección transversal del borde externo y la profundidad crítica debe determinarse para asegurar que la condición de borde introducida esté en el régimen de flujo correcto.

(4) El número de Froude se verifica para un perfil subcrítico indicando que la profundidad crítica necesita sea determinada para verificar el régimen de flujo asociado con la elevación equilibrada.

(5) El programa no podrá equilibrar la Ecuación de Energía dentro de la tolerancia especificada antes de alcanzar el número máximo de iteraciones.

La carga de energía total para una sección transversal está definida por:

$$H = WS - \frac{\alpha V^2}{2g} \qquad (2.56)$$

Donde:

H = Carga de energía total.

WS = Elevación de la superficie de agua

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ = Carga de velocidad

La elevación de superficie de agua crítica es la altura por la cual la carga de energía total es mínima (es decir, la energía específica es mínima

para esa sección transversal para un flujo dado). La elevación crítica se determina con un procedimiento iterativo por el cual los valores de WS son asumidos y los valores correspondientes de H son determinados con la Ecuación 2.57 hasta alcanzar un valor mínimo de H.

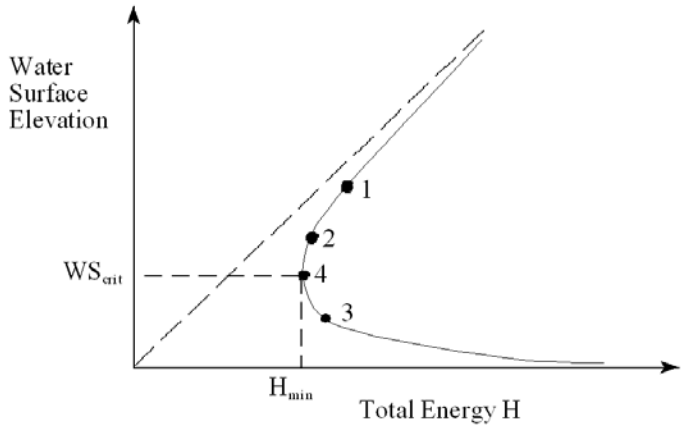


Figura 8. **Diagrama de Energía vs. Elevación de la superficie del agua.**

El programa HEC-RAS tiene dos métodos para calcular la profundidad crítica: el método “Parabólico” y el método “Secante”. El método parabólico se calcula más rápido, pero sólo puede localizar una energía mínima particular. Para la mayoría de las secciones transversales habrá sólo un mínimo en la curva de energía total, por consiguiente el método parabólico ha sido seleccionado como el método predefinido (el método predefinido puede ser cambiado desde la interfase). Si el método parabólico es utilizado y no converge, entonces el programa automáticamente utilizara el método Secante.

En ciertas situaciones es posible tener más de un mínimo en la curva de energía total. Los mínimos múltiples son a menudo asociados con secciones transversales que tienen discontinuidad en la curva de energía total. Estas discontinuidades pueden ocurrir debido a que los márgenes son muy anchos y planos, así como las secciones transversales con diques y áreas de flujo inefectivas. Cuando el método parabólico es usado en una sección transversal que tiene múltiples valores mínimos en la curva de energía total, el método convergerá en el primer valor mínimo que se localice. Esta aproximación puede llevar a estimaciones incorrectas de la profundidad crítica. Si se piensa que el programa ha localizado de forma incorrecta la profundidad crítica, entonces debe seleccionarse el método Secante y simular nuevamente el modelo.

El método “parabólico” involucra determinar los valores de H para tres valores de WS que son divididos en intervalos iguales de ΔWS. El WS correspondiente al valor mínimo para H, definido por una parábola que pasa a través de tres puntos en el plano H vs. WS, es usado como la base para la próxima suposición del valor de WS. Se asume que la profundidad crítica ha sido obtenida cuando hay menos de 0.01 pies (0.003 m) de probabilidad en la profundidad del agua de una interacción a la próxima y cuando la carga de energía no haya disminuido ni aumentado por más de 0,1 pies (0,003 m).

El método “secante” primero crea una tabla de la superficie del agua vs. la energía de la división de la sección transversal en 30 intervalos. Si la

altura máxima de la sección transversal (desde el punto más alto hasta el punto más bajo) es menor que 1.5 veces la altura máxima del canal principal (de la estación del margen mas alto del canal principal al mas bajo), entonces el programa divide la sección transversal completa en 30 intervalos iguales. Si este no es el caso, el programa usa 25 intervalos iguales desde la estación del margen del canal principal más bajo al más alto, y luego 5 intervalos iguales desde el canal principal al punto más alto de la sección transversal. El programa entonces buscará esta tabla para ubicar los mínimos locales. Cuando un punto en la tabla es encontrado tal que la energía para la superficie de agua inmediatamente superior e inferior sea mayor que la energía dada para la superficie de agua, luego la ubicación general de un mínimo local ha sido encontrada. El programa realizará la búsqueda del mínimo local usando el método de proyección Secante. El programa tanteará para cualquier mínimo local hasta 30 veces o hasta que la profundidad crítica se haya limitado por la tolerancia del error crítico. Después de que el mínimo local ha sido determinado con mayor precisión, el programa continúa examinando la tabla para ver si existe cualquier otro mínimo local. El programa puede localizar hasta tres mínimos locales en la curva de energía. Si más de un mínimo local es encontrado, el programa fija una profundidad crítica igual a una profundidad con la que posea menor energía. Si este mínimo local se debe a una discontinuidad en la curva de energía causada por un dique sobresaliente o un área de flujo inefectivo, entonces el programa seleccionará el próximo mínimo más bajo en la curva

de energía. Si todos los mínimos locales están ocurriendo por discontinuidad en la curva de energía, entonces el programa igualara la profundidad crítica con la energía más baja. Si ningún mínimo local se encuentra, entonces el programa usará la elevación de la superficie del agua con la menor energía. Si la profundidad crítica que se encuentra es en el punto más alto de la sección transversal, entonces ésta probablemente no sea la profundidad crítica real. Por consiguiente, el programa duplicará la altura de la sección transversal y probará de nuevo. Duplicar la altura de la sección transversal se logra extendiendo las paredes verticales del primero y los últimos puntos de la sección. La altura de la sección transversal puede duplicarse hasta cinco veces antes de que el programa deje de examinar.

2.19 APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE MOMENTUM

Cuando el paso de la superficie de agua sea a través de la profundidad crítica, la Ecuación de Energía no es aplicable. La Ecuación de Energía sólo es aplicable a las situaciones de flujo gradualmente variado, y a la transición desde subcrítico a supercrítico o desde supercrítico a subcrítico, que son situaciones del flujo rápidamente variado. Hay varios casos cuando la transición del flujo subcrítico al supercrítico y supercrítico al subcrítico pueden ocurrir. Éstos incluyen cambios significativos en la pendiente del canal, reducciones de puentes, las estructuras de caída y vertederos, y uniones de corriente. En algunos de estos casos pueden aplicarse las

ecuaciones empíricas, mientras que en otros casos es necesario aplicar la Ecuación de Momentum para obtener una respuesta.

En HEC-RAS, la Ecuación de Momentum puede aplicarse para los siguientes problemas específicos: la ocurrencia de un resalto hidráulico, el flujo bajo en puentes y uniones de ríos.

La Ecuación de Momentum se deriva de la Segunda Ley de Newton:

Fuerza = Masa x Aceleración

$$\sum F_x = ma \tag{2.57}$$

Aplicando la Segunda Ley de Newton a un cuerpo de agua almacenado entre dos secciones transversales en la ubicación 1 y 2 (Figura 2.9), la expresión para el cambio en la cantidad de movimiento puede describirse de la siguiente manera:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \tag{2.58}$$

Donde:

P= Fuerza de presión Hidrostática localizada en 1 y 2.

W_x = Fuerza debido a la carga de agua en la dirección X.

F_f = Fuerza debido a las pérdidas por fricción externa de 2 hacia 1.

Q=Caudal

ρ = Densidad del agua

ΔV_x = Cambio en la velocidad de 2 hacia1, en la dirección X.

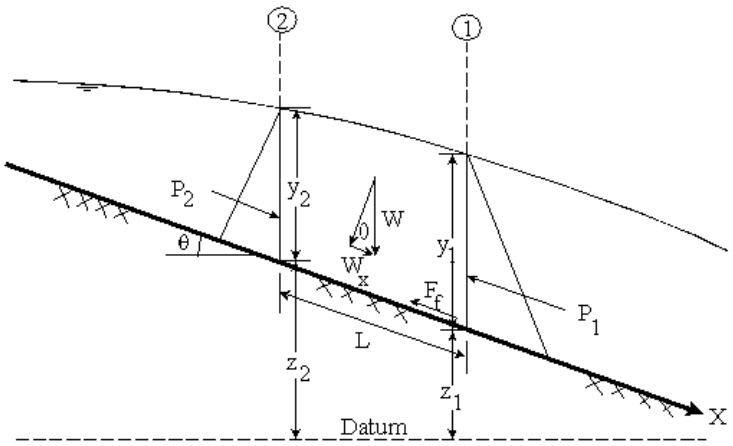


Figura 9. **Aplicación del Principio de Cantidad de Movimiento**

Fuerza de Presión Hidrostáticas

La fuerza en la dirección X debido a la presión hidrostática es:

$$P = \gamma A \overline{Y} \cos\theta \qquad (2.59)$$

La suposición de una distribución de la presión hidrostática sólo es válida para las pendientes menores de 1:10. El cos θ para una pendiente de 1:10 (aproximadamente de 6 grados) es igual a 0.995. Debido a que la pendiente de los canales ordinarios esta mas próxima de 1:10, la corrección del cos θ para la profundidad puede colocarse igual a 1.0 (Chow, 1959). Por consiguiente, las ecuaciones para la fuerza de presión hidrostática de las secciones 1 y 2 son de la siguiente forma:

$$P_1 = \gamma A_1 \overline{Y}_1 \quad (2.60) \qquad P_2 = \gamma A_2 \overline{Y}_2 \quad (2.61)$$

Donde:

γ= Carga unitaria de agua.

A_i = Área mojada de la sección transversal localizada en 1 y 2.

Y_i = Profundidad medida de la superficie de agua al centroide del área de la sección transversal entre 1 y 2.

Fuerza del peso del Agua

Peso del agua = (peso unitario del agua) x (volumen del agua).

$$W = \gamma \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \quad (2.62) \qquad W_x = W \times \sin\theta \quad (2.63)$$

$$\sin\theta = \frac{z_2 - z_1}{L} = S_0 \quad (2.64) \qquad W_x = \gamma \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 \quad (2.65)$$

Donde:

L = Distancia entre las secciones 1 y 2 a lo largo del eje X.

S_o = Pendiente del canal, en las elevaciones del cauce.

z_i = Elevación del cauce medio localizadas entre 1 y 2.

Fuerza de Fricción Externa

$$F_f = \tau \overline{P} L \tag{2.66}$$

Donde:

τ = tensión de la sección.

$\overline{P}$ = Perímetro mojado medio entre las secciones 1 y 2.

$$\tau = \gamma \overline{R} \overline{S}_f \tag{2.67}$$

Donde:

$\overline{R}$ = Radio hidráulico promedio (R = A/P).

$\overline{S}_f$ = Gradiente de la pendiente de energía (pendiente por fricción).

$$F_f = \gamma \frac{\overline{A}}{\overline{P}} \overline{S}_f \overline{P} L \tag{2.68}$$

$$F_f = \gamma \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \overline{S}_f L \tag{2.69}$$

Aceleración de Cantidad de Masa

$$m a = Q \rho \Delta V_x \tag{2.70}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad and \quad \Delta V_x = \left(\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2 \right) \tag{2.71}$$

Donde:

β = coeficiente de cantidad de movimiento que corresponde a la distribución de velocidades variables en canales irregulares.

Sustitución dentro de la Ecuación 2-59, y asumiendo Q puede variar desde la sección 2 a la 1.

$$\gamma A_2 \overline{Y}_2 - \gamma A_1 \overline{Y}_1 + \gamma\left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_0 - \gamma\left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L \overline{S}_f = \frac{Q_1 \gamma}{g} \beta_1 V_1 - \frac{Q_2 \gamma}{g} \beta_2 V_2 \quad (2.72)$$

$$\frac{Q_2 \beta_2 V_2}{g} + A_2 \overline{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L \overline{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1 V_1}{g} + A_1 \overline{Y}_1 \quad (2.73)$$

$$\frac{Q_2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \overline{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L \overline{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1}{g A_1} + A_1 \overline{Y}_1 \quad (2.74)$$

La Ecuación 2-75 es la forma funcional de la Ecuación de Momentum que se usa en HEC-RAS. Todas las aplicaciones de esta ecuación dentro de HEC-RAS se derivan de la Ecuación 2-75.

2.20 LIMITACIONES DEL PROGRAMA EN FLUJO PERMANENTE

Las siguientes suposiciones están implícitas en las expresiones analíticas usadas en la versión actual del programa:

- El flujo es estable.
- El flujo es gradualmente variado. (Excepto en las estructuras hidráulicas como: puentes, alcantarillas y vertederos. En estas situaciones

dónde el flujo puede variar rápidamente, puede usarse la Ecuación de Momentum u otras ecuaciones empíricas).

- El flujo es unidimensional (es decir los componentes de la velocidad en la direcciones distintas de la dirección del flujo no se toman en cuenta).
- Los canales del río tienen “pequeñas” pendientes, (menores de 1:10).

Se asume que el flujo es permanente porque los términos dependientes del tiempo no son incluidos en la Ecuación de Energía (Ecuación 2-39). Se asume que el flujo es gradualmente variado porque la Ecuación 2-39 está basada en la premisa de que una distribución de la presión hidrostática existe en cada sección transversal. En situaciones dónde el flujo es rápidamente variado, el programa cambia a la Ecuación de Momentum u otras ecuaciones empíricas. Se asume que el flujo es unidimensional porque la Ecuación 2-19 está basada en la premisa de que la carga de energía total es la misma para todos los puntos de una sección transversal. Las pendientes pequeñas del canal son asumidas porque la carga de presión, la cual es un componente de Y en la Ecuación 2.38, se representa por la profundidad del agua medida verticalmente.

El programa no tiene actualmente la capacidad para tratar con fronteras movibles (por ejemplo: el transporte de sedimentos) y requiere que

esas pérdidas de energía sean definidas con los términos contenidos en la Ecuación 2.39

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández y otros (2004) este trabajo de investigación es de tipo correlacional explicativa definiendo como correlacional aquellos estudios que pretenden responder preguntas de investigación, así como también tiene como propósito medir el grado de relación que exista entre dos o más variables; la utilidad y el propósito principal de los estudios correlaciones son saber cómo se puede comportar un concepto o variable conociendo el comportamiento de otra u otras variables relacionadas. Los estudios explicativos están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas.

Este trabajo pretende determinar la relación existente entre los parámetros lluvia escorrentía en la cuenca del rio Unare, ubicada entre los Estados Guárico y Anzoátegui; mediante la comparación de modelos matemáticos que contemplan el estudio de ambos parámetros, ahora bien la

investigación es de tipo correlacional, explicativa debido a la necesidad de determinar la relación de estas variables, y buscar la respuesta a la pregunta planteada en este trabajo de investigación , la cual busca encontrar el modelo matemático que más se ajuste al comportamiento de la cuenca.

3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández y otros (2004) este trabajo de investigación es de tipo correlacional explicativa definiendo como correlacional aquellos estudios que pretenden responder preguntas de investigación, así como también tiene como propósito medir el grado de relación que exista entre dos o más variables; la utilidad y el propósito principal de los estudios correlaciones son saber cómo se puede comportar un concepto o variable conociendo el comportamiento de otra u otras variables relacionadas. Los estudios explicativos están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas.

Este trabajo pretende determinar la relación existente entre los parámetros lluvia escorrentía en la cuenca del rio Unare, ubicada entre los Estados Guárico y Anzoátegui; mediante la comparación de modelos matemáticos que contemplan el estudio de ambos parámetros, ahora bien la

investigación es de tipo correlacional, explicativa debido a la necesidad de determinar la relación de estas variables, y buscar la respuesta a la pregunta planteada en este trabajo de investigación , la cual busca encontrar el modelo matemático que más se ajuste al comportamiento de la cuenca.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

En esta investigación se realizó un muestreo probabilístico por racimos o conglomerados, (Hernández et al., 2004; Puertas et al., 1998), utilizando las secciones transversales como racimos, es decir, como unidades muestrales, a partir de las cuales se seleccionaron las estaciones o unidades de análisis donde se recolectaron datos de escorrentía.

El tamaño de la muestra se estableció tomando en cuenta los cálculos para un muestreo probabilístico simple, en dos pasos:

1. Cálculo del tamaño provisional de la muestra

$$n' = \frac{S^2}{V^2} = \frac{Varianza\ \ de\ \ la\ \ muestra}{Varizanza\ \ de\ \ la\ \ poblaciòn}$$

2. Cálculo del tamaño de la muestra

$$n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}}$$

Donde n' es el tamaño de la muestra sin ajustar, V^2 es la varianza de la población definida, S^2 es la varianza de la muestra expresada como la probabilidad de ocurrencia de la media, n es el tamaño de la muestra y N es el tamaño de la población.

La unidad muestral está representada por dos secciones transversales en la subcuenca media y en la desembocadura del rio Unare, y las unidades de análisis están representadas por las estaciones de medición de caudal en la sección transversal del rio seleccionada. La determinación de la unidad de análisis se indica a continuación.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Una vez seleccionado el diseño de investigación apropiado y la muestra adecuada de acuerdo con el problema de estudio, la siguiente etapa consiste en la recolección de datos que implican tres actividades vinculadas entre sí.

"A) Seleccionar un instrumento de medición de los disponibles en el estudio del comportamiento o desarrollar uno (el instrumento de recolección de los datos). Este instrumento debe ser válido y confiable, de lo contrario no podemos basarnos en sus resultados. B) Aplicar ese instrumento de medición. Es decir, obtener las observaciones y mediciones de las variables

que son de interés para nuestro estudio. c) Preparar las mediciones obtenidas para que puedan analizarse correctamente". (Sampieri,1996, p.241).

Para la recolección de datos se tomaron mediciones directas en el río, con la utilización de un correntómetro de tipo molinete portátil de marca AQUACALC 5000 que trabaja por medio de un monitoreo puntual.

El panel del equipo AQUACALC 5000 es mostrado en la Figura 10 donde sus funciones principales para la medición se definen de la siguiente forma:

- **Go To Transect #:** indica al equipo en cual sección transversal se insertaran los datos para su posterior procesamiento.
- **Go to Station #:** Indica al equipo en cuál de las estaciones se insertaran los datos. Esta función también es utilizada al finalizar el estudio de una estación para pasar a la siguiente.
- **Next Station**: Esta función es utilizada al finalizar el estudio de una estación para pasar a la siguiente.
- **Toogle .2 .6 .8**: indica al equipo la profundidad a la cual esta sumergido el correntómetro en porcentaje de la profundidad total en el punto de medición.
- **Set Distance**: esta función permite introducir el valor de la distancia horizontal de cada estación.

- **Set Depth**: esta función permite introducir el valor de la profundidad total del punto en estudio.
- **Measure**: inicia el conteo de las revoluciones en un periodo de 40 segundos para calcular los valores de velocidad de la estación en estudio.

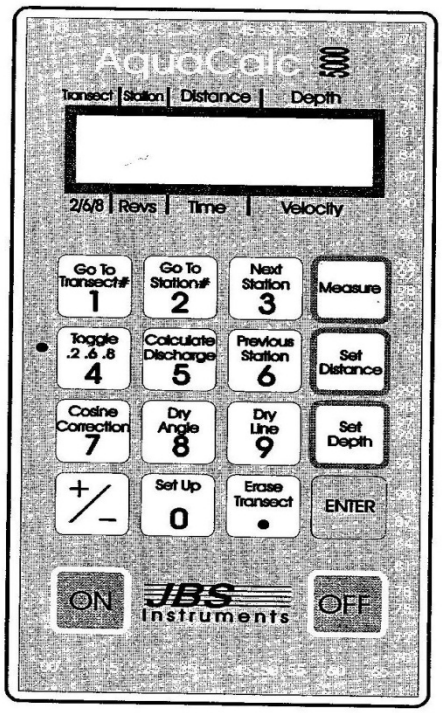


***Figura 10*. Dispositivo electrónico para almacenamiento y procesamiento de datos de escorrentía. [*Fuente*: Manual de instrucciones del dispositivo AquaCalc Pro 5000, JBS Instruments, 2008]**

Para la toma de datos de precipitaciones se empleo un pluviómetro digital de monitoreo continuo (24 horas) con registro, el cual es controlado con la interface PC Logger.NET. Los componentes de la estación son mostrados en la Figura 11.

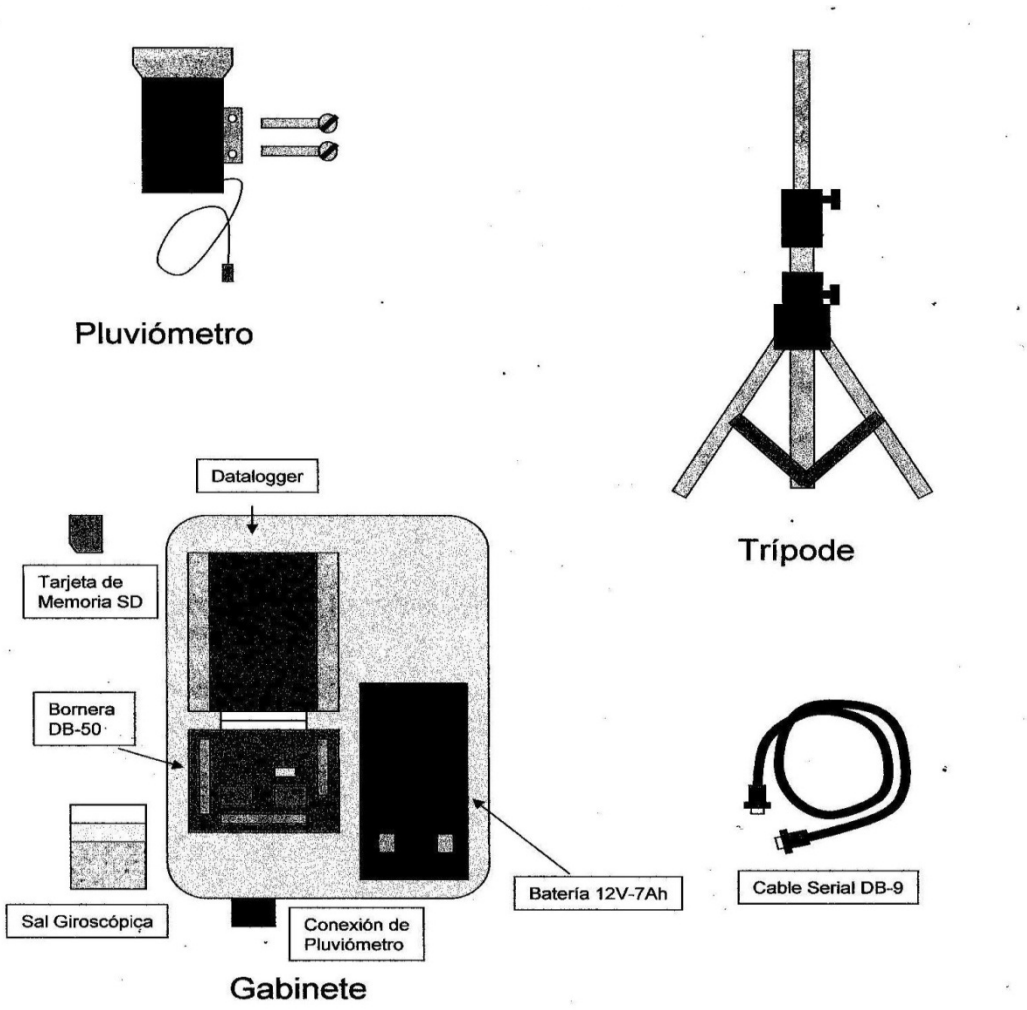


***Figura 11*. Componentes del sistema de medición de precipitación. [*Fuente:* Manual de instrucciones del dispositivo AquaCalc Pro 5000, JBS Instruments, 2008]**

	Medición de caudal	

Fecha: ___Transversal:_____ sector: _____

%prof: _____ ancho del cauce: _____

Estación	Distancia(m)	Profundidad(m)	Velocidad(m/s)
Σ		Vprom	

Q(m/s):

***Figura 12*. Formato de recolección de datos de escorrentía. [Creación Propia, 2012]**

3.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTRO

Para la selección del sitio de recolección de datos se localizó un tramo del cauce que presentará un alineamiento relativamente recto y uniforme, sin presencia de obstáculos grandes como piedras, troncos de árboles, tuberías o cualquier otro elemento que pudiera causar algún tipo de turbulencia que impida el libre flujo de agua en el río. El sector se escogió tomando en cuenta una zona bastante desfavorable, debido a la presencia de gran cantidad de áreas destinadas a la actividad agrícola, considerando que en ese sitio se genera la mayor deficiencia de caudal debido a la demanda producida por dichas áreas agrícolas, además de lo antes mencionado es importante resaltar que la zona de estudio es de fácil acceso para la toma de mediciones.

3.6 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se llevará a cabo en las siguientes fases:

1. Fase Diagnóstico
2. Fase de Recolección de Datos
3. Fase de Procesamiento de Datos
4. Fase de Análisis de Resultados

3.7 FASE DIAGNÓSTICO

En esta fase se seleccionó la zona de estudio de la cuenca del río Unare la cual tiene un área aproximada de 22.753 km^2, localizada en la Depresión de Unare abarcando 22 municipios, 14 del Estado Anzoátegui y 8 de Guárico; con clima predominante de bosque seco tropical, relieve de colinas bajas; en dicha región se han construido 12 embalses y 2000 lagunas artificiales; destacándose como actividades humanas la agrícola, urbana y forestal, para el estudio de esta cuenca se realizó el análisis de las cuenca de los ríos Guanape, Guaribe, Tamanaco, Ipire, y Güere, los cuales componen las cabeceras del río Unare, con el fin de determinar el caudal pico creciente generado luego de la confluencia de todos estos ríos, es decir, al inicio del río Unare, detalles de ubicación de la zona podrán ser consultados en las cartas topográficas que posteriormente serán citadas en este Capítulo.

3.8 FASE DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Esta fase involucró recolectar la información requerida para la elaboración del estudio, para lo cual fue preciso; adquirir las cartas topográficas ante el Instituto Geográfico de Venezuela “Simón Bolívar” (IGVSB), digitalizar dichas cartas topográficas, la información de usos de la

tierra y tipos de suelos para la zona de estudio, así como procesar la información hidrológica suministradas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

3.8.1 Cartas Topográficas

Las cartas topográficas oficiales usadas para delimitar la cuenca del río Unare fueron suministradas por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) a escala 1:100.000, un total de 18 cartas las cuales se ubicaron según sus coordenadas como en la **figura 13**. Las cuales se pueden observar en el Apéndice B.

		7146		
6945	7045	7145	7245	
6944	7044	7144	7244	7344
6943	7043	7143	7243	7343
	7042	7142	7143	

Figura 13. **Ubicación de las cartas geográficas que forman la cuenca.**

3.8.2 Uso de la tierra y tipo de suelo

El uso de la tierra y tipo de suelo fueron consultados en el manual “Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001”, este documento contiene una metodología para la definición de regiones, sub-regiones y áreas naturales del país y fue suministrado por el Ministerio Del Poder Popular Para El Ambiente Y Los Recursos Naturales Renovables (MPPARN), esta información fue relevante para la obtención del parámetro hidrológico Número de Curva, usado para estimar la escorrentía generada por la tormenta.

3.8.3 Información Hidrológica

La información relativa a registros de lluvias y caudales fue suministrada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

Objetivo 1: Describir las características del proceso lluvia-escorrentía mediante obtención de datos de las red de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas de la cuenca del rio Unare. El proceso de lluvia-escorrentía será caracterizado mediante la representación gráfica de las mediciones de lluvia y escorrentía. La lluvia es medida a través de tres fluviógrafos acoplados a un sistema de almacenamiento electrónico ubicado

en la cuenca del rio Unare. La escorrentía es medida, usando un correntímetro de copas, mediante el cual se obtiene la velocidad en diferentes estaciones dentro dos secciones transversales del rio Unare. La sección transversal ha sido seleccionada en la desembocadura de la cuenca.

3.9 FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

En la segunda fase se procesan los datos mediante el uso del software STATGRAPHICS Centurion XV v.15.2.06, el cual será usado para modelar los datos de precipitación y posteriormente analizar estos resultados con la aplicación de técnicas de modelación del proceso lluvia-escorrentia; así como la secuencia de actividades ejecutadas durante la aplicación de los programas para determinar las zonas de planicies inundables; mas adelante se describirán los siguientes procesamientos:

- Procesamiento con HEC-GeoHMS
- Procesamiento con HEC-HMS
- Procesamiento con HEC-RAS
- Procesamiento con HEC-GeoRAS

Estos programas son extensiones del software base ArcGis 10 y deben ser descargadas de forma adicional en la página de los desarrolladores del software, la compañía ESRI (Enviromental Systems

Research Institute), las extensiones HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS funcionan dentro de la plataforma de ArcGis 10 mientras que en el caso de HEC-HMS y HEC-RAS ambas herramientas poseen su propia plataforma.

Objetivo 2: Calibrar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptado a la cuenca del rio Unare. La estimación de la escorrentía será realizada mediante la modelación matemática del proceso. La modelación consiste en la calibración de las ecuaciones y la obtención de los parámetros o coeficientes de las variables incluidas dentro de los procesos. Las variables representan la magnitud de la lluvia ocurrida dentro de eventos de tormentas. La escorrentía está representada por el caudal asociado a cada evento de precipitación, medido en el cauce como se indicó en la primera fase.

Objetivo 3: Simular modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del rio Unare. Los resultados de la calibración se utilizaran para simular los procesos de lluvia-escorrentía cuyos resultados son analizados cualitativa y cuantitativamente, mediante observación de gráficas de mapas de planicies inundables.

3.10 ANALISIS DE RESULTADOS

En la tercera fase, los resultados de la modelación son juzgados mediante la comparación de las técnicas y la evaluación de los ajustes de los modelos a las observaciones.

Objetivo 4: Comparar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptado a la cuenca del rio Unare. La comparación de los resultados de la modelación se hará en términos del coeficiente de determinación y los errores. La evaluación del ajuste es realizada mediante la comparación de los resultados obtenidos en este estudio a partir de los distintos modelos de transformación del proceso lluvia-escorrentía.

Objetivo 5: Validar modelos del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del rio Unare. Los resultados son analizados cualitativa y cuantitativamente, en el primer caso mediante observación de gráficas de observados versus estimado. En el segundo caso, mediante análisis de los estadísticos siguientes: coeficiente de determinación y los errores.

3.11 PROCESAMIENTO CON HEC-GEOHMS

El procesamiento con HEC-GeoHMS implica describir los pasos a ejecutar en ArcGIS 10 y HEC-GeoHMS, así mismo dentro de HEC-GeoHMS fue preciso describir el procedimiento ejecutado.

3.12 TRABAJO EN ARCGIS 10

Para iniciar el trabajo en ArcGIS 10, en la raíz **"C"** de la máquina se creó una carpeta dándole el nombre: Manual**,** dentro de la cual se copiaron los archivos curvas.dwg, rios.dwg, cuencas.dwg y subcuencas.dwg, como se muestra en la Figura 14; estos archivos se crearon previamente en la digitalización de las cartas, la metodología empleada para ello puede verse con detenimiento en el Apéndice B

A partir de estos archivos generados con el uso de los programas Autocad 2010 Raster Design 2010 se representará el Modelo Digital de Terreno (MDT).

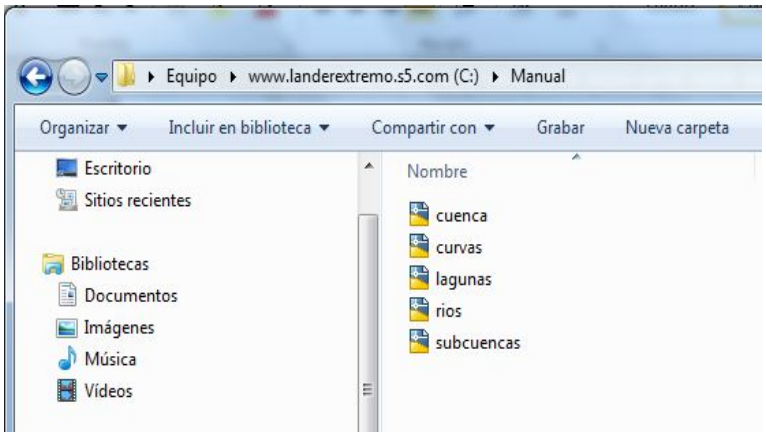


***Figura 14*. Archivos CAD del proyecto**

3.12.1 Creación de un proyecto en ArcGIS 10

El paso siguiente implica la creación de un proyecto en ArcGIS 10. Para crear un nuevo proyecto en ArcGIS 10, se hizo doble click en el ícono

del programa ArcMap 10 desde el directorio de trabajo en Windows, indicado en la Figura 15

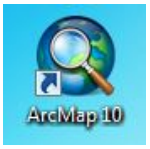


Figura 15. **Icono de ArcMap 10**

De igual forma podría hacerse desde el menú inicio como se muestra en la Figura 16

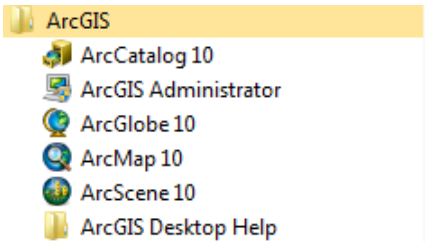


Figura 16. **Icono de ArcMap 10 en el Menú Inicio**

Una vez que el programa abrió, se activó el cuadro de diálogo **Getting Started (Primeros Pasos)**, como se indica en la Figura 17, del cual se seleccionó la opción **Blank Map (Mapa Vacio).**

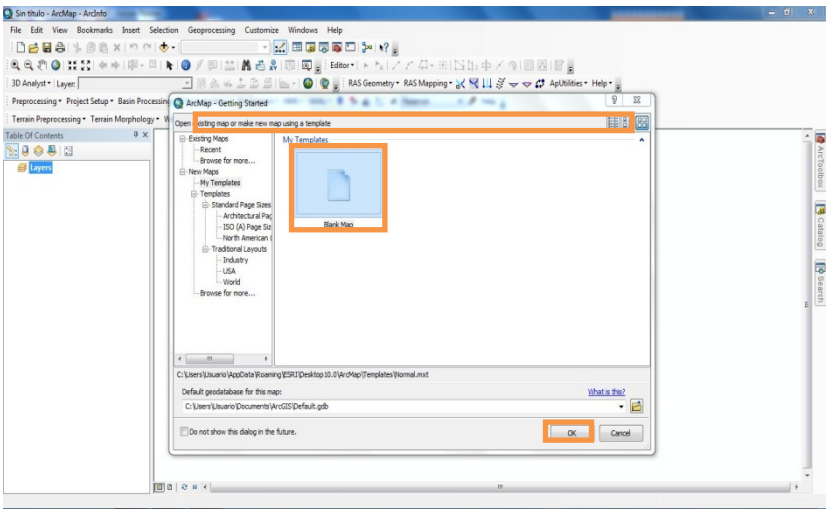


Figura 17. **Abrir un Mapa en Blanco**

3.12.2 Extensiones

Para activar las extensiones de los módulos de ArcGis 10, desde el menú **Customize (personalizar)** se seleccionó la opción **Extensions (Extensiones),** como se indica en la Figura 18

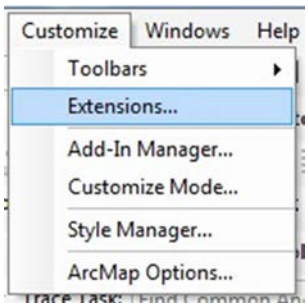


Figura 18. **Selección de la opción Extensions (Extensiones) en ArcGIS 10**

La selección de la opción **Extensions (Extensiones)** desplegó el cuadro de diálogo **Extensions (Extensiones),** donde se encuentran los módulos disponibles en **ArcGIS 10** para procesamiento de imágenes, los cuales fueron activados posicionando el puntero del mouse sobre los cuadros en blanco ubicados a la izquierda de cada módulo, se observó que el puntero cambió de flecha a una tilde previo a ejecutar el click y que permaneció sobre el cuadro una vez seleccionada cada una de las opciones, lo cual garantiza que dichos módulos estarán activos para el trabajo en ArcView GIS 3.2, se activó la opción **Make Default (Crear por defecto)**, que garantiza que estas opciones estarán activas cada vez que se abra dicho proyecto y finalmente se pulsa **OK** para cerrar el cuadro. Ver Figura 19.

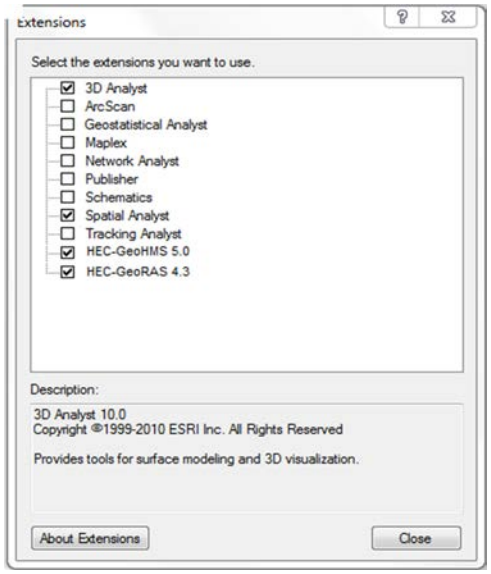


Figura 19: **Selección de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10**

En la Figura 15 se observa la selección de las extensiones, entre las cuales se garantizó la selección de los módulos **3D Analyst, Spatial Analyst** y **HEC-GeoHMS 5.0** y **HEC-GeoRAS 4.3**, los cuales son las principales extensiones para el procesamiento del MDT.

3.12.3 Agregar Barras de Herramientas al menú principal

A continuación se cargaron las barras de las extensiones haciendo click con el botón derecho sobre un área libre en la barra de menú. Ver figura 20 y figura 21

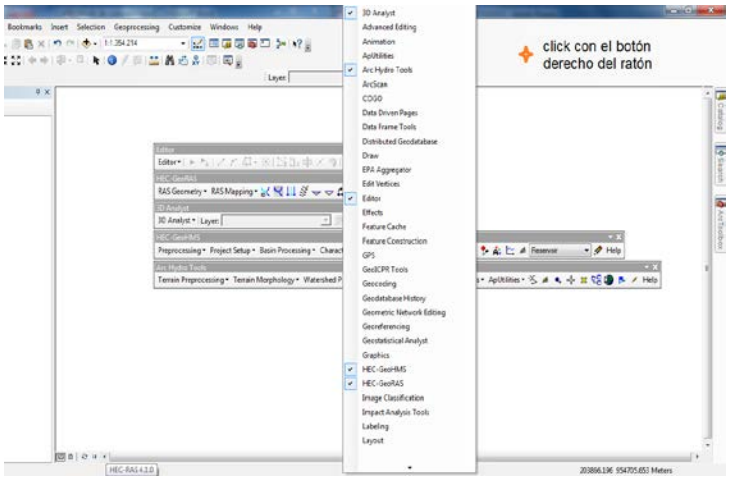


Figura 20. **Selección de las barras de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10**

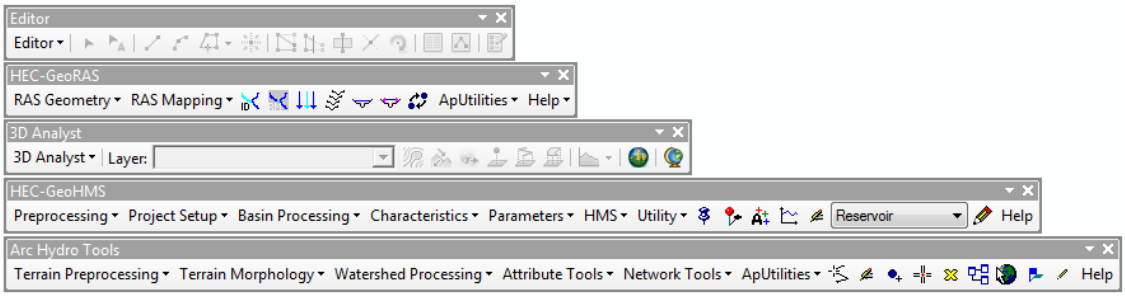


Figura 21. **Barras de las Extensiones de trabajo de ArcGIS 10**

3.12.4 Carga de archivos para la generación del MDT

El siguiente paso fue cargar los archivos generados en Autocad 2010 necesarios para generar el MDT.

Se abrió ArcCatalogo y se seleccionó el archivo de Autocad con las curvas de nivel. Ver figura 22

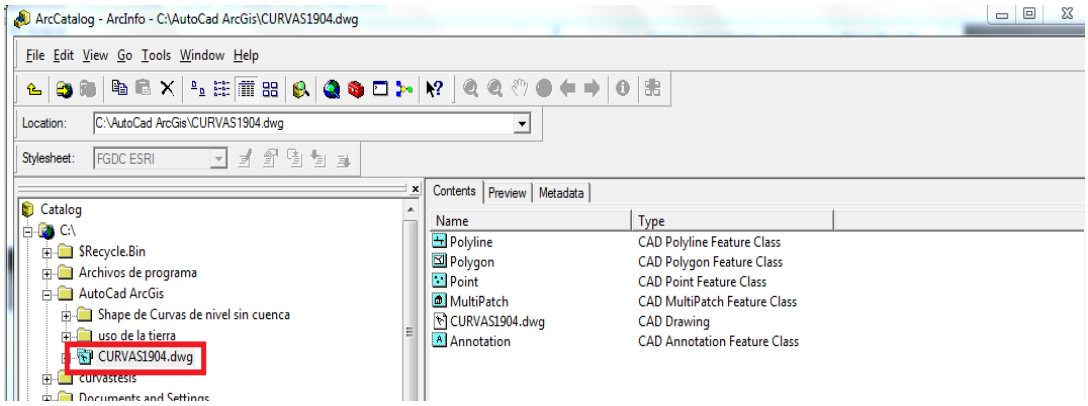


Figura 22. **Ubicación del archivo de Curvas de Nivel del proyecto en ArcCatalogo**

3.12.5 Asignar un sistema de coordenadas

Una vez cargado el archivo se seleccionó el sistema de referencia a trabajar, en este caso es el Sistema de Coordenadas Proyectado ***WGS 1984 UTM Zone 20N,*** para ello se hace Click derecho sobre el archivo CURVAS1904.dwg y se selecciona Properties (Propiedades), en la pestaña General (General) se selecciona Edit (Editar), y en la nueva ventana en la pestaña Spacial Reference Properties (Propiedades de la Referencia Espacial) pulsar el botón Select (Seleccionar), ir al sistema de coordenadas deseado y presionar Add (Añadir). Ver Figura 23. El mismo procedimiento se realizó para cada uno de los archivos que se utilizaron para generar el MDT.

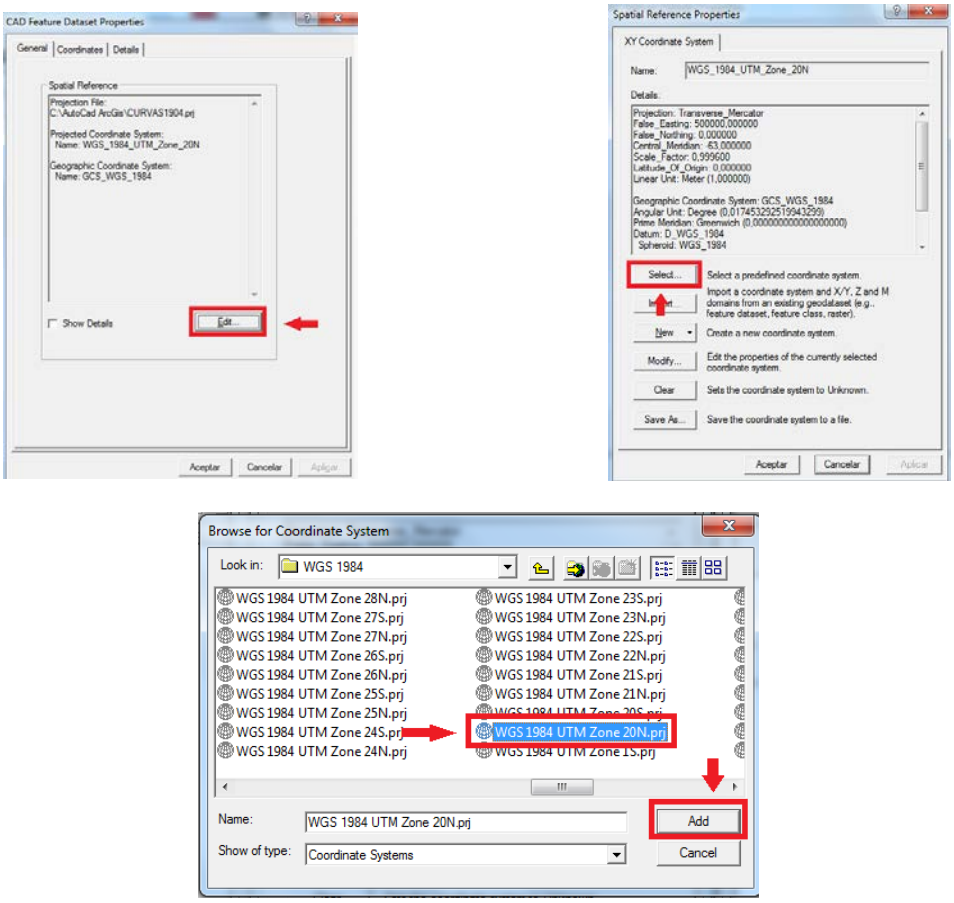


***Figura 23*. Añadir una Referencia Espacial al archivo de trabajo**

Se asignaron los sistemas de coordenadas para los archivos: curvas.dwg, rios.dwg, lagunas.dwg, cuencas.dwg y subcuencas.dwg

3.12.6 Crear un Archivo de Forma (Shape File)

El siguiente paso fue Crear un Shapefile (Archivo de forma) que son archivos de extensión .shp, para ello se hizo click derecho sobre el archivo, en este caso CURVAS1904.dwg, luego se seleccionó Export (Exportar) y por

ultimo ShapeFile (archivo de forma). Ver Figura 24. El mismo procedimiento se realizó para cada uno de los archivos que se utilizaron para generar el MDT.

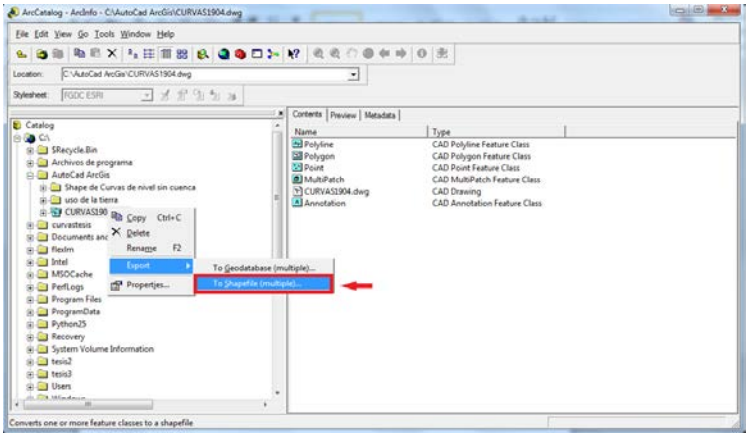


***Figura 24*. Convertir archivos (.dwg) en un Archivo de Forma (.shp)**

Se crearon los archivos de forma para los archivos: curvas.dwg, rios.dwg, lagunas.dwg, cuencas.dwg y subcuencas.dwg

3.12.7 Añadir Datos (Add Data)

Una vez convertidos a ShapeFile (Archivo de Forma) todos los archivos necesarios para generar el MDT el siguiente paso es añadirlos a la capa de trabajo pulsando el botón ADD DATA (Añadir Datos) de la barra de herramientas estándar seleccionando los archivos. Ver figura 25

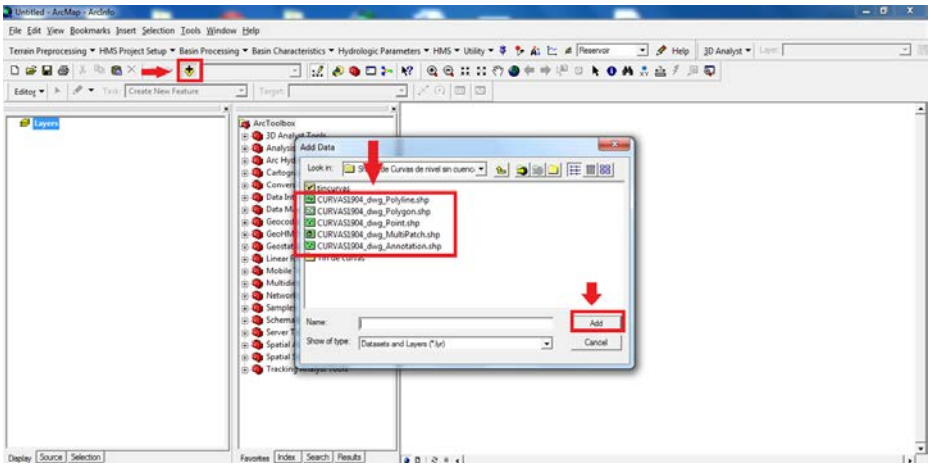


Figura 25. **Añadir Capas de Archivos de trabajo.**

Una vez añadidos los archivos, en la ventana se mostraron las capas cargadas como se observa en la figura 26.

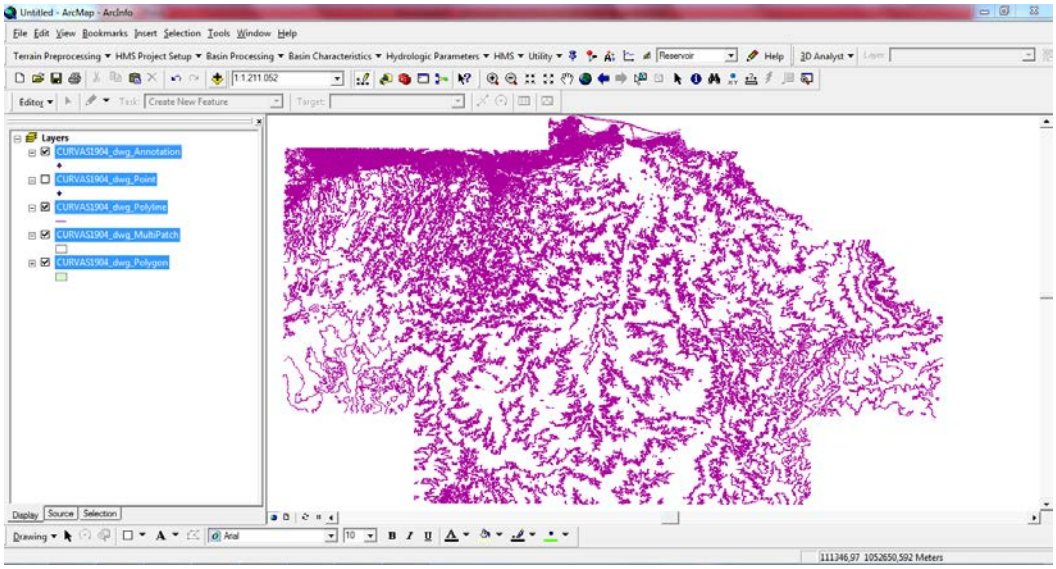


Figura 26. **Archivo de Curvas de nivel Cargadas en ArcMap**

Se añadieron los archivos de forma: curvas.shp, rios.shp, lagunas.shp, cuencas.shp y subcuencas.shp creados en el paso anterior.

3.12.8 Crear una triangulación de Redes Irregulares (Triangular Irregular Networks – TIN)

Luego se creó un **Triangular Irregular networks** (Triangulación de Redes Iregulares) – **TIN**, en base a las curvas de nivel; Con la herramienta ArcToolbox se seleccionó la pestaña 3D Analyst Tools (Herramientas de análisis 3D) se selecciónó la pestaña **TIN Creation** (Creación de TIN) y por ultimo **Create TIN** (Crear TIN). Ver Figura 27

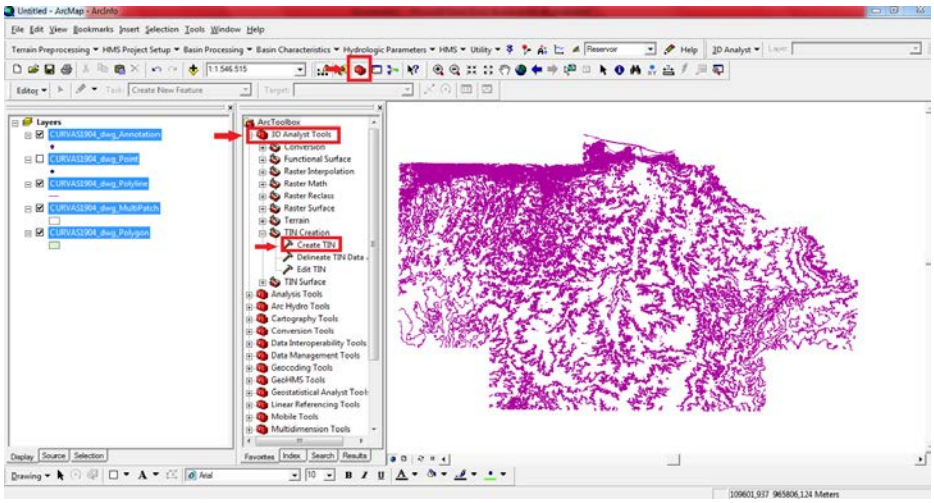


Figura 27. Creando TIN a partir de las curvas de nivel

A continuación se desplegó una ventana donde se le asignó el nombre y la carpeta del directorio donde se guardó el TIN generado así como el sistema de Coordenadas. Ver Figura 28

Figura 28. Creando TIN a partir de las curvas de nivel

Se asignó el nombre al archivo TIN: ***tincurvas*** y se presionó el botón Save (guardar). Ver Figura 29

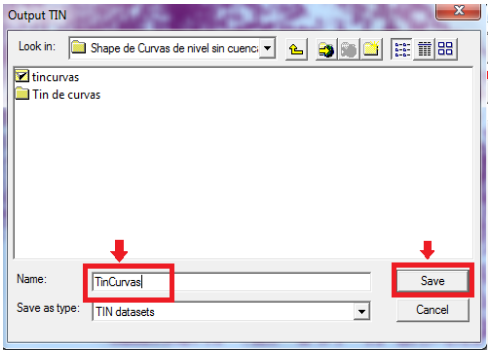


Figura 29. **Guardando el archivo Tincurvas**

3.12.9 Crear un TIN desde un archivo de Características (Create TIN from Features)

Con la herramienta 3D Analyst tolos (Herramientas de análisis 3D) en la barra de menú se seleccionó ***Create/Modify TIN (Crear/Modificar TIN)***, que generó una lista desplegable en la cual se escogió la opción de ***Create TIN From Feature (Crear TIN desde Características).*** Ver Figura 30

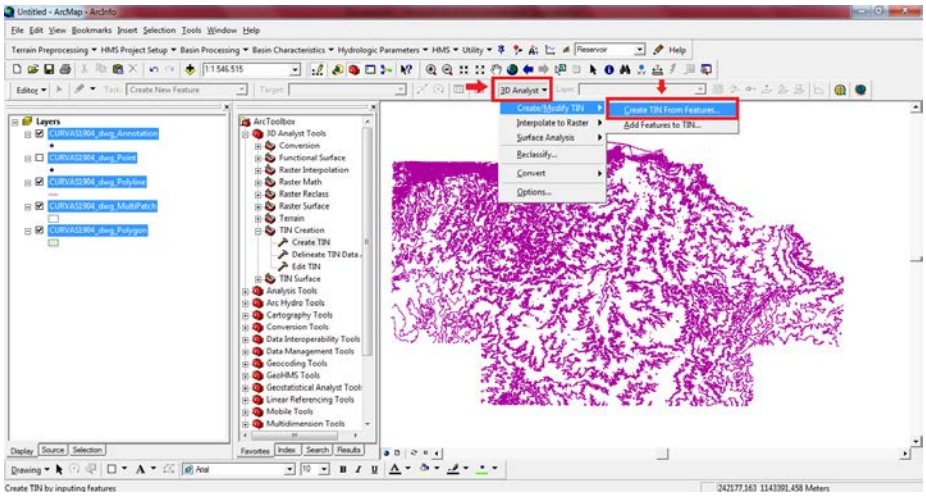


Figura 30. **Creando TIN desde Características**

Se abrió una ventana donde se seleccionó la capa de archivo a la cual se le creó el TIN y la carpeta del directorio destino. Este TIN fue creado solo con la capa de Curvas de nivel. Ver figura 31

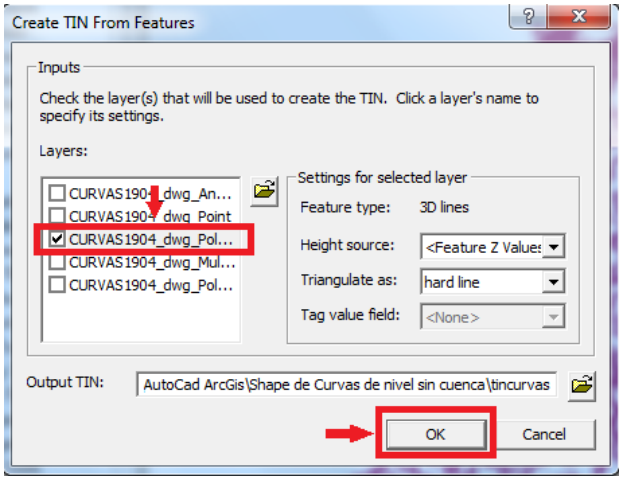


Figura 31. Guardando el TIN desde Características.

El resultado de la creación del TIN se muestra en la figura 32.

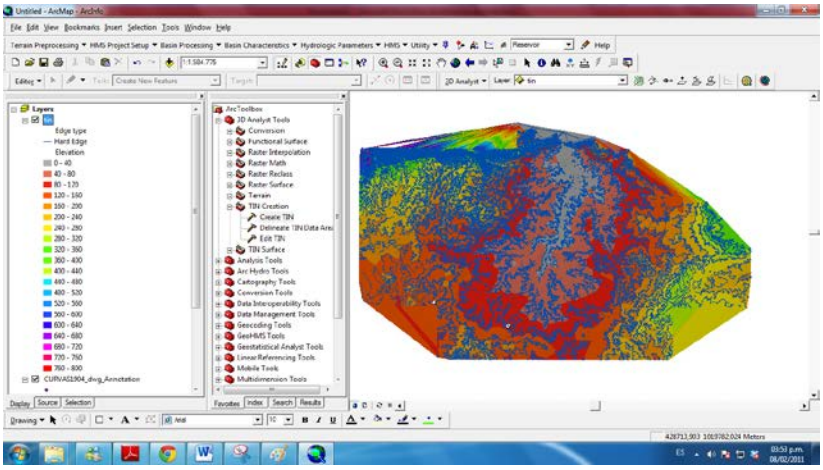


Figura 32. **Resultado de la creación del TIN**

3.12.10 Convertir un TIN a un archivo Raster (Convert Tin to Raster)

El siguiente paso fue generar un archivo rasterizado del TIN, desde ***3D Analyst Tools*** (Herramientas de análisis 3D) se seleccionó ***Convert*** (Convertir) y en la lista desplegable se seleccionó ***TIN to Raster (TIN A Raster).*** Ver Figura 33

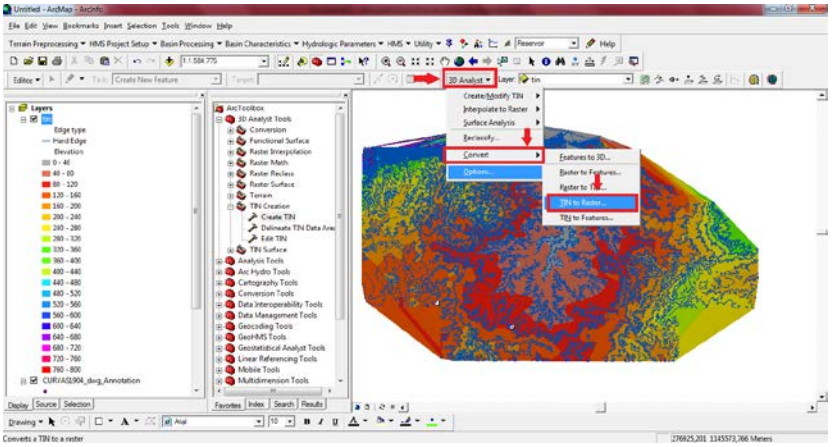


Figura 33. **Convirtiendo TIN a Raster**

Se abrió la siguiente pestaña donde se seleccionó el directorio de destino del raster creado y se pulsó ***OK.*** Ver Figura 34.

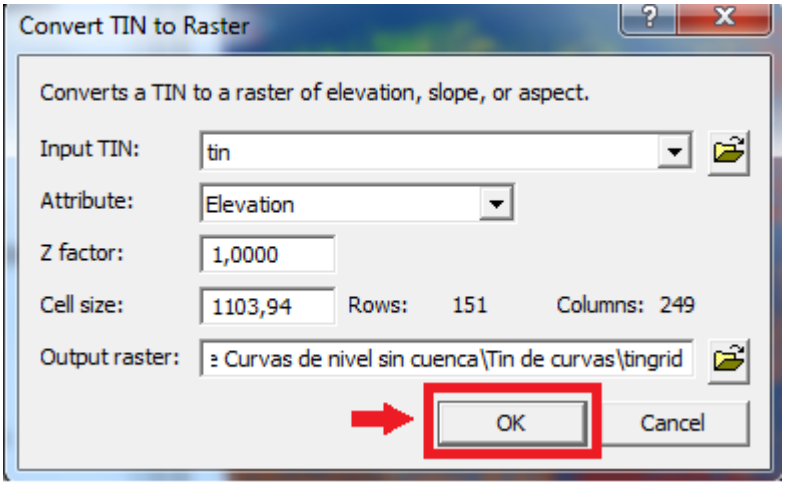


Figura 34. **Guardando el Raster generado.**

El resultado de la creación del raster se observa en la figura 35:

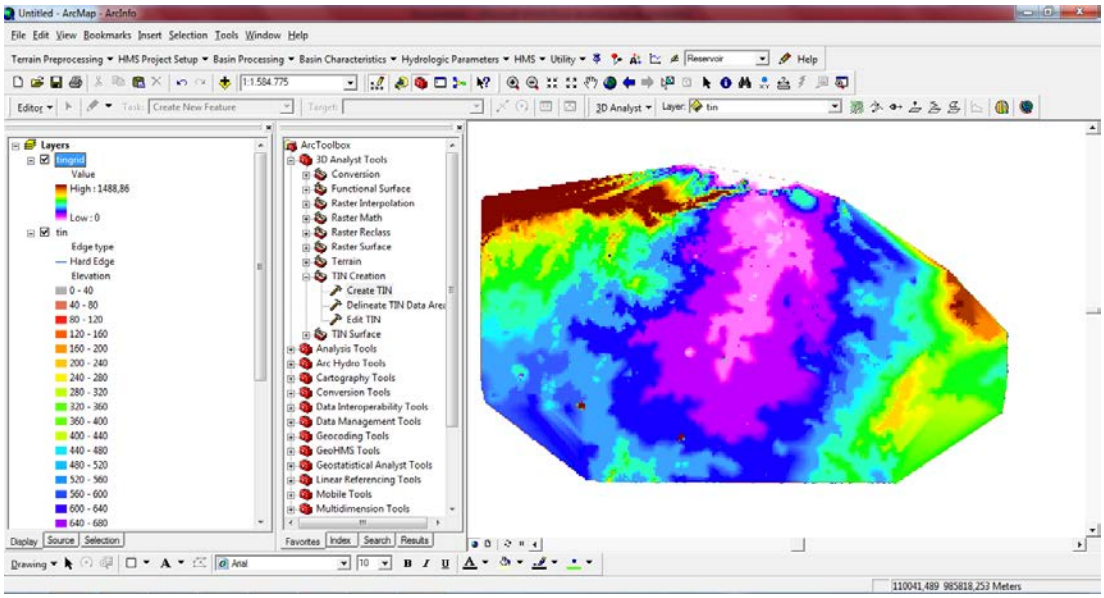


Figura 35. **Resultado de la creación del Raster**

3.13 PREPROCESAMIENTO DEL TERRENO (Terrain Preprocessing)

Para el trabajo en HEC-GeoHMS se requiere desarrollar ciertas actividades, lo cual implica desarrollar el pre-procesamiento del terreno y posteriormente, sobre la base de estas modificaciones se desarrollan acciones en el documento que contendrá el proyecto.

El Preprocesamiento del terreno constituye el primer paso en el desarrollo de un proyecto de HEC-GeoHMS. En este paso, un modelo del terreno se utiliza como entrada para obtener un conjunto de ocho procedimientos que, en conjunto describen el patrón de drenaje de la cuenca y permite la delimitación de corrientes y subcuencas. Los cinco primeros procedimientos son capas en formato GRID que representan la dirección del flujo, la acumulación de flujo, la red hídrica, la segmentación de los ríos, y la delimitación de cuencas hidrográficas. Los siguientes dos procedimientos son capas vectoriales de las cuencas y de los arroyos. El último, de cuencas agregadas, se utiliza principalmente para mejorar el rendimiento en la delimitación de las cuencas.

Los datos del terreno se procesan y se analizan mediante un método de aproximación de 8 puntos cercanos para determinar las trayectorias de flujo. Este método utiliza la pendiente más pronunciada para definir la dirección en la que el agua fluye desde una celda hacia alguno de sus

ocho vecinos más cercanos. Después que el pre-procesamiento del terreno se ha completado, los datos resultantes sirven como una base de datos geoespacial; con la información centralizada en esta base de datos, los que sean requeridos se pueden extraer para el trabajo posterior en la construcción de los modelos hidrológicos. Las cuencas hidrográficas y la delimitación preliminar del flujo, proporcionan resultados que puedan ser verificados con la información publicada anteriormente para detectar posibles errores en los datos del terreno. Si se detectan errores, el MDT debe ser editado. La barra de herramientas de HEC-GeoDozer contiene una serie de herramientas para la modificación de los datos sobre el terreno. La barra de herramientas de HEC-GeoDozer y la documentación se puede descargar desde el sitio web de HEC-GEOHMS. Cuando el MDT ha sido revisado para representar mejor las condiciones del campo, debe ser procesado de nuevo para actualizar la base de datos espacial.

3.13.1 Características y Funcionalidad

El menú de pre-procesamiento del terreno se muestra en la Figura 36. El menú está diseñado para que el usuario comience desde la parte superior y trabaje hacia abajo para desarrollar una corriente inicial y delimitar las subcuencas. Las herramientas DEM Reconditioning (reacondicionamiento del MDT) y Build Walls (Construcción de muros), son opcionales y se pueden

utilizar para editar los datos del terreno usando un flujo existente y los límites de las subcuencas conocidas. Una vez que el procesamiento del terreno se haya completado, los datos pueden ser extraídos para apoyar la creación modelo hidrológico a través del menú HMS Model Setup (configuración del modelo HMS).

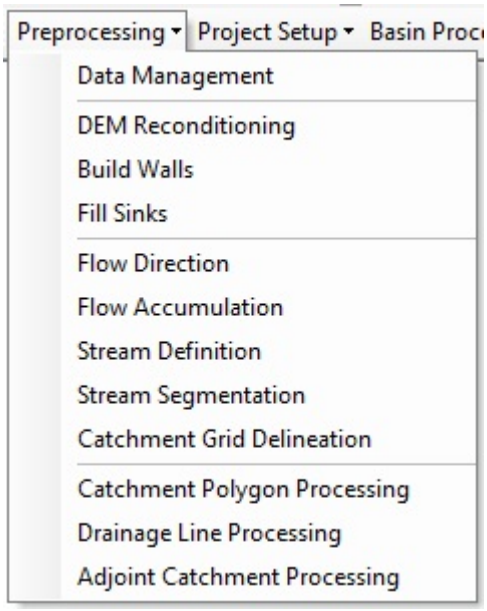


Figura 36. **Menú del Preprocesamiento del terreno.**

3.13.2 Gestión de Datos

Los datos derivados del HEC-GEOHMS se gestionan a través de la asociación de rol. Por ejemplo, cuando el MDT se añade como documento en el ArcMap, HEC-GEOHMS lo asociará con "**RawDEM**", que es el MDT original. Cuando la herramienta **FILL (Relleno)** se utiliza, el programa ofrecerá automáticamente el "**RawDEM**" como valor predeterminado en la

creación de un MDT sin depresiones. Aparte de la asociación de datos según su rol, el **Data Management (Gestión de datos)** permite al usuario la posibilidad de cargar otros conjuntos de datos y asignar un rol a cada uno de ellos. Por ejemplo, si el usuario ha desarrollado archivos con una dirección del flujo y de acumulación de flujo en otro programa, podrá agregar estos datos en forma de capas y asignarles sus funciones. Esta es una buena manera de mantener un registro de datos a medida que se generan. El campo de entrada NULL (nulo) indica que la capa apropiada no ha sido creada y/o asignada. Cuando las capas apropiadas se crean, sus nombres remplazan el campo de entrada nulo. Ver figura 37.

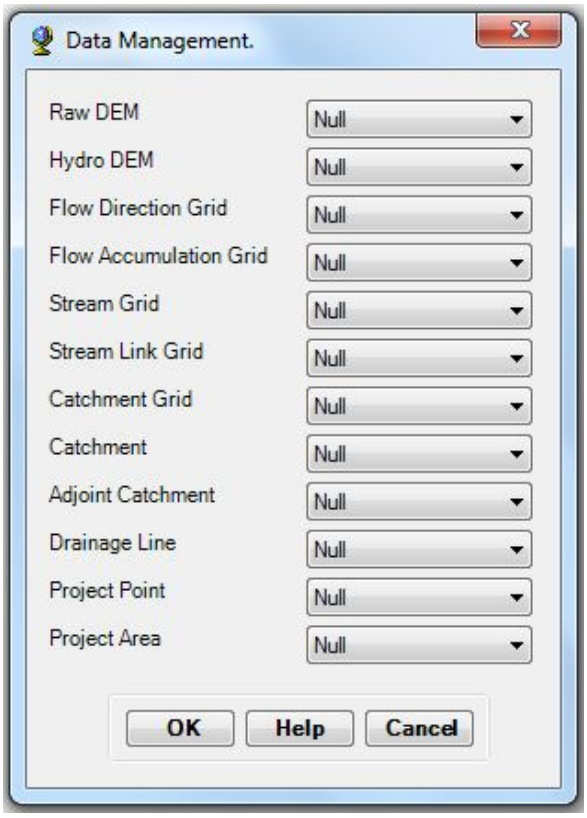


Figura 37. **Menú de Gestión de Datos**

3.13.3 Terrain Reconditioning (Reacondicionamiento del terreno)

Básicamente existen dos técnicas de quemado para forzar una red de arroyos en el MDT. La primera es una técnica de "quemado simple" que permite al usuario bajar abruptamente la elevación de las celdas de corriente por una cantidad fija. Similar a esta técnica, el método de DEM Reconditioning (Reacondicionamiento del MDT) permite al usuario reducir la elevación de la celda de corriente y también proporciona una opción para reducir gradualmente las celdas vecinas a lo largo de la secuencia. Este método crea una transición gradual desde el desbordamiento del arroyo. Este método se puede utilizar para eliminar el indeseable efecto secundario de islas ficticias cerca del eje central de la corriente. Ver figura 38.

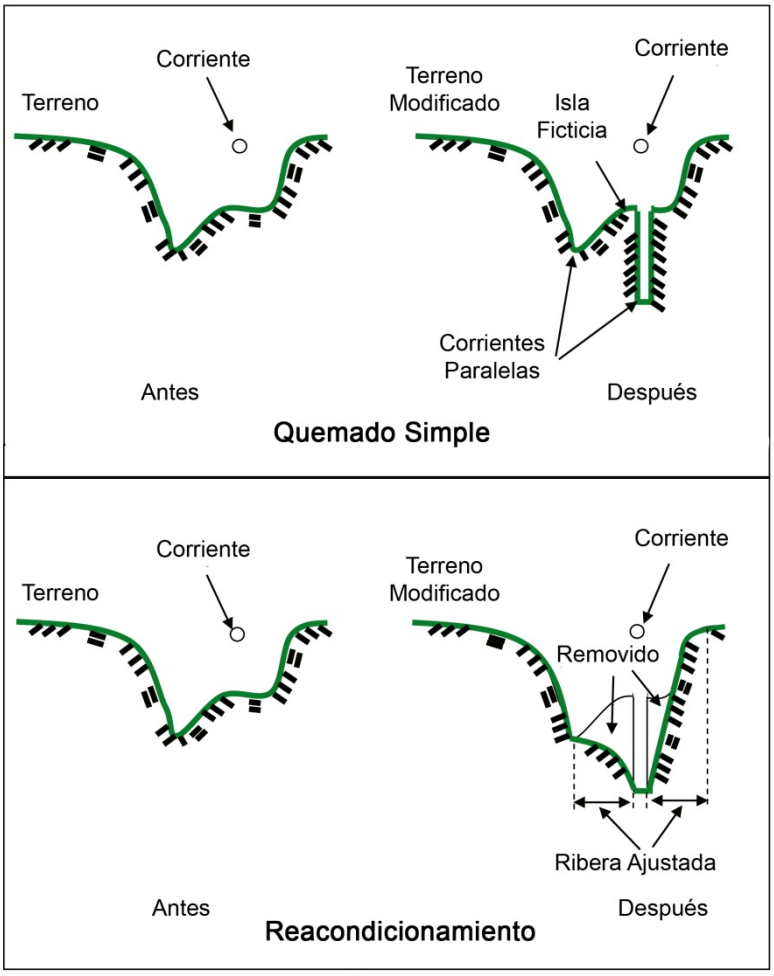


Figura 38. **Comparación de las técnicas de quemado. Fuente: Manual de Usuario de la extensión HEC-GeoHMS**

La herramienta DEM Reconditioning (Reacondicionamiento del MDT) requiere dos datos de entradas, un MDT que será el **RAWDEM** y una capa de líneas de corrientes real que será el **AGREE Stream**. La función genera un MDT reacondicionado. Ambas capas de datos de entrada deben estar en el mismo sistema de coordenadas proyectadas.

Entonces, en la herramienta de reacondicionamiento de MDT, se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **DEM Reconditioning** (reacondicionamiento de MDT). Después de abrir la herramienta, se seleccionó el MDT como RAWDEM, se seleccionó la capa de corrientes la cual proviene de la digitalización de las cartas geográficas; y se le dio el nombre del MDT de la salida. A continuación, se configuraron tres parámetros de reacondicionamiento, como se muestra en la figura 39.

- **Number of cells for Stream Buffer** (Número de celdas para el Ajuste de las Riberas) - Este es el número de celdas alrededor del eje central de la corriente sobre la cual ocurrirá el suavizado de pendientes. En este campo se dejó el valor 5, que es su valor por defecto.

- **Smooth Drop in Z Units** (suavizado del ajuste del cauce en el eje Z) - Esta es la cantidad de elevación (en unidades verticales) que se reducirán la celdas de la cuadrícula. Este valor se utiliza para interpolar una pendiente suave entre la ribera del cauce y el eje central de la corriente. Si el número es negativo y la opción de elevar los valores negativos se permite, el programa aumentará las celdas de la cuadrícula. En este campo se dejó el valor 10, que es su valor por defecto.

- **Sharp Drop in Z Units** (Ajuste del eje central del cauce en el eje Z) - Es la cantidad de elevación adicional (en unidades verticales) que se reducirán las celdas de la red, esta cantidad adicional de quemado del

terreno es la que ajustará el eje central del cauce de modo que se garantice el que flujo transite por él. En este campo se dejó el valor 1000, que es su valor por defecto.

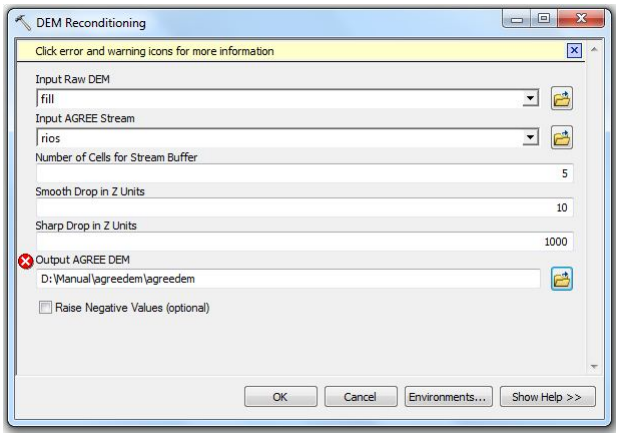


Figura 39. **Editor del Reacondicionamiento del DEM**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 40.

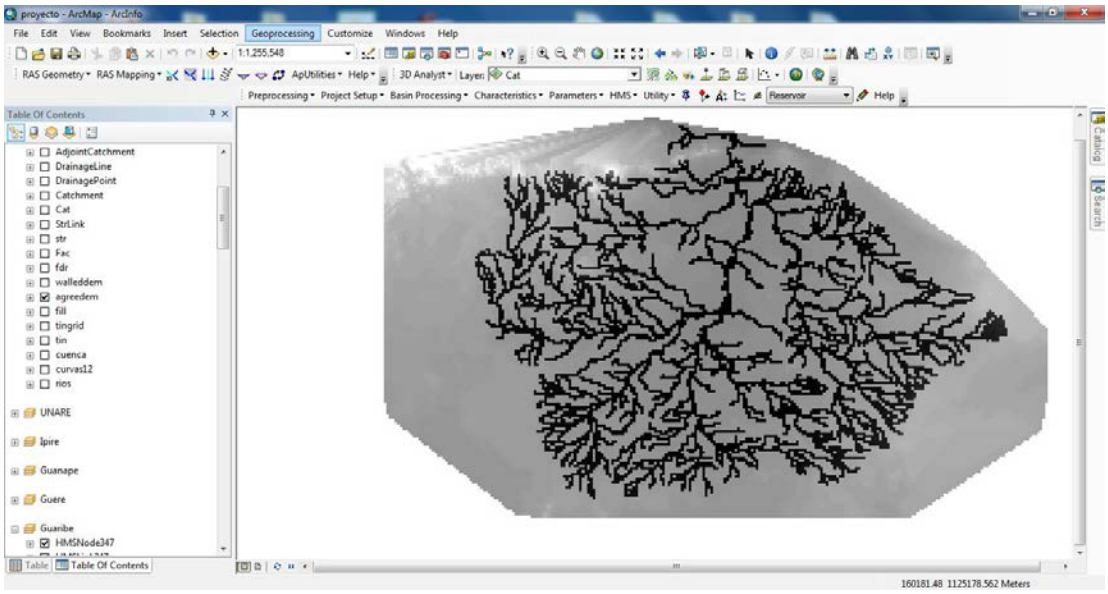


Figura 40. **Resultado del Reacondicionamiento del DEM**

3.13.4 Build Walls (Construcción de Muros)

Otra herramienta útil para editar los datos del terreno es la herramienta Build Walls (Construcción de muros). Las delimitaciones previas de las subcuencas o las provenientes de estudios anteriores pueden ser usadas para construir muros en el terreno, esto asegurara que los datos de las subcuencas delimitadas sean los mismos datos existentes.

El editor de Construcción de muros se muestra en la Figura 41. El usuario debe definir el MDT de entrada y una capa de polígonos de los límites de la subcuenca. Se pueden definir tanto los limites de la cuenca entera como los limites de las subcuencas, pero sólo una es necesaria. La capa **Outer Wall Polygon** representa el límite de la cuenca entera y la capa **Inner Wall Feature** representa las subcuencas dentro de la cuenca de drenaje. La capa **Breach Line** se utiliza para representar la red de cauces. El programa no eleva las celdas situadas por debajo de las líneas que representan los cauces. Esto permite que el agua fluya fuera de las zonas "amuralladas" (otra opción sería la de ejecutar la herramienta de reacondicionamiento de MDT después de ejecutar la herramienta Construir Muros). La altura de la pared interior se utiliza para elevar las cuadrículas en el MDT de entrada, esto superpone sobre ella los límites trazados en la capa que representa las subcuencas. La altura de la pared exterior será el doble de la altura de la pared interior.

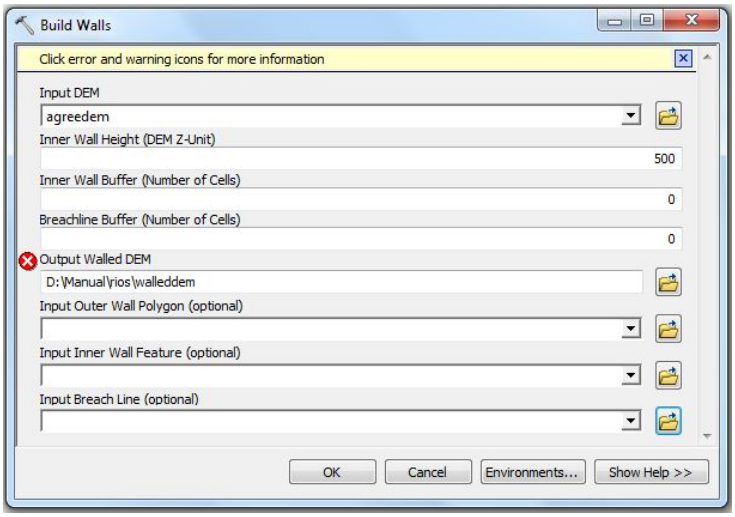


Figura 41. **Editor de la Construcción de Muros**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 42.

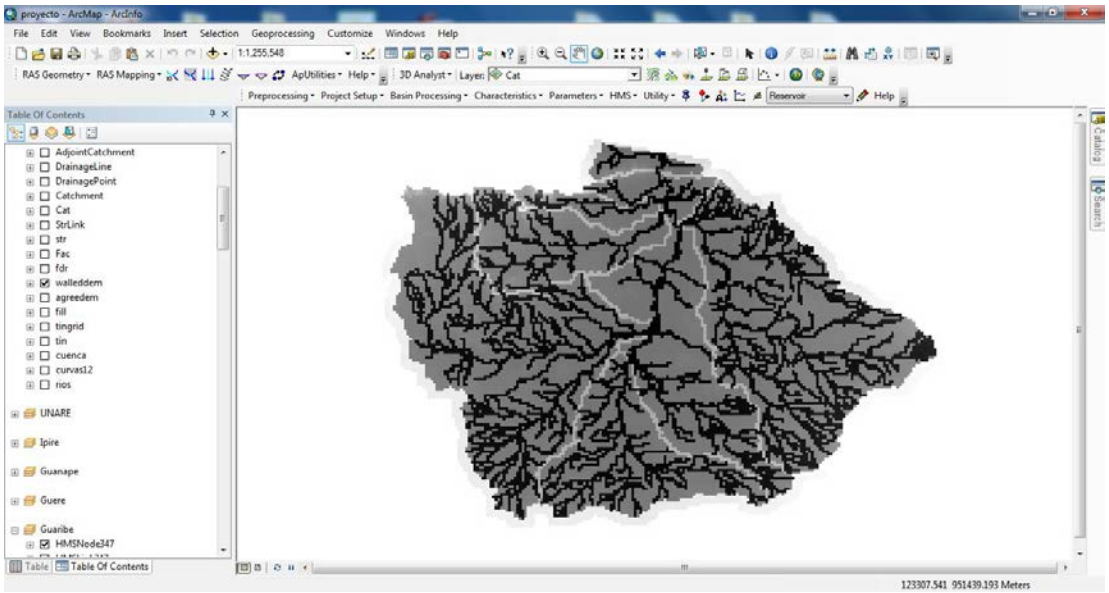


Figura 42. **Resultado de la Construcción de Muros**

3.13.5 Relleno de Depresiones (Fill Sink)

Después que se obtiene esta modificación del MDT, se debe utilizar la herramienta FILL (relleno) para eliminar los potenciales sumideros generados en el proceso de reacondicionamiento.

El MDT sin depresiones se crea rellenando los hoyos aumentando la elevación de las celdas mas profundas hasta el nivel del terreno circundante. Las celdas mas profundas a menudo son consideradas como errores en el MDT debido a la interpolación en la triangulación de las elevaciones. Por ejemplo, en un grupo de tres por tres celdas, si la central tiene una elevación más baja en comparación con las 8 vecinas a dicha celda se le incrementara su elevación igualando a la más baja siguiente. El llenado de las depresiones permite que el agua fluya a través del paisaje. Esta suposición generalmente es valida, cuando una tormenta llena las pequeñas depresiones y cualquier cantidad incremental del agua desplaza la misma cantidad de agua que llenó de la depresión.

Los pasos para rellenar las depresiones se muestran a continuación:

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Fill Sinks** (relleno de depresiones).
- El editor de los sumideros de relleno se muestra en la Figura 43. Se especificó el MDT de entrada (también referido como el RawDEM).

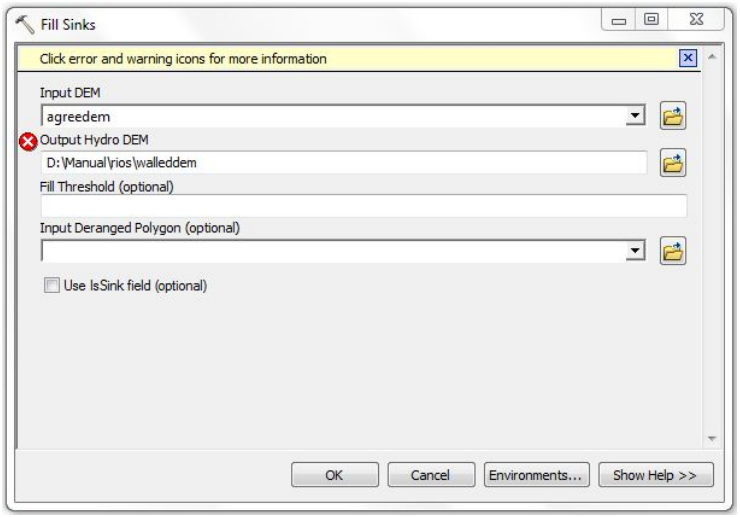


Figura 43. **Editor del Llenado de Sumideros**

- El MDT rellenado es referido como el "**Hydro DEM**". El nombre predeterminado es "Fil" y puede ser cambiado por el usuario.
- La opción **Fill Thershold** (Umbral de relleno) puede ser utilizado para llenar solamente las depresiones que tienen una profundidad menor que el umbral especificado por el usuario. Pero de hecho todos los sumideros deben ser llenados en el desarrollo de un proyecto de HEC-GeoHMS, por lo que el campo **Fill Thershold** (Umbral de relleno) debe quedar vacío.
- Un polígono puede usarse para definir áreas para que no se rellenen. Pero ya que todas las depresiones deben ser llenadas cuando desarrolla un proyecto de HEC-GeoHMS este campo debe quedar vacío.
- La casilla Use IsSInk Field (uso del campo IsSink) no debe ser llenada
- Presione Ok

El resultado de este procedimiento da como resultado la figura 44.

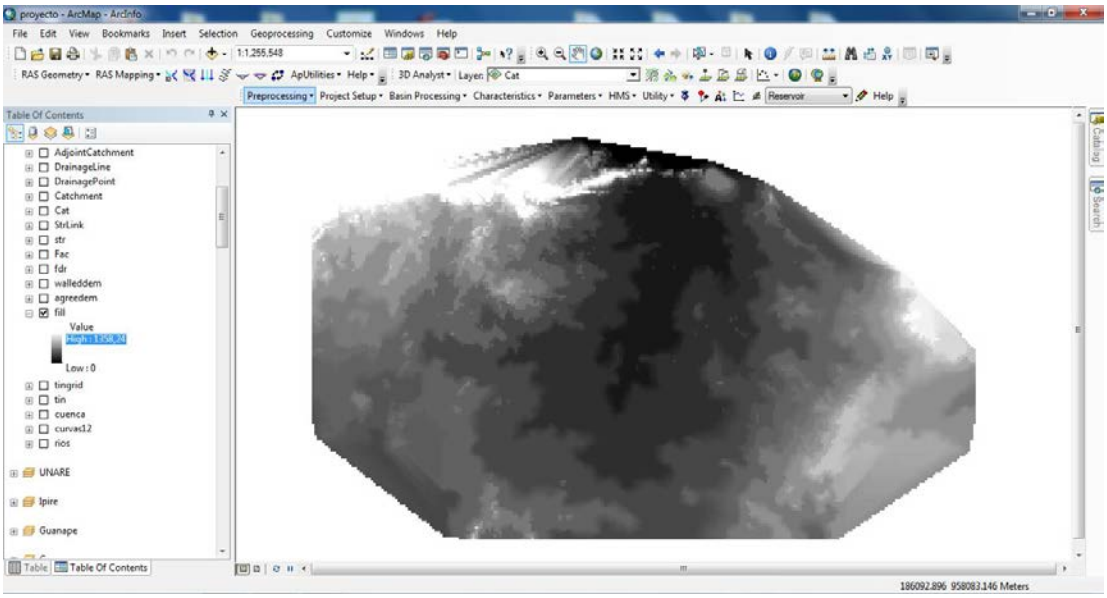


Figura 44. **Resultado del Llenado de Sumideros**

El MDT hidrológicamente corregido se utiliza como punto de partida para delinear subcuencas y ríos. Con el método paso a paso, cada paso comienza ofreciéndole al programa una lista de archivos de entradas que se utilizarán para producir los archivos de salida o capas vectoriales. Si el procedimiento paso a paso se realiza en un orden secuencial, el programa ofrecerá automáticamente los datos de entrada correctos para su procesamiento. En algunos casos, cuando ciertos pasos se repiten o son realizados fuera de orden, es importante verificar que son utilizadas las bases de datos apropiadas.

3.13.6 Direccionamiento del flujo (Flow Direction)

Con este paso se definió la dirección de las pendientes de descenso para cada celda en el terreno. Al igual que un compás, el algoritmo especifica ocho puntos definidos por ocho direcciones posibles, como se muestra en la Figura 45.

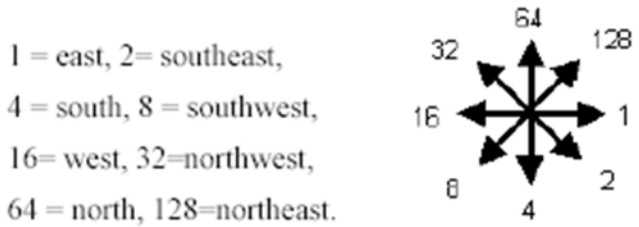


Figura 45. **Direccionamiento del flujo. Fuente: Manual de Usuario de la extensión HEC-GeoHMS**

Los pasos para calcular direcciones de flujo se muestran a continuación.

Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Flow Direction** (Direcciones de flujo). El editor de dirección del flujo se muestra en la Figura 46.

- Se confirmó que la entrada de la "**DEM Hydro**" es el MDT hidrológicamente corregido (**Filled DEM**).
- Se le dio la ubicación de salida a la dirección del flujo. "**FDR**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Si la herramienta Construcción de Muros fue usada para cercar una pared externa, se debe utilizar el mismo polígono para la capa **Input Outer**

Wall Polygon, de lo contrario no se debe seleccionar ninguna capa de entrada.

- Se presionó Ok

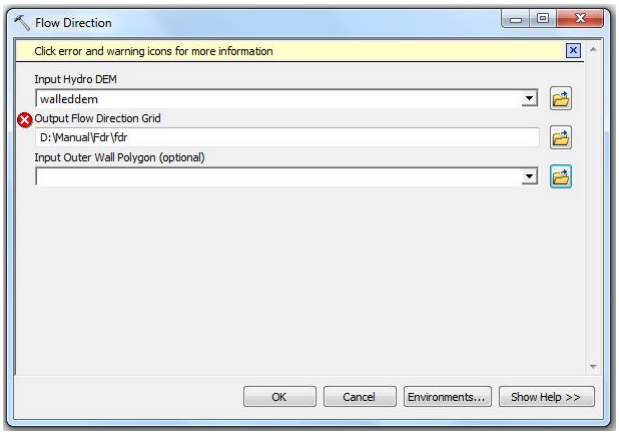


Figura 46. **Editor de la Dirección de Flujo**

El resultado de la operación: Dirección de Flujo se muestra en la figura 47.

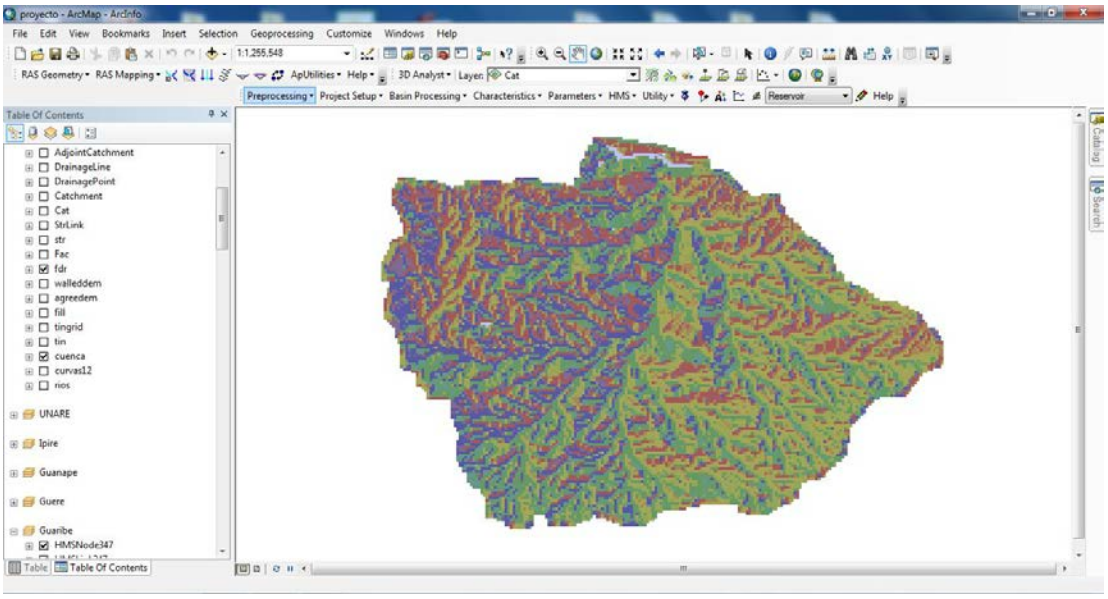


Figura 47. **Resultado de la Dirección de flujo**

3.13.7 Acumulación del flujo (Flow Accumulation)

Este paso determina el número de celdas que drenan desde aguas arriba a una celda dada. Área de drenaje desde aguas arriba en una celda dada puede calcularse multiplicando el valor de acumulación de flujo por el área de la celda.

Los pasos para calcular la acumulación de flujo se muestran a continuación.

Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Flow Accumulation** (Acumulación de flujo). El editor de dirección de la acumulación de flujo se muestra en la Figura 48.

- Se seleccionó la dirección de flujo del paso anterior.
- Se le dio la ubicación de salida a la acumulación del flujo. "**FAC**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Se Pulsó OK.

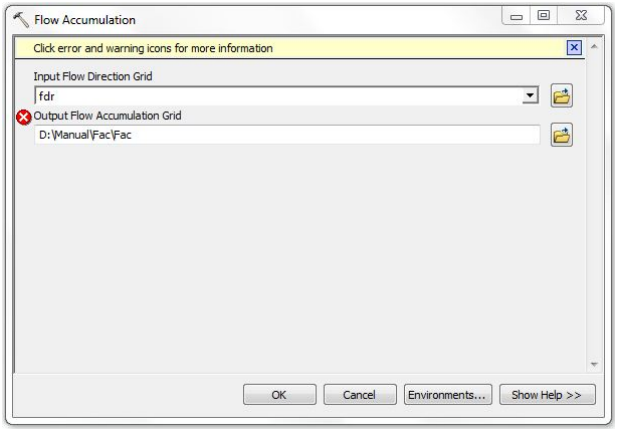


Figura 48. **Editor de la Acumulación de Flujo**

El resultado de la operación: Acumulación de flujo se muestra en la figura 49.

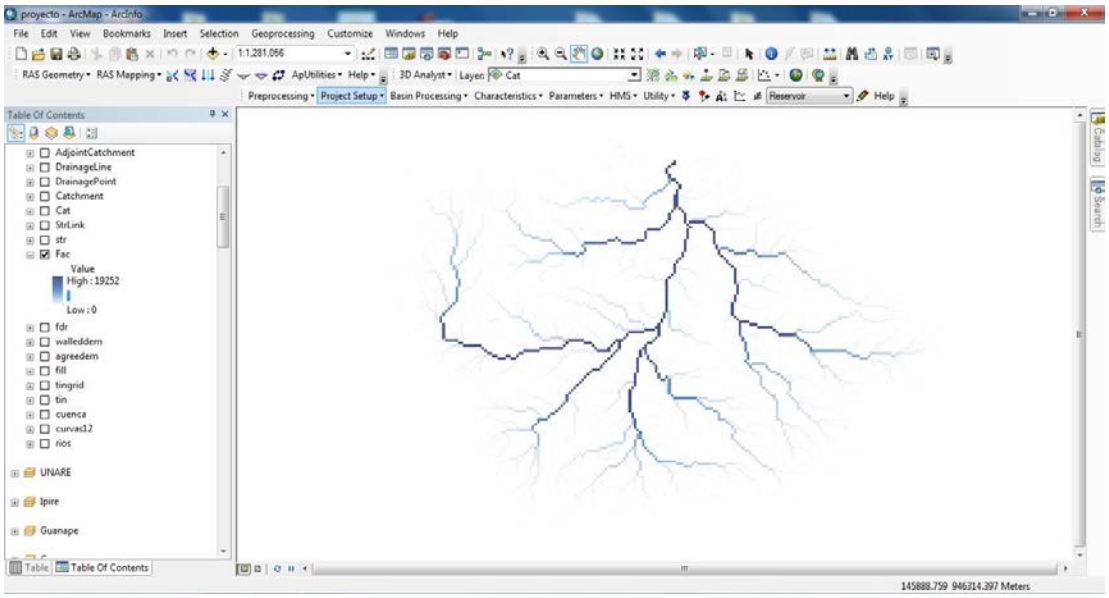


Figura 49. **Resultado de la Acumulación de Flujo**

3.13.8 Definición de corrientes (Stream Definition)

Con este paso se clasificaron todas las celdas con acumulación del flujo mayor a un límite definido. El límite especificado consistió en especificar un área en kilómetros cuadrados, tomando como límite el área por defecto, esto es, áreas mayores al 1% del área de drenaje del rio tributario más largo.

Los pasos para calcular la acumulación de flujo se muestran a continuación.

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Stream Definition** (**Definición de corrientes**). El editor de la definición de corrientes se muestra en la 50.
- Se seleccionó la acumulación de flujo del paso anterior.
- En el campo "**number of cells to define Stream**" el programa ofrece por defecto un valor para el numero de celdas que definen la corriente, basado en la longitud del tributario mas largo observado en la acumulación de flujo del paso anterior y aunque puede ser modificado, este valor se dejó como lo ofreció el programa.
- Se le dio la ubicación de salida a la definición de corrientes. "**Str**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- En el campo "Area SqKm to define stream (optional)" se pude introducir de forma opcional el valor del área en km2 de la corriente a definir. Este valor se dejó en blanco por ser opcional.
- Se Pulsó OK.

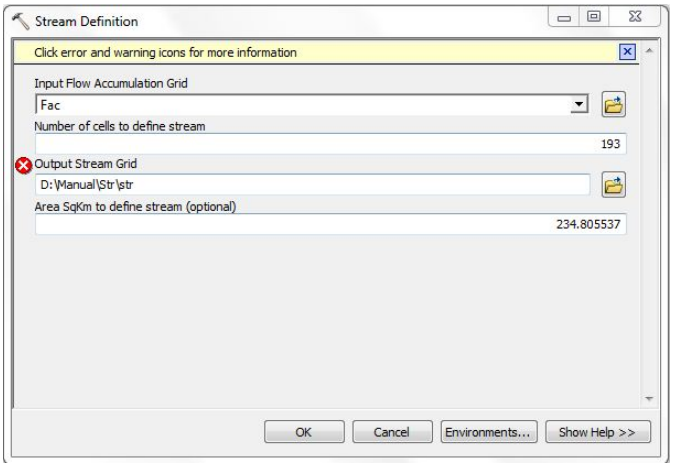


Figura 50. **Editor de la Definición de Corrientes**

El resultado de la operación: Definición de Corrientes se muestra en la figura 51.

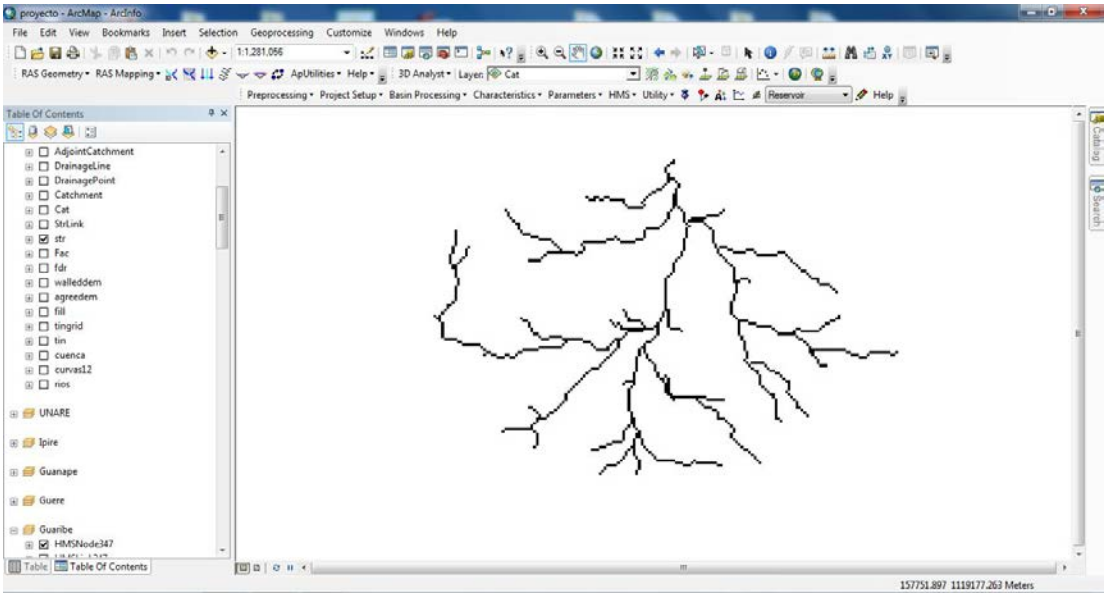


Figura 51. **Resultado de la Definición de Corrientes**

3.13.9 Segmentación de corrientes (Stream Segmentation)

Con este paso, el programa dividió las corrientes en segmentos. La segmentación de corrientes o enlaces son las secciones de una corriente que conecta dos uniones sucesivas, una unión y una salida, o una unión y división de drenajes.

Los pasos para calcular la segmentación de corriente se muestran a continuación.

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Stream Segmentation** (**Segmentación de corrientes**). El editor de la segmentación de corrientes se muestra en la Figura 52.
- Se seleccionó la definición de corrientes y la acumulación de flujo de los pasos anteriores.
- Se le dio la ubicación de salida a la definición de corrientes. "**StrLnk**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Los campos “Sink Watershed Grid” (Grid de la red de descarga) y “Sink Link Grid” (Grid de los Enlaces de descarga) no se llenaron debido a que no son necesarios para generar el proyecto Hec-GeoHMS
- Se Pulsó OK.

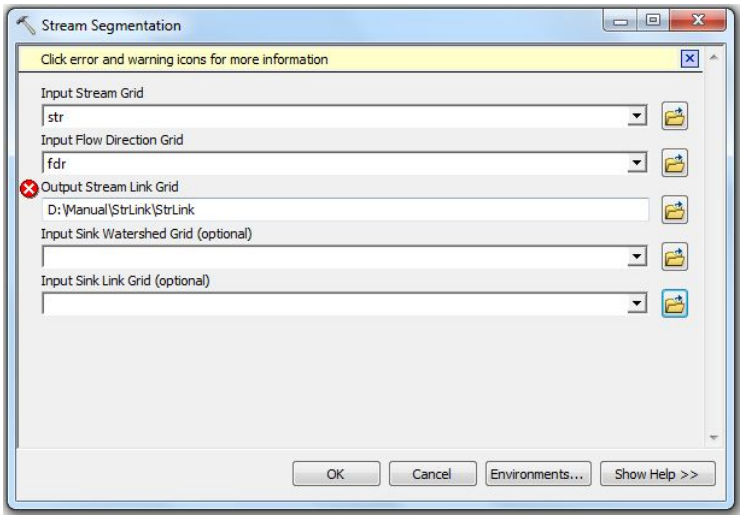


Figura 52. **Editor de la Segmentación de Corrientes**

El resultado de la operación: Segmentación de Corrientes se muestra en la figura 53.

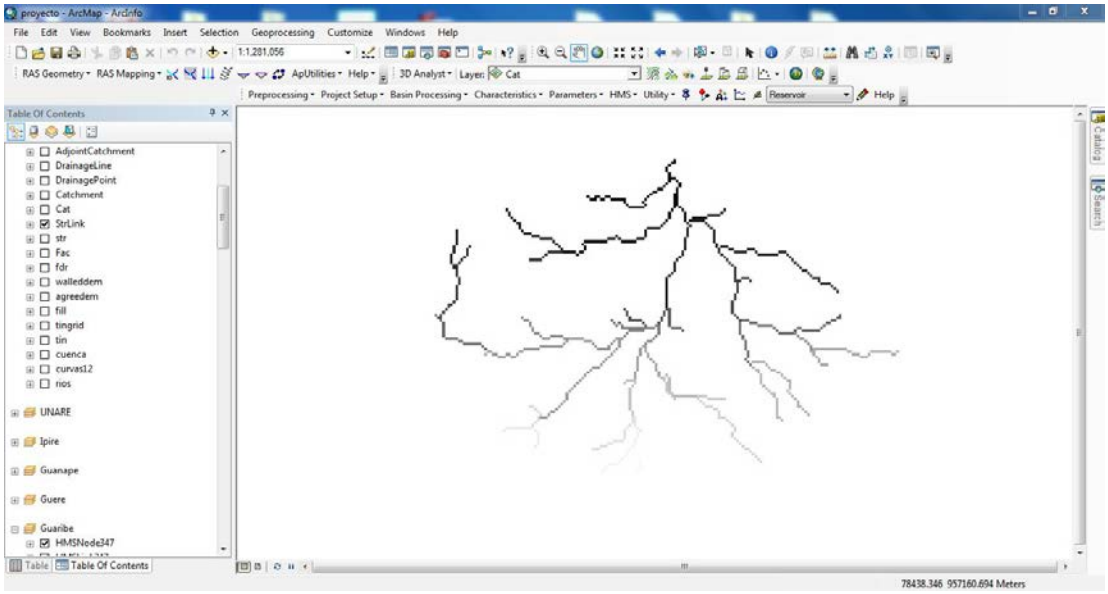


Figura 53. **Resultado de la Segmentación de Corrientes**

3.13.10 Delimitación de subcuencas (Catchment Grid Delineation)

Con este paso se delimitaron las subcuencas de acuerdo con la segmentación de corrientes de la operación anterior.

Los pasos para calcular la delimitar las subcuencas se muestran a continuación.

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Catchment Grid Delineation** (**Delimitación de subcuencas**). El editor de la delimitación de subcuencas se muestra en la Figura 54.

- Se seleccionó la dirección del flujo y la segmentación de corriente de los pasos previos.
- Se le dio la ubicación de salida a la delimitación de subcuencas. "**Cat**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Se Pulsó OK.

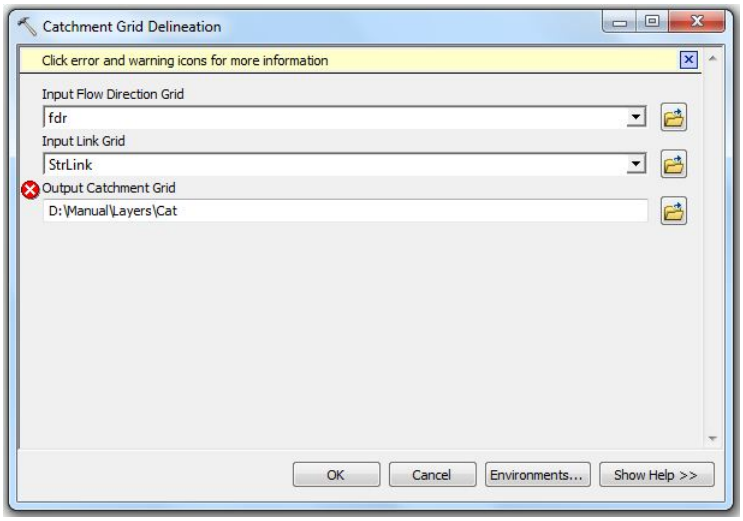


Figura 54. **Editor de la Delimitación de Subcuencas**

El resultado de la operación: Delimitación de subcuencas se muestra en la figura 55.

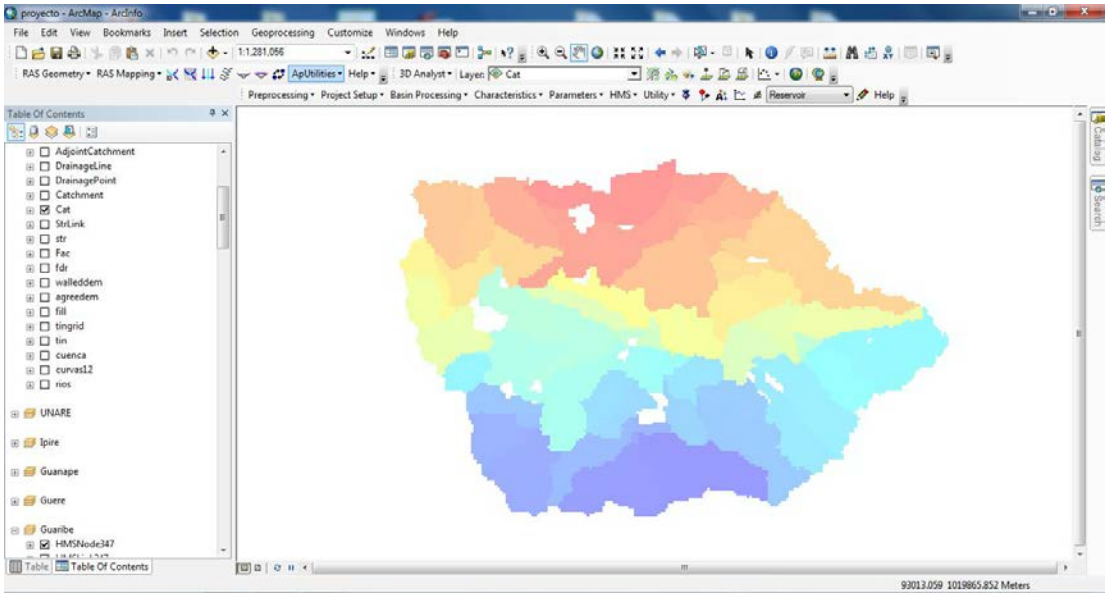


Figura 55. **Resultado de la Delimitación de Subcuencas**

3.13.11 Procesamiento de los polígonos de la cuenca (Catchment Polygon Processing)

Con este paso se convirtieron las subcuencas en la representación grid a una representación vectorial.

Los pasos para convertir en vectores los polígonos de las subcuencas se muestran a continuación.

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Catchment Polygon Processing** (**Procesamiento de los polígonos de la cuenca**). El editor se muestra en la Figura 56.
- Se seleccionó la delimitación de subcuencas del paso anterior.

- Se le dio la ubicación de salida a la delimitación de subcuencas vectorizada. "**Catchment**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Se Pulsó OK.

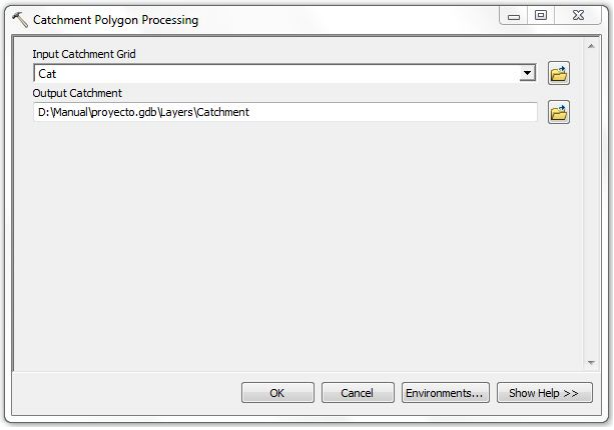


Figura 56. **Editor del Procesamiento de los polígonos de la cuenca**

El resultado de la operación: Vectorización de los polígonos de subcuencas se muestra en la figura 57.

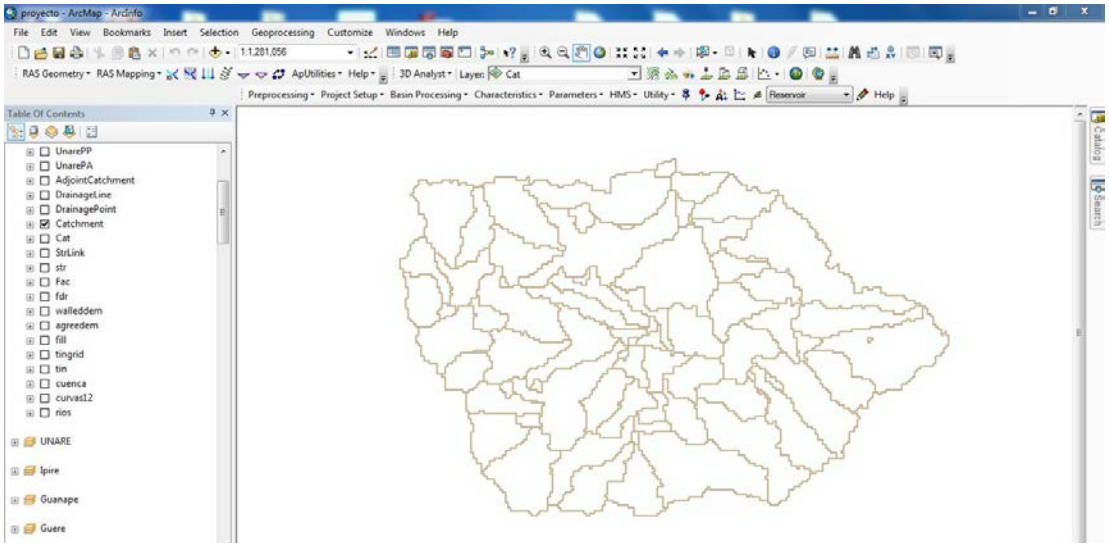


Figura 57. **Resultado del Procesamiento de los polígonos de la cuenca**

3.13.12 Procesamiento de los segmentos de corrientes (Drainage Line Processing)

Con este paso se convirtieron las corrientes de una representación GRID a una representación vectorial. Los pasos para convertir en vectores los polígonos de las subcuencas se muestran a continuación.

- Se seleccionó el **Terrain Preprocessing** (Preprocesamiento del terreno) y luego **Drainage Line Processing** (**Procesamiento de los segmentos de corriente**). El editor se muestra en la Figura 58.
- Se seleccionó la segmentación de corrientes y la dirección de flujo de los pasos anteriores.
- Se le dio la ubicación de salida a los segmentos de corriente vectorizados. "**DrainageLine**" es el nombre por defecto del archivo creado y puede ser cambiado por el usuario.
- Se Pulsó OK.

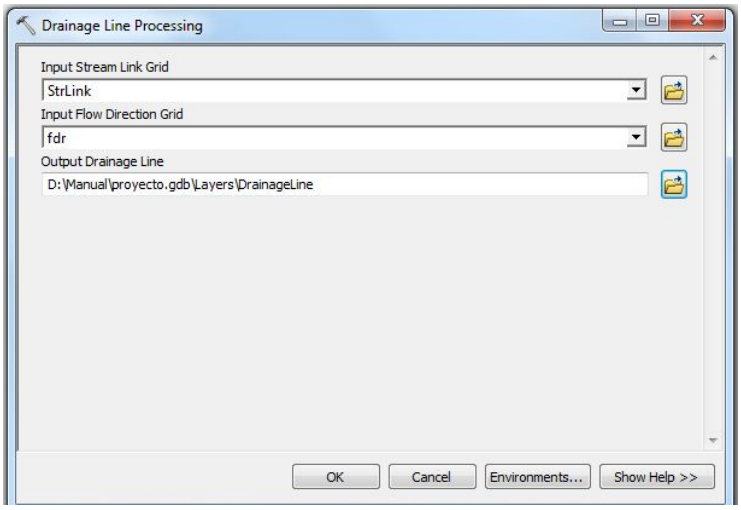


Figura 58. **Editor del Procesamiento de los Segmentos de Corriente**

El resultado de la operación: Vectorización de los segmentos de corriente se muestra en la figura 59.

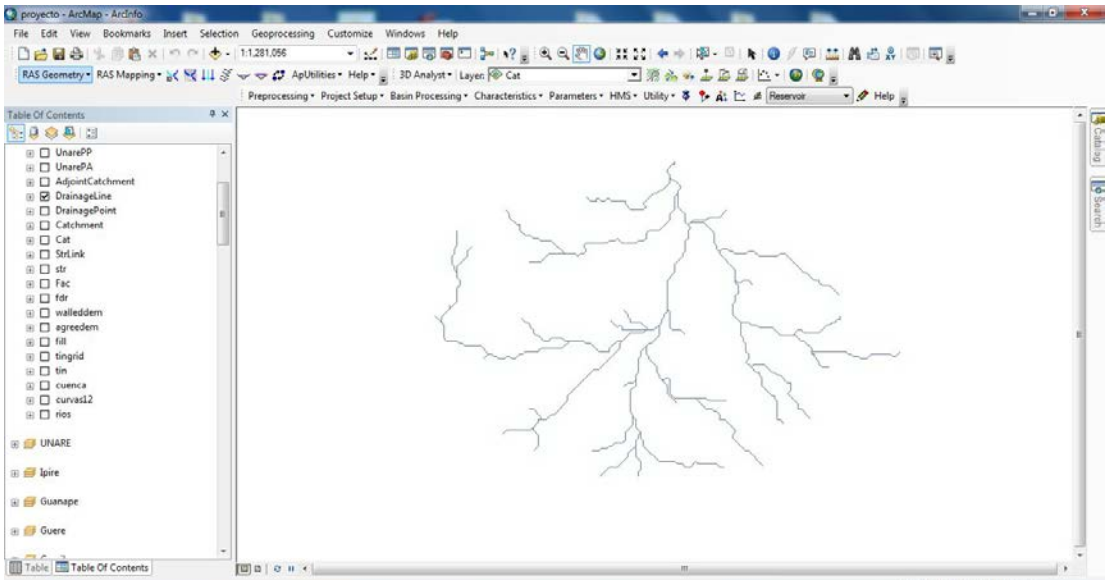


Figura 59. **Resultado del Procesamiento de los Segmentos de Corriente**

Una vez que el procesamiento del terreno se culminó en la opción Data Management, todos los temas del preprocesamiento se habrán cargado en los campos respectivos.

3.14 ARRANQUE DE PROYECTOS EN HMS (HMS PROJECT SETUP)

Este módulo es el responsable de la extracción de los datos que van a ser usados para desarrollar la información necesaria para crear un proyecto de HEC-HMS (ver figura 55). El enfoque de la extracción implica que debe

especificarse un punto de control en la salida aguas debajo de la cuenca. Esta ubicación representa el límite aguas abajo para el proyecto de HEC-HMS. Después de definir la salida, HEC-GeoHMS va a extraer los datos de las capas generadas en el Preprocesamiento del terreno (Gestión de datos. Figura 61) aguas arriba del punto definido. Luego de generar el proyecto, HEC-GeoHMS puede ser usado para refinar las subcuencas y corrientes creadas, extraer sus características físicas, estimar parámetros del modelo hidrológico y preparar los archivos de entrada para HEC-HMS.

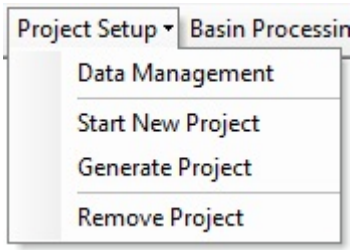


Figura 61. **Menú de la Configuración de proyectos HMS**

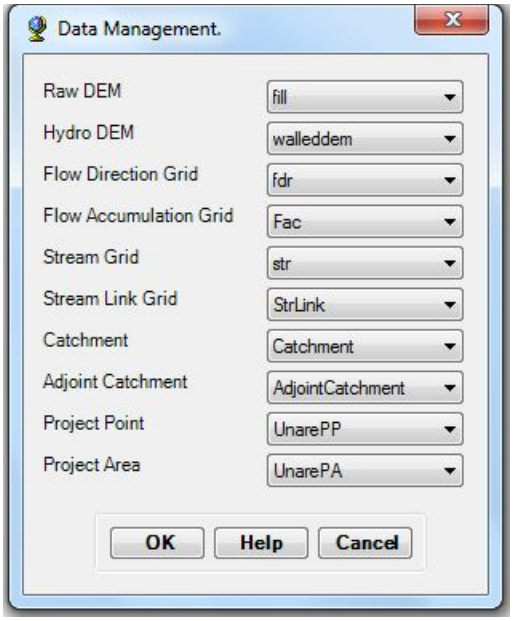


Figura 61. **Gestión de Datos para generar proyectos HMS**

3.14.1 Inicio de un nuevo proyecto (Start New Project)

Los pasos para iniciar un nuevo proyecto y crear un directorio para contener los datos y archivos relacionados se muestras a continuación:

- Se seleccionó **HMS Project Setup** y luego **Start New Project**,
- Se eligieron las carpetas de destino de los archivos que serán creados como se muestra en la figura 62.

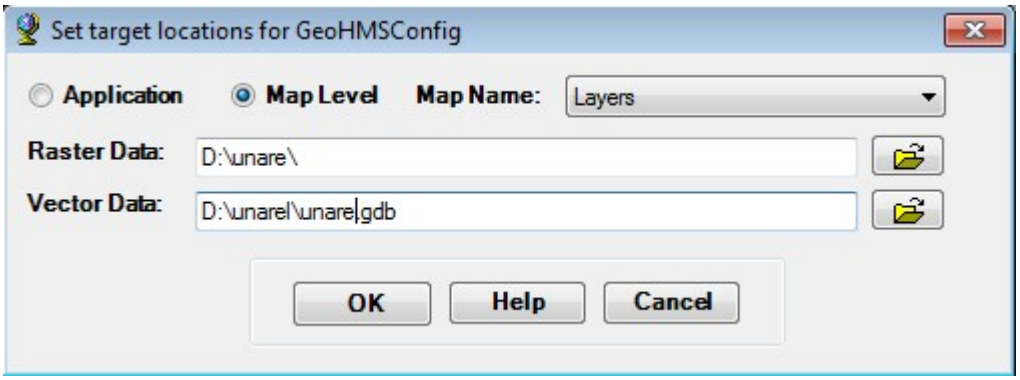


Figura 62. **Ubicación de destino del proyecto**

- Se ingresó el nombre de las capas que contendrían el área del proyecto (ProjectArea) y el punto de descarga de la cuenca (ProjectPoint) del nuevo proyecto, como se muestra en la Figura 63.

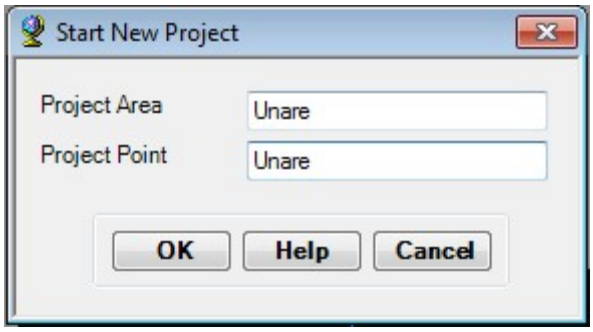


Figura 63. **Selección de nombres para las Capas de Area y Punto de salida**

- A continuación se desplegó una ventana en la que se dio nombre al proyecto, una descripción breve del mismo, se elegió el método de extracción de datos y si se deseaba que las capas creadas a continuación serían guardadas dentro o fuera de una Geodatabase. El campo “target” indicaba el directorio donde se alojaria la Geodatabase. Ver figura 64

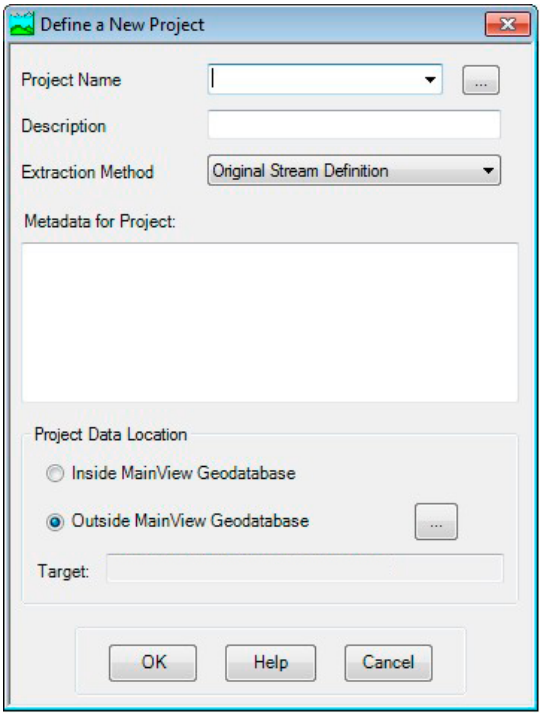


***Figura 64*. Editor de la Definición del nuevo proyecto**

- Una vez definido el proyecto apareció una ventana donde se pudo leer que el proyecto había sido generado satisfactoriamente, como se muestra en la figura: 65

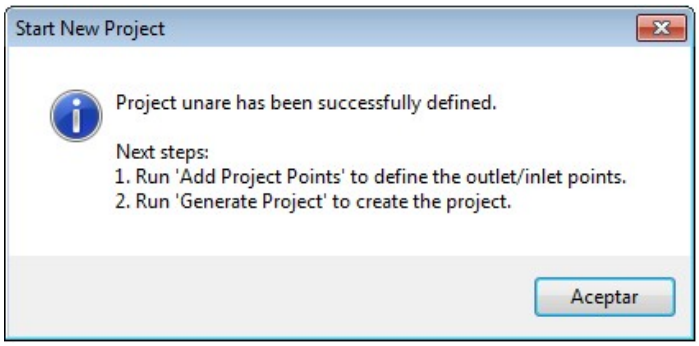


Figura 65. **Proyecto Generado Satisfactoriamente**

- Luego, se seleccionó la herramienta y se especificó el punto de salida para el modelo de cuenca tributaria.

3.14.2 Generación del proyecto (Generate Project)

Se seleccionó **Project Setup (configuración del proyecto)** y luego **Generate Project (generar proyecto)**.

A continuación se desplegó una pantalla de gestión de datos, El editor de nombres de las capas del nuevo proyecto que se muestra en la figura 66. (Se pueden aceptar los nombres por defecto o se pueden elegir nuevos nombres)

El programa generó una nueva base de datos con el mismo nombre establecido para el proyecto, todos los datos provenientes del preprocesamiento del terreno fueron extraídos e importados a las nuevas capas que se generaron en esta base de datos recién creada. Adicionalmente fueron creadas otras dos capas que no existían en el preprocesamiento del terreno estas capas llevan por nombre **Subbasin** y

River y en ellas están los datos de las subcuencas y la red de ríos contenidos dentro del área del proyecto creado.

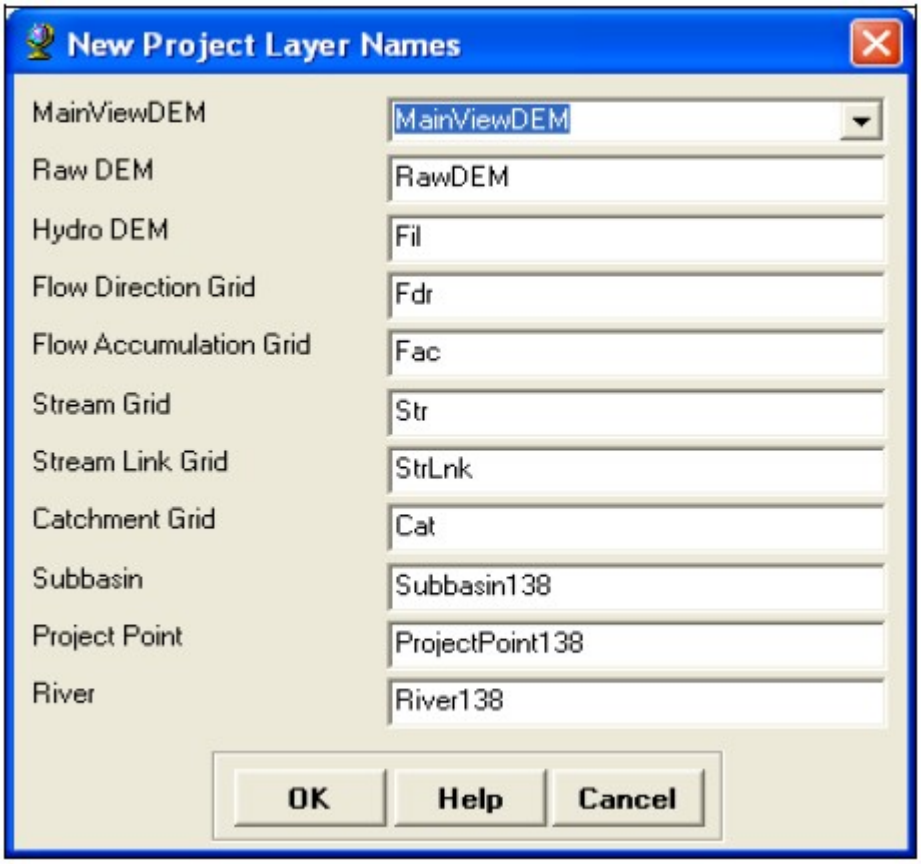


Figura 66. **Editor de nombre de las Capas que componen el proyecto.**

3.15 PROYECTOS GENERADOS

El proyecto generado hasta este momento hace referencia a la cuenca completa del rio Unare y se muestra en la figura 67. De la misma manera se crearon proyectos adicionales para cada subcuenca, que corresponden a los ríos tributarios mayores de la cuenca en estudio y que son **Ipire** Ver figura

68, **Guere** ver figura 69, **Guanape** ver figura 70, **Guaribe** ver figura 71 y **Tamanaco**, ver Figura 72.

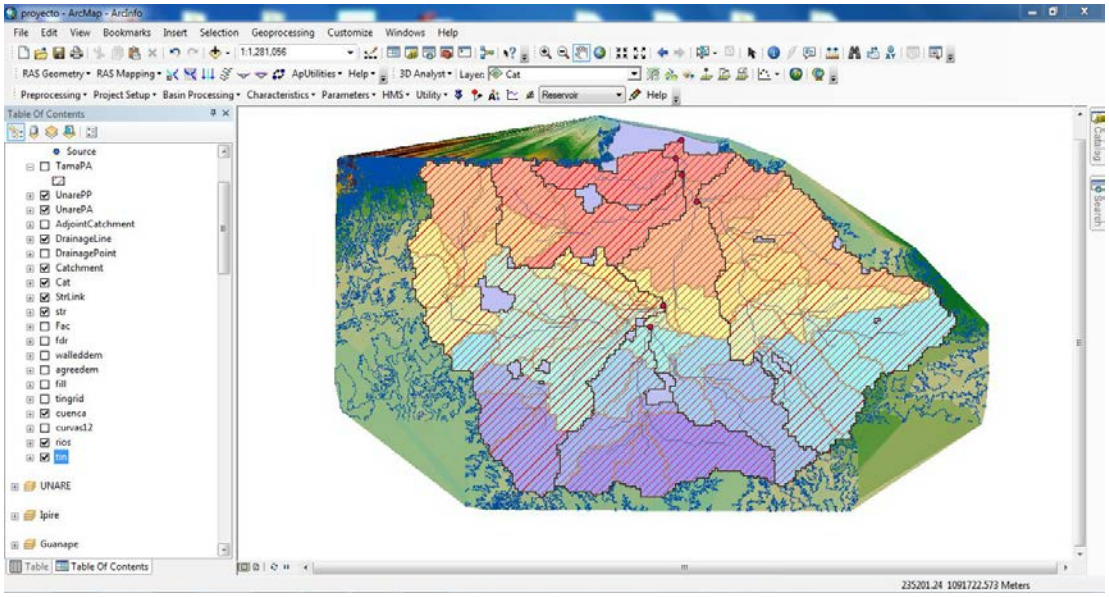


***Figura 67*. Proyecto de la Cuenca Unare**

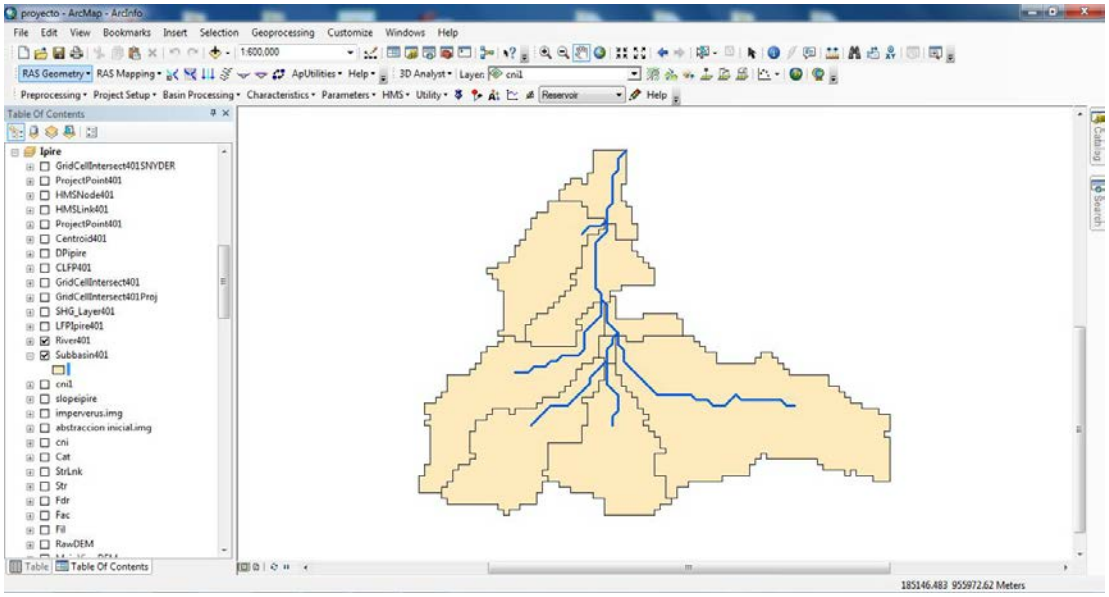


***Figura 68.* Proyecto de la Subcuenca Ipire**

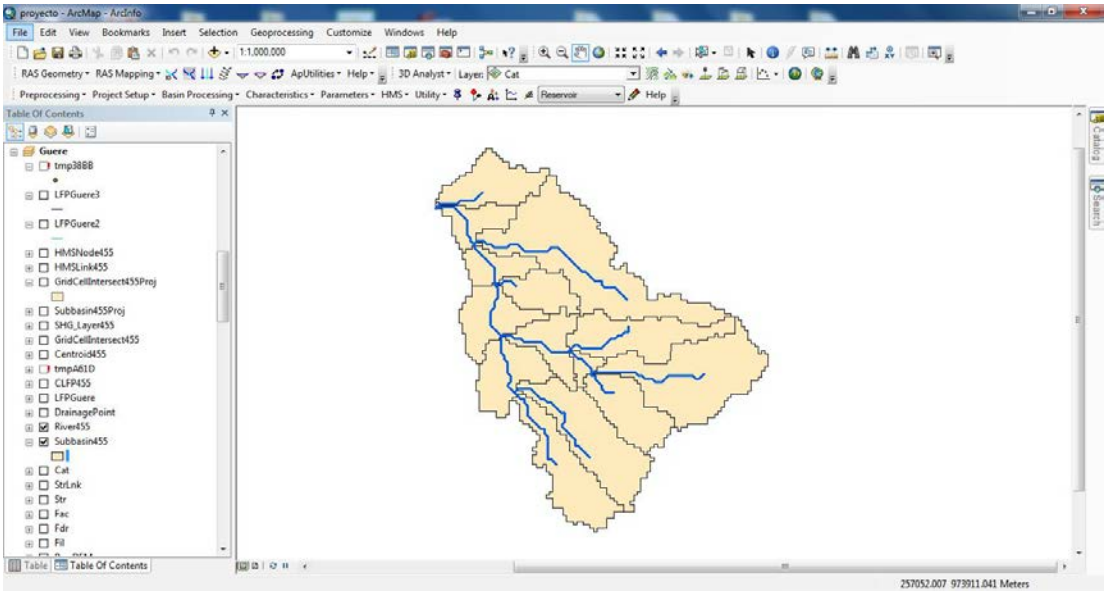


Figura 69. **Proyecto de la Subcuenca Guere**

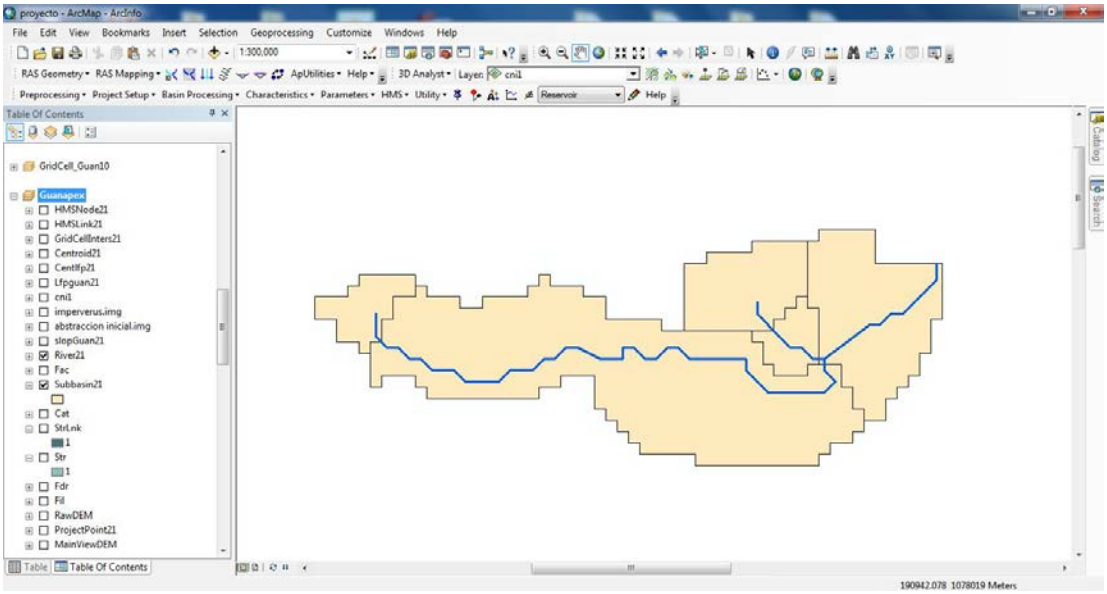


Figura 70. **Proyecto de la Subcuenca Guanape**

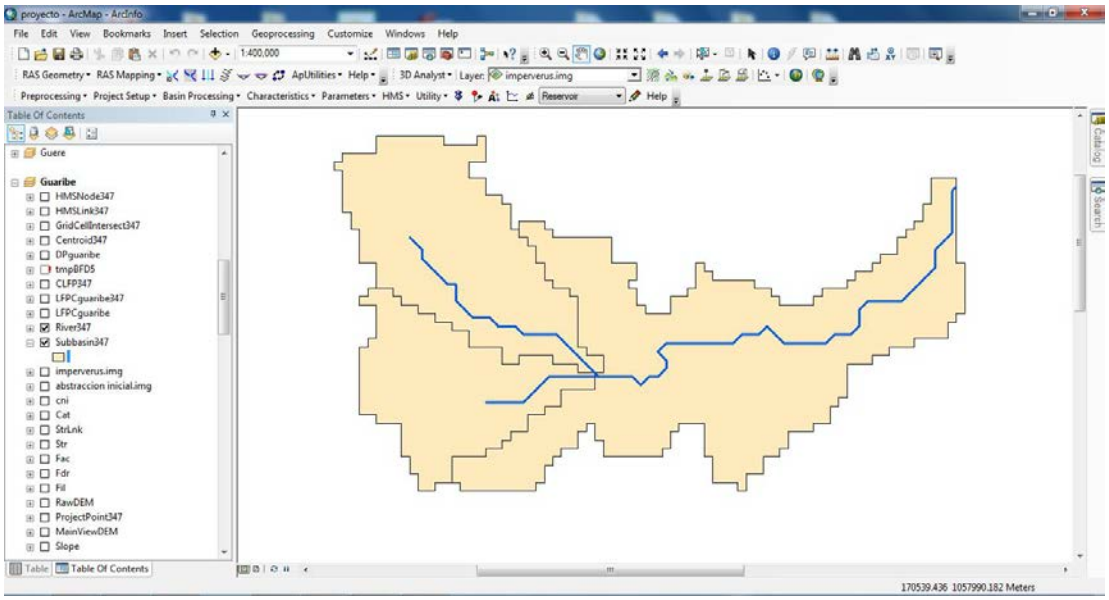


Figura 71. **Proyecto de la Subcuenca Guaribe**

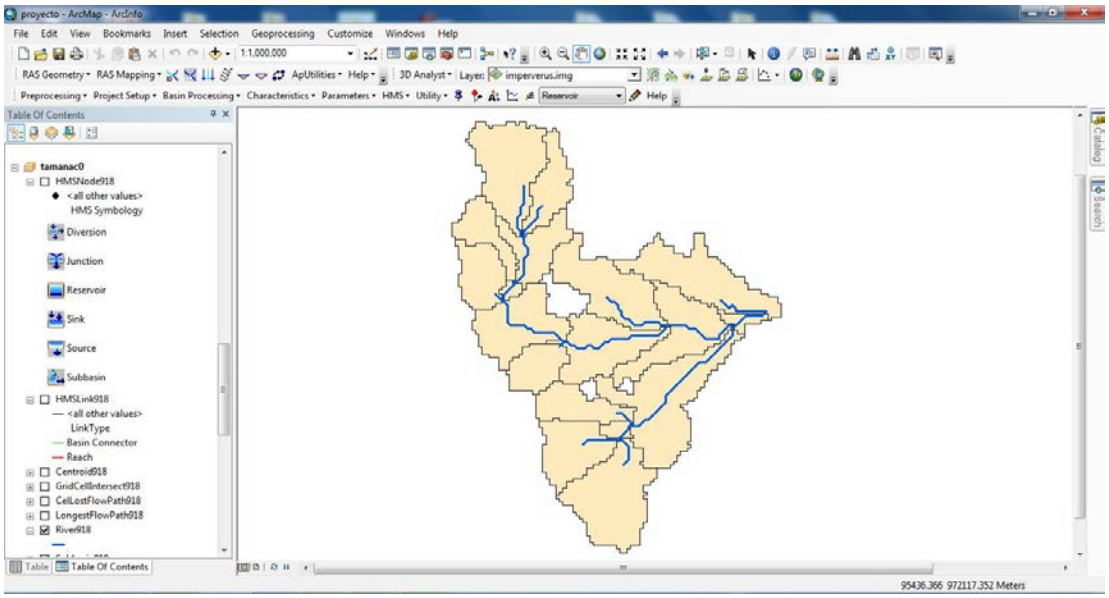


Figura 72. **Proyecto de la Subcuenca Tamanaco**

3.16 PROCESAMIENTO DE LA CUENCA (BASIN PROCESSING)

Una vez que el prepocesamiento del terreno se ha completado y el nuevo proyecto ha sido generando el menú de procesamiento de la cuenca se puede usar para hacer una revisión de la delimitación de las subcuencas, es posible modificar las subcuencas y la red hídrica antes generada, así como agregar puntos donde sea necesaria información.

La opción de procesamiento de la cuenca comprende las siguientes opciones: Unión de Cuencas (**Basin Merge),** Subdivisión de cuencas (**Basin Subdivision**), Division de cuencas según su área máxima (**Subbasin Divide by Maximun Area**) Unión de ríos (**River Merge),** Perfil del río (**River Profile)** y División de cuencas en confluencias **(Split Basin at Confluence).**

A modo explicativo se mostrará a partir de este momento solo el procedimiento ejecutado para la cuenca del rio Ipire, el mismo procedimiento se siguió para las demás cuencas de los ríos que conforman el proyecto, los cuales son Guere, Guanape, Guaribe y Tamanaco.

3.16.1 Unión de Cuencas (Basin Merge)

En el menú Procesamiento de Cuenca (Basin Processing), el **Basin Merge** permite combinar múltiples subcuencas en una sola. Esta

herramienta funciona de forma interactiva presentando el resultado de la operación y dándole al usuario la opción para aceptar o cancelarla. A continuación se presentan las reglas y una lista de pasos para utilizar la herramienta de combinación.

3.16.2 Reglas para la unión de cuencas

- Las subcuencas deben compartir una confluencia común, o
- Las subcuencas deben ser adyacentes en forma ascendente y descendente.

Los pasos para la unión de cuencas se muestran a continuación:

- Se activó la capa de subcuenca.
- Se usó la herramienta de selección y se seleccionaron dos de las subcuencas que deseaban unir.
- Se seleccionó el **Basin Processing (Procesamiento de cuencas)** y luego **Basin Merge (Unión de Cuencas)**

El resultado de la subcuenca fusionada se muestra con un mensaje de confirmación de los resultados. Se Pulsó **SI** para aceptar la subcuenca resultante o No para cancelar la operación de fusión.

Las subcuencas fueron unidas de acuerdo a las áreas de interés para el estudio.

3.16.3 Subdivisión de Subcuencas

Una Subcuenca se puede dividir con la herramienta **Subbasin Divide** (División de Cuencas). La cuenca se puede dividir, ya sea que exista o no una corriente dibujada.

3.16.3.1 Método 1: División de una cuenca con una corriente existente

Una cuenca se puede dividir en dos cuencas con una corriente existente.

- La capa Definición de corriente (STR) debe estar activa. Se hizo Zoom en el área de interés.
- Se seleccionó la herramienta **Subbasin Divide (división de cuencas)**
- Luego el editor de Puntos del Proyecto (**Project Points**) se desplegó y pidió un nombre para la nueva subcuenca generada. Se aceptó el nombre por defecto y se presionó **OK**

3.16.3.2 Método 2: División de una cuenca con cuando no existe una corriente

Cuando una corriente existente no se extiende lo suficiente aguas arriba, se puede utilizar la herramienta **División de Cuencas (Subbasin Divide)** para delinear una nueva subcuenca, en este caso se puede usar la capa acumulación de flujo (flow acummulation) para ver la red de corrientes

detallada. Cuando se subdivide una subcuenca desde un punto en el que no existe una corriente, el programa traza un nuevo segmento aguas arriba desde el punto especifico en la corriente existente.

Los pasos para la unión de cuencas se muestran a continuación:

- Se hizo zoom en el área de interés y se hizo visible la capa de acumulación de flujo.
- Con la herramienta división de cuenca (Subbasin Divide) activada se hizo click sobre la celda de **acumulación de flujo (flow accumulation)** que se deseaban la división de la cuenca.
- Se aceptó el nombre por defecto para el punto de salida de cada cuenca recién dividida y se presionó **OK**

3.16.4 Unión de ríos (River Merge)

El resultado de la fusión de dos subcuencas en una sola puede resultar en múltiples segmentos de corriente y al crear un proyecto de HEC-HMS, estos dos segmentos son tratados como tramos por separado para lo cual se deben desarrollar parámetros para ambos tramos, sin embargo, si se tiene la intención de modelar la ruta única, entonces se debe combinar los ambos segmentos de corriente.

Los pasos para la unión de ríos se muestran a continuación:

- Se hizo zoom en el área de interés y se activó la capa de ríos.

- Se seleccionaron dos segmentos de corriente con la herramienta de selección.
- Se seleccionó **Procesamiento de Cuencas (Basin Processing)** y luego **Unión de Ríos (River Merge)**
- Se confirmó la unión presionando el botón **SI (Yes)** y los dos segmentos seleccionados se convirtieron en un solo segmento.

3.17 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA (BASIN CARACTERISTICS)

En esta sección se determinan las características físicas de las subcuencas, las cuales son utilizadas posteriormente para determinar los parámetros hidrológicos útiles para la modelación hidrológica. Las características físicas son almacenadas en tablas de atributos, y pueden exportadas para su uso en hojas de cálculo de otros programas. En esta sección se discute la manera cómo se obtuvieron las siguientes características físicas; longitud de ríos **(River Length),** pendiente de ríos **(River Slope)**, pendiente de la cuenca (**Basin Slope**), longitud del tributario más largo **(Longest Flow Path),** centroide de la cuenca **(Basin Centroid)**, elevación del centroide **(Centroid Elevation Update),** longitud del flujo al centroide **(Centroidal Flow Path),** estas opciones se muestran en la Figura 73.

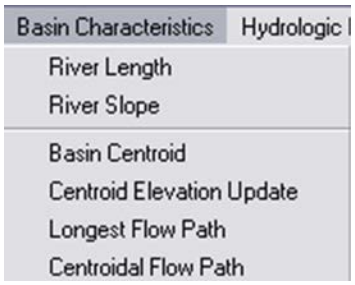


Figura 73: **Opciones para determinar las características de las cuencas**

3.17.1 Longitud de ríos (River Length)

Este procedimiento calcula la longitud para un segmento seleccionado o para todos los segmentos en la capa de ríos. Dicho procedimiento llena un campo llamado RivLen en la tabla de atributos de la capa de ríos y toma las unidades del MDT.

Los pasos para se muestran a continuación:

- Se activó la capa de ríos.
- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **River Length (longitud de ríos)** lo que activa el editor de Cálculo de longitudes de ríos. Ver figura 74
- Se presionó **Ok**.

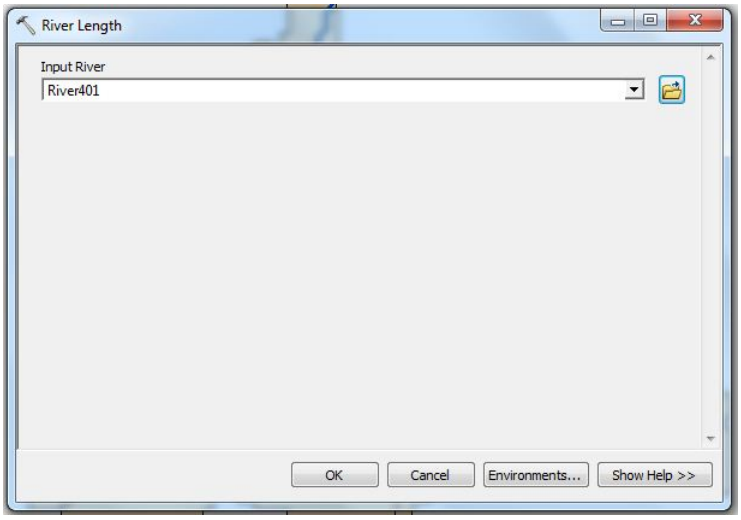
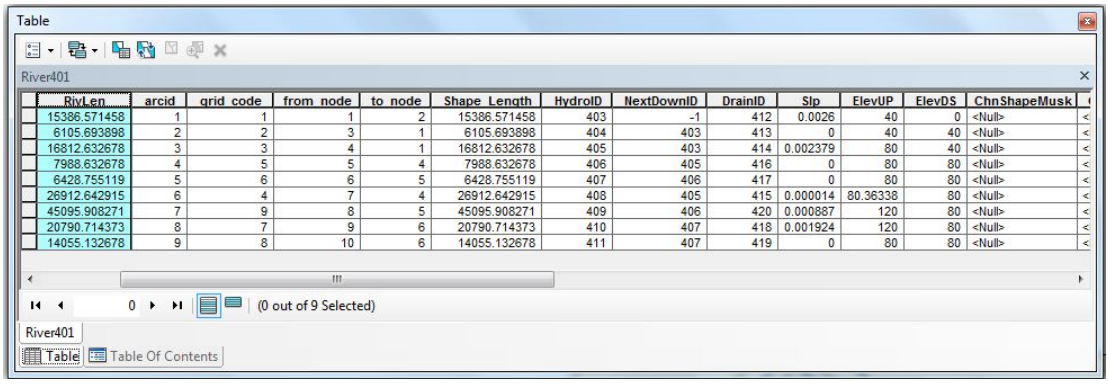


Figura 74: **Editor de Calculo de longitud de los ríos**

El resultado de este procedimiento se puede ver en la figura 70.



RivLen	arcid	grid_code	from_node	to_node	Shape_Length	HydroID	NextDownID	DrainID	Slp	ElevUP	ElevDS	ChnShapeMusk
15386.571458	1	1	1	2	15386.571458	403	-1	412	0.0026	40	0	<Null>
6105.693898	2	2	3	1	6105.693898	404	403	413	0	40	40	<Null>
16812.632678	3	3	4	1	16812.632678	405	403	414	0.002379	80	40	<Null>
7988.632678	4	5	5	4	7988.632678	406	405	416	0	80	80	<Null>
6428.755119	5	6	6	5	6428.755119	407	406	417	0	80	80	<Null>
26912.642915	6	4	7	4	26912.642915	408	405	415	0.000014	80.36338	80	<Null>
45095.908271	7	9	8	5	45095.908271	409	406	420	0.000887	120	80	<Null>
20790.714373	8	7	9	6	20790.714373	410	407	418	0.001924	120	80	<Null>
14055.132678	9	8	10	6	14055.132678	411	407	419	0	80	80	<Null>

Figura 75: **Resultado de Calculo de longitud de los ríos**

3.17.2 Pendiente de ríos (River Slope)

Con este paso, el programa determina la diferencia de elevación entre los tramos de ríos aguas arriba y aguas abajo y con ello calcula las pendientes. La elevación aguas arriba, aguas abajo y las pendientes se añaden a sus respectivas columnas de la tabla de atributos de la capa de

ríos en los campos “**ElevUP**” para la elevación Aguas arriba, “**ElevDS**” para aguas abajo y “**Slp**” para la pendiente. Los pasos para la unión de cuencas se muestran a continuación:

- Se activó la capa de ríos y el MDT.
- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **River Slope (pendiente de ríos)** lo que activa el editor de Cálculo de pendientes de ríos que se muestra en la figura 76
- Se presionó **Ok**.

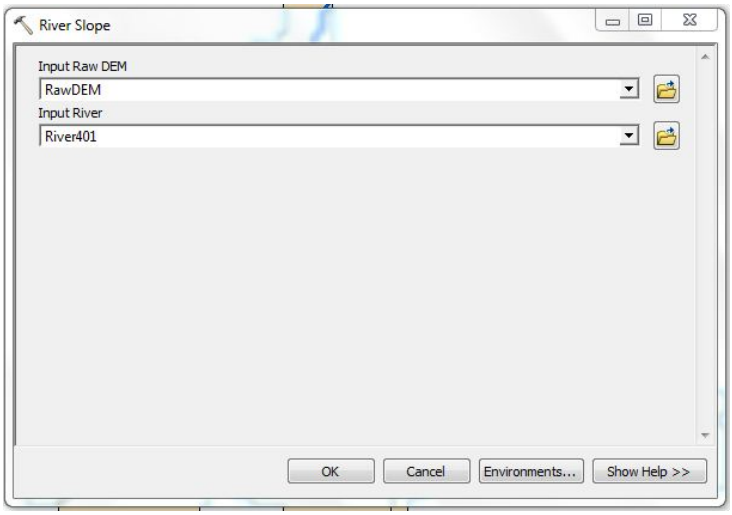


Figura 76: **Editor de Pendientes de Río**

El resultado de la operación se muestra en la Figura 77

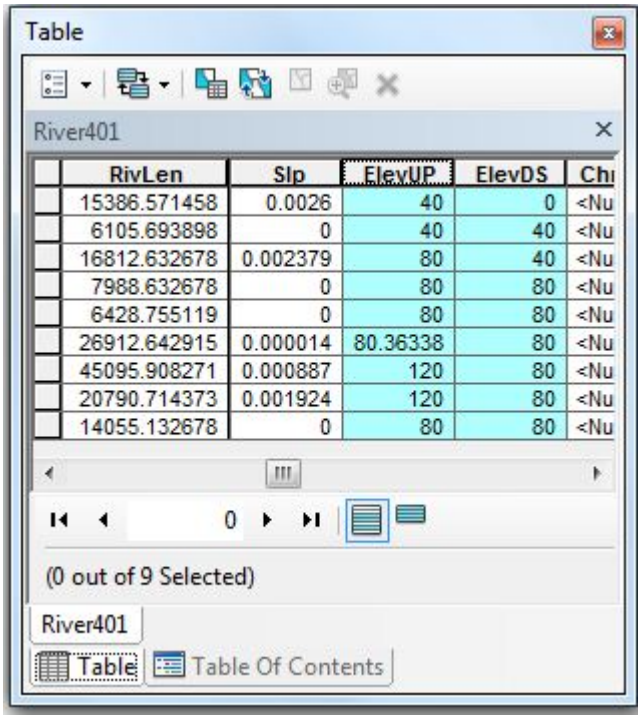


Figura 77: **Resultado del Cálculo de las pendientes de los ríos**

3.17.3 Pendiente de la cuenca (Basin Slope)

Con esta función el programa determina la pendiente de las subcuencas, para una en particular o para todas las contenidas en la capa de cuencas. Esta característica es necesaria para calcular posteriormente el parámetro CN Lag Time (tiempo de concentración según el coeficiente de uso de la tierra) en el menú de Parámetros hidrológicos (Hydrologic Parameters

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **Basin Slope (pendiente de la cuenca)** lo que activa el editor de pendientes de las cuencas que se muestra en la figura 78.
- Se seleccionaron las capas correspondientes y se presionó **Ok**.

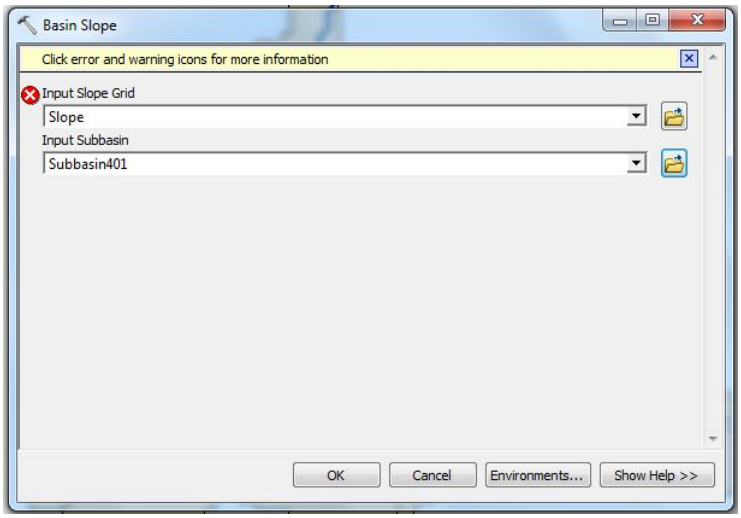


Figura 78: **Editor de Cálculo de pendientes de la cuenca**

El resultado de la operación se muestra en la Figura 74

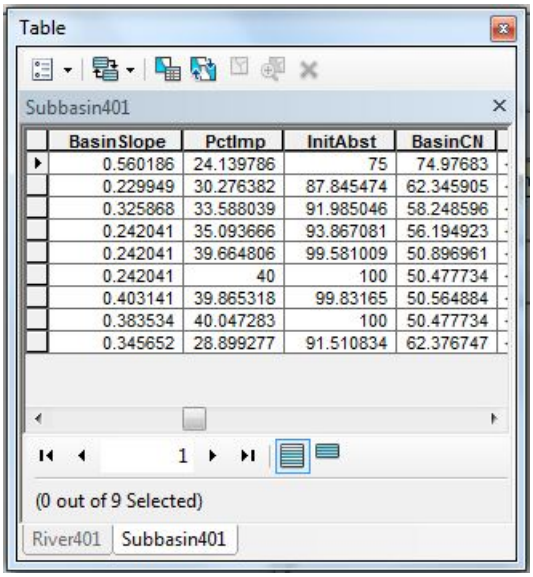


Figura 79: **Resultado de Cálculo de pendientes de la cuenca**

3.17.4 Longitud del tributario más largo (Longest Flow Path)

Con esta función el programa determina la longitud del tributario mas largo, la elevación aguas arriba y aguas abajo y la pendiente entre esos puntos. Estas características son almacenadas en campos en sus respectivas columnas en las tablas de atributos de la capa **Longest flow path**

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **Longest Flow Path (Longitud del tributario mas largo)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 80.
- Se seleccionaron las capas correspondientes.
- Se le dio nombre al archivo generado, se aceptó el nombre por defecto y se presionó **Ok**.

El resultado de la operación se muestra en la Figura 81.

Cuando la capa se creó, la tabla de atributos se pudo observar que contenía los siguientes campos

- DrainID: Identificador hidrológico asociado a la subcuenca
- LengthDownL: Longitud desde el comienzo hasta el punto de salida de la cuenca.
- LongestFL: Longitud del tramo que representa el tributario mas largo.
- Slp: Pendiente de cada tramo.

- ElevUP: Elevación aguas arriba en unidades del MDT.
- ElevDS: Elevación aguas abajo en unidades del MDT.
- Elev10: Elevación al 10% de la longitud del tributario mas largo.
- Elev85: Elevación al 85% de la longitud del tributario mas largo.
- Slp1085: Pendiente entre dos puntos ubicados en 10% y 85% de la longitud del tributario mas largo.

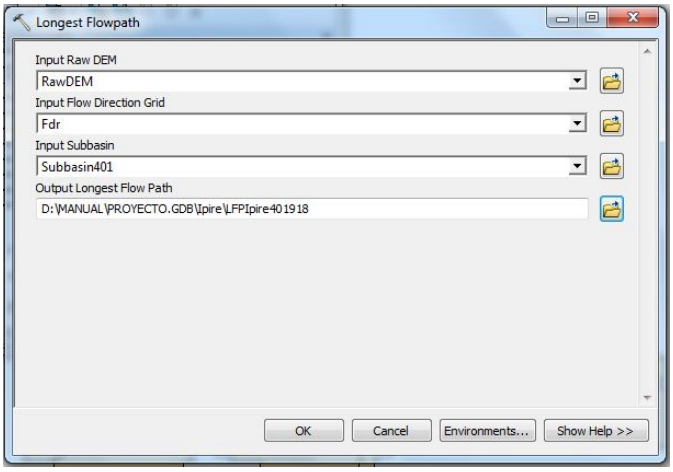
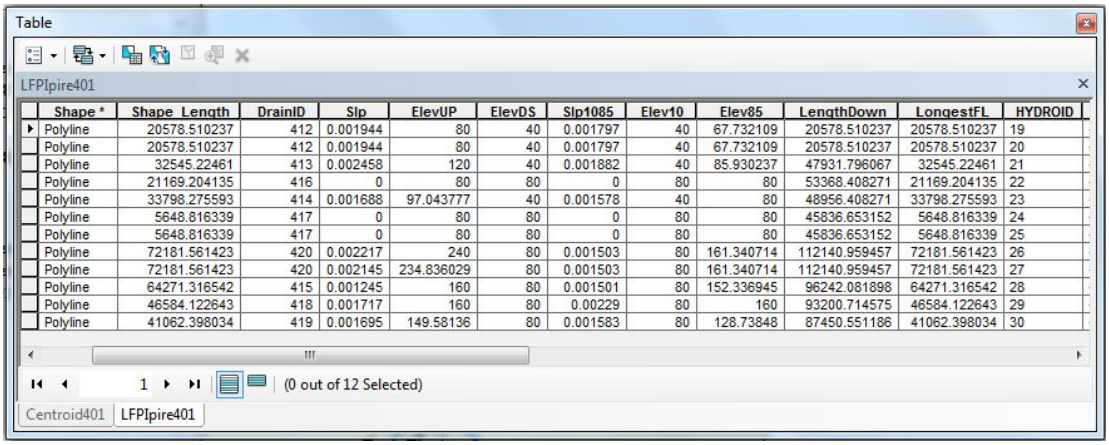


Figura 80: **Editor de Longitud del tributario más largo**



Shape *	Shape_Length	DrainID	Slp	ElevUP	ElevDS	Slp1085	Elev10	Elev85	LengthDown	LongestFL	HYDROID
Polyline	20578.510237	412	0.001944	80	40	0.001797	40	67.732109	20578.510237	20578.510237	19
Polyline	20578.510237	412	0.001944	80	40	0.001797	40	67.732109	20578.510237	20578.510237	20
Polyline	32545.22461	413	0.002458	120	40	0.001882	40	85.930237	47931.796067	32545.22461	21
Polyline	21169.204135	416	0	80	80	0	80	80	53368.408271	21169.204135	22
Polyline	33798.275593	414	0.001688	97.043777	40	0.001578	40	80	48956.408271	33798.275593	23
Polyline	5648.816339	417	0	80	80	0	80	80	45836.653152	5648.816339	24
Polyline	5648.816339	417	0	80	80	0	80	80	45836.653152	5648.816339	25
Polyline	72181.561423	420	0.002217	240	80	0.001503	80	161.340714	112140.959457	72181.561423	26
Polyline	72181.561423	420	0.002145	234.836029	80	0.001503	80	161.340714	112140.959457	72181.561423	27
Polyline	64271.316542	415	0.001245	160	80	0.001501	80	152.336945	96242.081898	64271.316542	28
Polyline	46584.122643	418	0.001717	160	80	0.00229	80	160	93200.714575	46584.122643	29
Polyline	41062.398034	419	0.001695	149.58136	80	0.001583	80	128.73848	87450.551186	41062.398034	30

Figura 81: **Resultado de Longitud del tributario más largo**

3.17.5 Centroide de las subcuencas (Basin Centroid)

La herramienta identifica el centroide de cada subcuenca. La ubicación del centroide, puede ser estimada mediante tres métodos gráficos, centro de gravedad (center of Gravity), tributario mas largo (Longest Flow Path), 50% del área de la cuenca (50% percent área). Para este estudio se seleccionó el método del centro de gravedad de la cuenca por considerar que es más aproximado que los otros por la forma de las subcuencas.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **Basin Centroid (Centroide de la cuenca)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 82
- Se seleccionó el método **Center of Gravity (centro de gravedad)**
- Se le dio nombre al archivo generado, se aceptó el nombre por defecto y se presionó **Ok**.

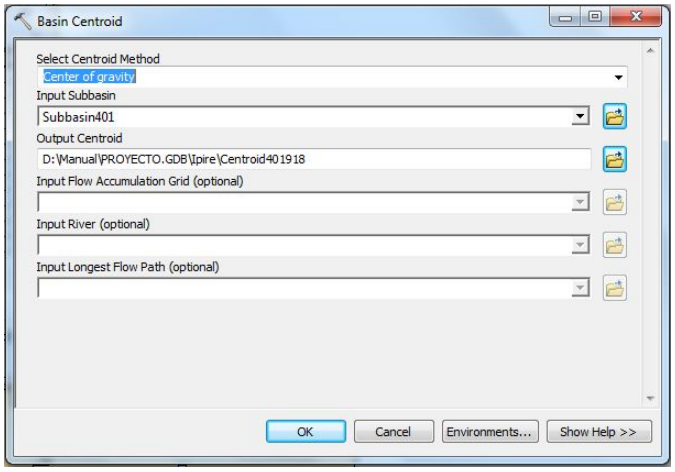


Figura 82: **Editor de Centroide de las subcuencas**

El resultado de la operación se muestra en la Figura 83

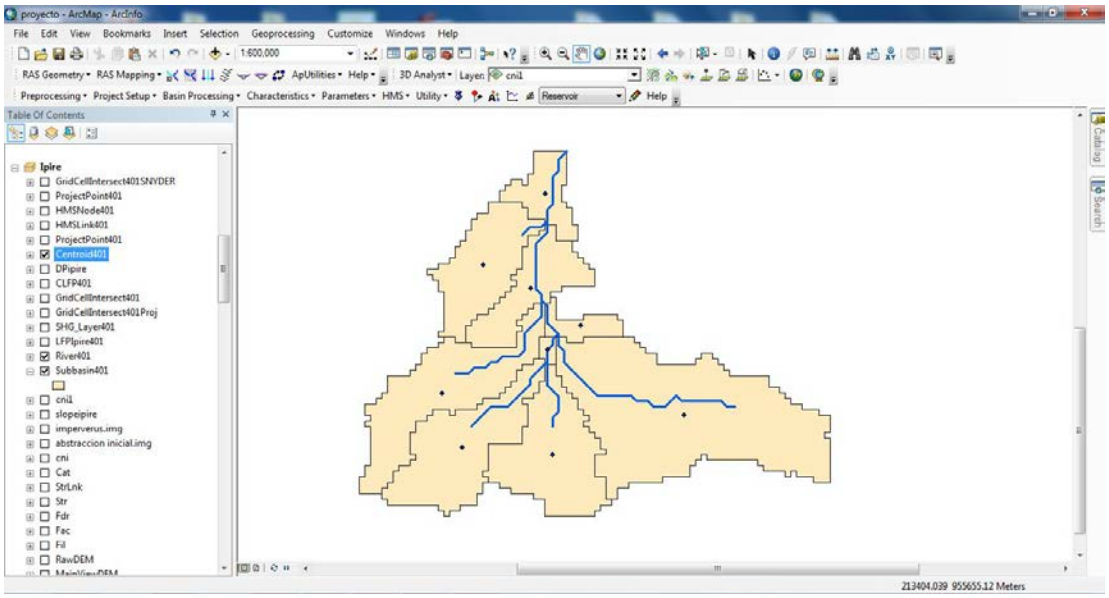


Figura 83. **Resultado de Centroide de las subcuencas**

3.17.6 Elevación del centroide (Centroid Elevation)

Esta opción computa la elevación del centroide usando como base el MDT. Las elevaciones son almacenadas en la tabla de atributos de la capa **Centroid (centroide).**

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **Centroid Elevation (Elevación del Centroide)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 84
- Se seleccionó el MDT y el centroide del paso anterior

- Se presionó **Ok**.
- Cuando el proceso finalizó se pudo observar en la tabla de atributos de la capa **Centroid** que el campo **elevation** había sido llenado.

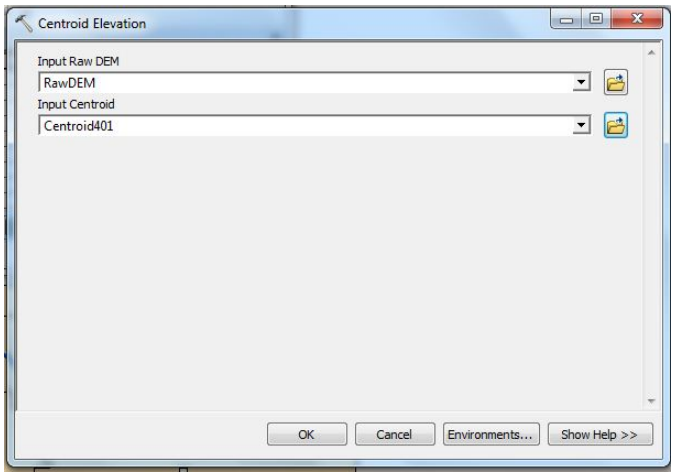


Figura 84: **Editor de Elevación del centroide**

El resultado de la operación se muestra en la Figura 85

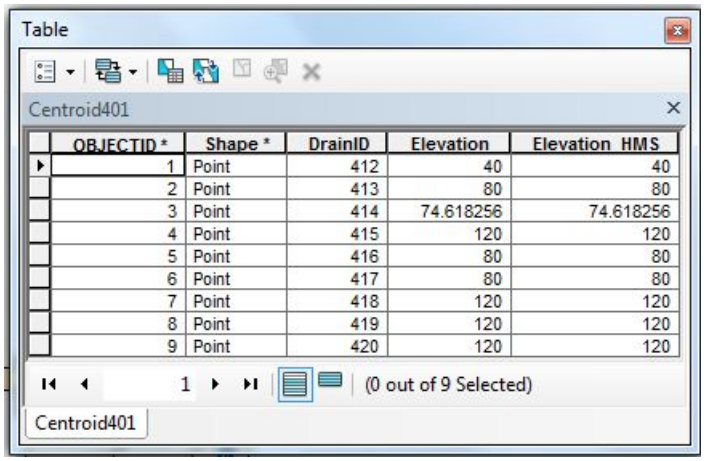


Figura 85: **Resultado de Elevación del centroide**

3.17.7 Ruta de flujo centroidal (Centroidal Flow Path)

Con esta operación se calcula la longitud del flujo al centroide mediante la proyección del centroide sobre la longitud del flujo más largo. La longitud del flujo centroidal se mide desde el punto proyección del centroide sobre la longitud del flujo más larga hasta la salida de la subcuenca.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Basin Caracteristics (Características de la cuenca)** y luego **Centroid Flow Path (Ruta del Flujo centroidal)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 86
- Se seleccionaron las capas de subcuencas, centroide y longitud del tributario mas largo.
- Se le dio nombre al archivo generado, se aceptó el nombre por defecto, y
- Se presionó **Ok**.
- Cuando el proceso finalizó se pudo observar en la tabla de atributos de la capa recién creada que el campo **CentroidalFL** había sido llenado.

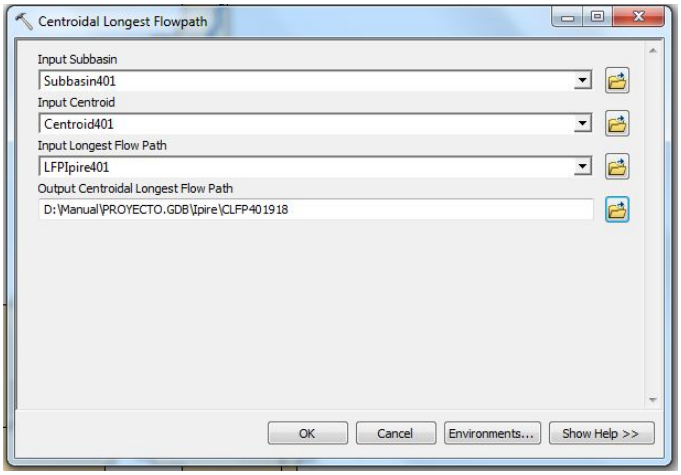
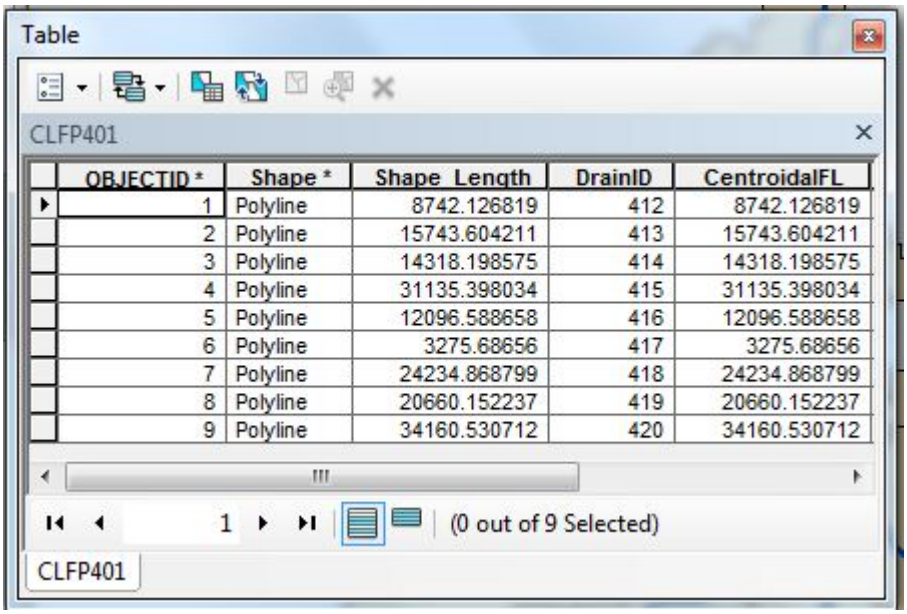


Figura 86: **Editor de la ruta del flujo centroidal**

l resultado de la operación se muestra en la Figura 87



OBJECTID *	Shape *	Shape_Length	DrainID	CentroidalFL
1	Polyline	8742.126819	412	8742.126819
2	Polyline	15743.604211	413	15743.604211
3	Polyline	14318.198575	414	14318.198575
4	Polyline	31135.398034	415	31135.398034
5	Polyline	12096.588658	416	12096.588658
6	Polyline	3275.68656	417	3275.68656
7	Polyline	24234.868799	418	24234.868799
8	Polyline	20660.152237	419	20660.152237
9	Polyline	34160.530712	420	34160.530712

Figura 87: **Resultado de la ruta del flujo centroidal**

3.18 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

Luego de extraer las características físicas de las corrientes y subcuencas, el siguiente paso es estimar los parámetros hidrológicos disponibles en el menú Hydrologic Parameters (Parametros hidrológicos) los cuales son:

- Select HMS Processes (Seleccionar procesos HMS)
- River Auto Name (Dar nombre automáticamente a los ríos)
- Basin Auto Name (Dar nombre automáticamente a las Subcuencas)
- Grid Cell Processing (Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid)
- Subbasin Parameters from Raster (Parametros de las cuencas desde los archivos formato Raster)
- Subbasin Parameters From Feature (Parametros de las cuencas desde los archivos de Caracteristicas)
- Muskingum-Cunge and Kinematic Wave Parameters (Parametros de los métodos de transformación Muskingum-Cunge y Onda Cinematica)
- Time of Concentration (tiempos de concentración)
- CN Lag Method (Método para tiempo de concentración basado en el numero de curva)

El menú para estos procesos se muestra en la figura 88.

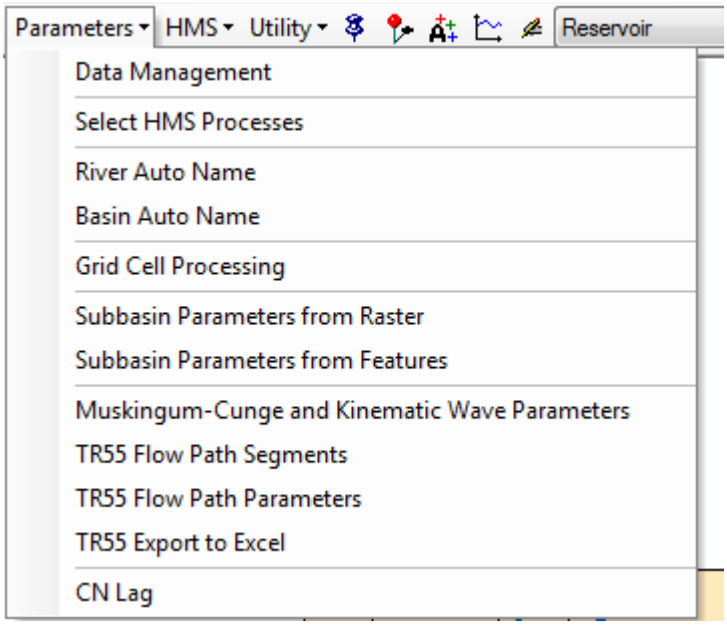


Figura 88. **Menú para estimación de los parámetros hidrológicos**

3.18.1 Selección de los procesos HMS (Select HMS Processes)

Esta herramienta permite elegir los métodos de modelación que van a ser usados en la creación del proyecto en HEC-HMS. La información obtenida en este paso se almacena en las tablas de atributos de las capas de ríos y subcuencas.

Los pasos se muestran a continuación:

Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parametros Hidrologicos)** y luego **Select HMS Processes (selección de los procesos HMS)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 89

- Se seleccionaron las capas de subcuencas y ríos.

- Se eligió el método **SCS (Servicio de Conservación de los Suelos)** como método de pérdida para las subcuencas **(subbasin – Loss Method)**
- Se eligió el método **Snyder** como método de transformación para las subcuencas **(subbasin – Loss Method)**
- Se eligió el método de **Constante Mensual (Montly Constant)** como método de flujo base para la subcuenca **(Subbasin – Baseflow Method)**
- Se eligió el método **Muskingum** como método de ruta para los rios **(River – Route Method)**.
- Se presionó **Ok**.

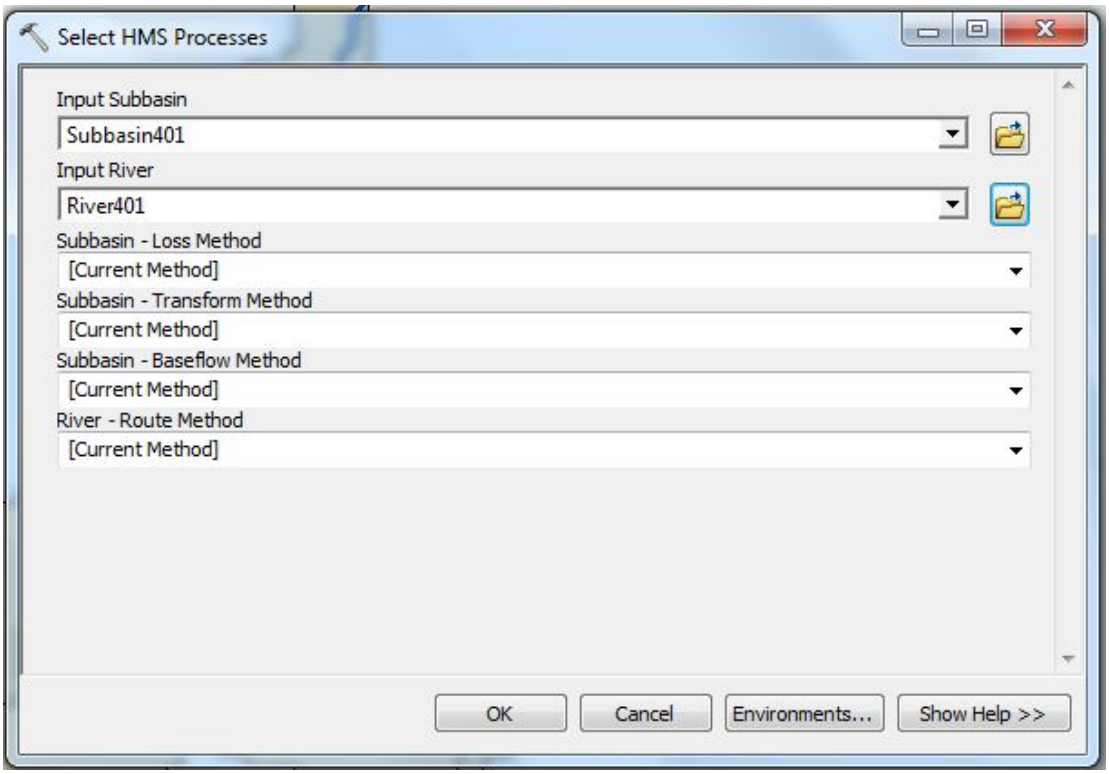


***Figura 89*. Menú de Selección de los procesos HMS**

3.18.2 Dar nombre automáticamente a los ríos (River Auto Name)

Este proceso otorga automáticamente nombres de forma secuencial desde aguas arriba hasta aguas abajo en la red hídrica; la convención para estos nombres combina la letra “R” y un número, y esta operación almacena la información en la columna “Name” (Nombre) de la tabla de atributos de la capa de ríos. La intención de esta herramienta es dar nombre únicos a los ríos de una forma rápida, aunque estos nombres por defecto se pueden modificar por unos más descriptivos pero de forma manual y esto puede llevar mucho tiempo. Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parametros Hidrologicos)** y luego **River Auto Name (Dar nombre automáticamente a los ríos)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 90
- Se seleccionó la capa de ríos.
- Se presionó **Ok**.

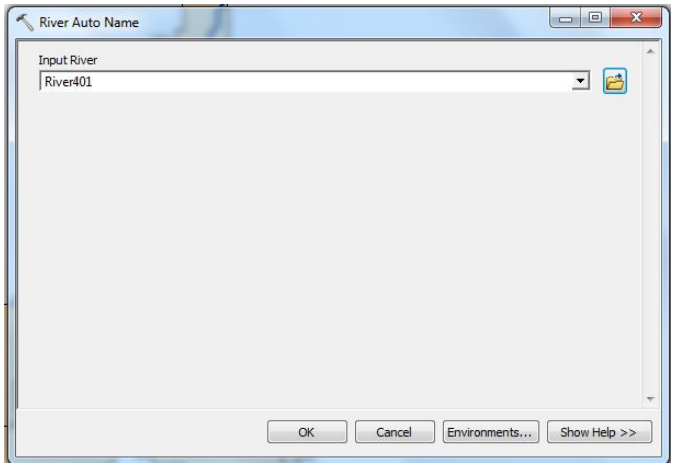


***Figura 90*. Menú Dar nombre automáticamente a los ríos**

Los siguientes pasos se pueden seguir para editar los nombres en la tabla de atributos:

- Desde la barra de Edición, se selecciona Editor y luego Start Editing (comenzar edición).
- Se selecciona la geodatabase apropiada que contiene la capa de rios.
- Se abre la tabla de atributos de la capa de rios
- Se selecciona el campo deseado en la columna “Name” (Nombre) y se reescribe el nombre.
- Una vez acabado, se selecciona Editor y luego Stop Editing (Detener Edicion).
- Y por ultimo se guardan los cambios.

3.18.3 Dar nombre automáticamente a las subcuencas (Basin Auto Name)

Este proceso otorga automáticamente nombres de forma secuencial desde aguas arriba hasta aguas abajo en la red hídrica; la convención para estos nombres combina la letra “W” y un número, y esta operación almacena la información en la columna “NAME” (Nombre) de la tabla de atributos de la capa de subcuenca. La intención de esta herramienta es dar nombre únicos a las subcuencas de una forma rápida, aunque estos nombres por defecto se

pueden modificar por unos más descriptivos pero de forma manual y esto puede llevar mucho tiempo.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parametros Hidrologicos)** y luego **Basin Auto Name (Dar nombre automáticamente a las subcuencas)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 91
- Se seleccionó la capa de subcuencas.
- Se presionó **Ok**.

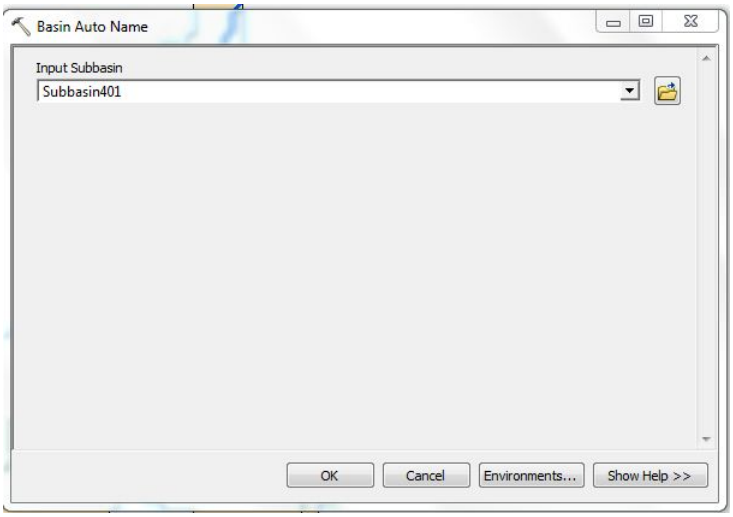


***Figura 91*. Menú Dar nombre automáticamente a las subcuencas**

Los siguientes pasos se pueden seguir para editar los nombres en la tabla de atributos:

- Desde la barra de Edición, se selecciona Editor y luego Start Editing (comenzar edición).

- Se selecciona la geodatabase apropiada que contiene la capa de subcuencas.
- Se abre la tabla de atributos de la capa.
- Se selecciona el campo deseado en la columna “Name” (Nombre) y se reescribe el nombre.
- Una vez acabado, se selecciona Editor y luego Stop Editing (Detener Edicion).
- Y por ultimo se guardan los cambios.

3.18.4 Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid (Grid Cell Processing)

Esta herramienta crea una capa de polígonos en formato GRID, que divide el área del proyecto en una grilla, esta se cruza con la capa de subcuencas para determinar las ubicaciones de cada celda y áreas dentro de cada subcuenca. Esta herramienta puede ser utilizada solo después de haber revisado los nombres de las subcuencas.

La herramienta crea una serie de nuevas capas, una nueva capa de polígonos que muestra la cuadrícula de intersección con los polígonos de la subcuenca, y además, otras tres capas proyectadas en el sistema de coordenadas Stadard Hydrologic Grid – SHG (Grilla Hidrológica estándar) o en el sistema de coordenadas Hydrologic Rainfall Analysis Project – HRAP

(Proyecto de análisis hidrológico de lluvias). Las capas incluyen una capa de polígonos en grilla, una capa de polígonos de los límites de la subcuenca, y una capa de polígonos de la intersección entre la grilla y los límites de la subcuenca. Esta última capa contiene los siguientes campos:

- Cell_Area: área del polígono que forma cada celda de la cuadricula.
- Cell_ID: Identificador único para cada polígono que forma la celda de la cuadrícula.
- Name: Nombre de la subcuenca en la que se encuentra la celda de la cuadricula.
- Cell_X: coordenada x de la celda.
- Cell_Y: coodenada y de la celda.
- Mod_Area: Area de cada polígono en kilómetros cuadrados.
- FlowLength: distancia promedio en kilómetros de cada celda del MDT en el polígono hasta el punto de descarga de la subcuenca.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parámetros Hidrológicos)** y luego **Grid Cell Processing (Procesamiento de las celdas de una cuadricula)** lo que activo el editor que se muestra en la figura 92
- Se seleccionó SHG como el método de conversión de las cuadricula.

- Se seleccionó 2000 como el tamaño de la celda de la cuadricula, su valor por defecto.
- El método SHG usa el sistema de coordenadas proyectado: **Albers Equal-Area**. No debe ser cambiado este sistema de proyección.
- Se presionó **Ok**.

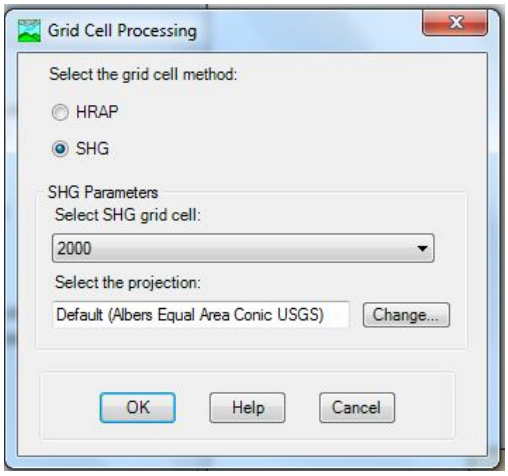


***Figura 92*. Menú 1 Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid**

- Se desplegó el editor Grid Cell Computation (Cálculo de la cuadricula) en la que se ubicaron las capas correspondientes para la subcuenca, la dirección de flujo, la longitud del flujo y se le dio nombró a la capa resultante de este procedimiento (Ver figura 93). El programa crea una capa con la subcuenca proyectada usando el mismo nombre de la cuenca agregándole el sufijo “Proj” al final. Ver figura 94
- Se presionó **Ok**.

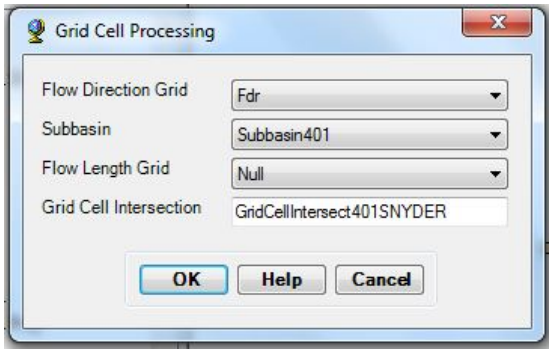


***Figura 93*. Menú 2 del Procesamiento de las celdas en archivos formato Grid**

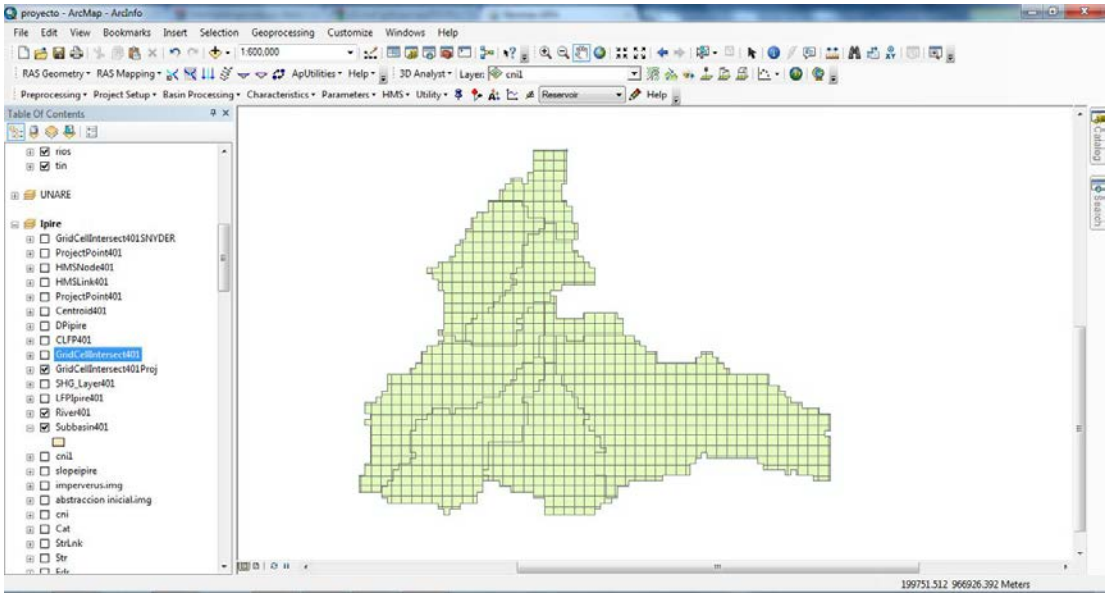


***Figura 94*. Resultado de la creación de la capa intersección de la celdas GRID del proyecto**

- Se desplegó el editor Grid Cell View (Visor de Cuadricula) en el que se ubicó la capa de la subcuenca proyectada creada en el paso anterior y se le dio nombre a la capa GRID CELL, El programa da un nombre por defecto el nombre SGH_Layer acompañado de un número. Ver figura 95

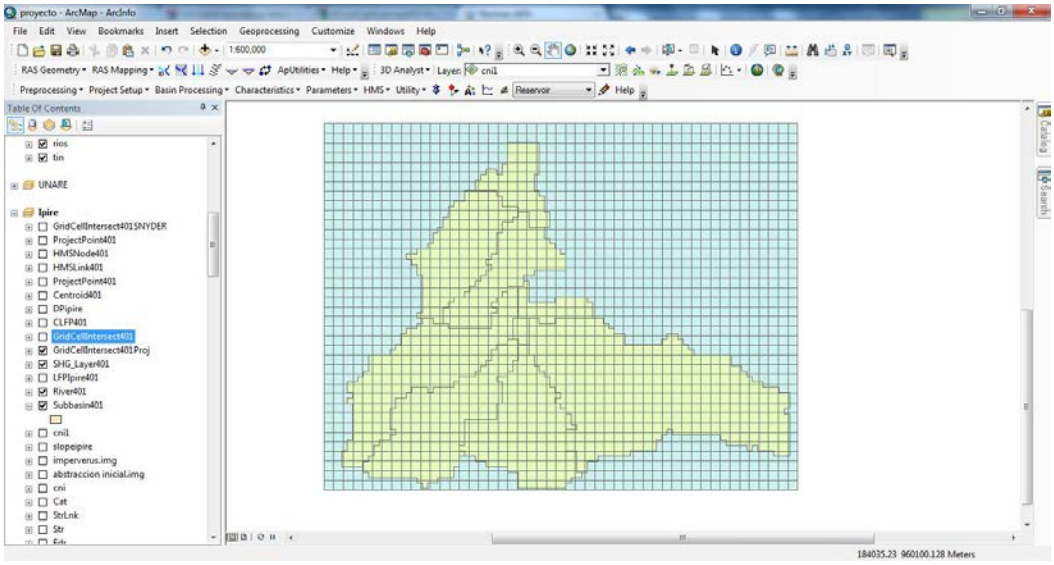


***Figura 95*. Resultado de la creación de la capa SGH**

3.18.5 Parámetros de la subcuenca desde un archivo Raster. (Subbasin Parameters from Raster)

Esta herramienta opera sobre una capa de formato Raster y calcula los parámetros hidrológicos promedio para cada subcuenca, estos se añaden a la tabla de atributos de la capa de subcuencas basado en los procesos HMS seleccionados. Solo los parámetros que puedan ser estimados a partir de los archivos presentes en la geodatabase se agregan a la tabla de atributos, el resto de los parámetros deben ser introducidos manualmente en un modelo HEC-HMS y determinados mediante la Calibración del mismo con eventos históricos para el proceso de lluvia-escorrentía.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parámetros Hidrológicos)** y luego **Subbasin Parameter from Raster (Parámetros de la subcuenca desde un archivo raster)** lo que activa el editor que se muestra en la figura 96.
- Se seleccionó la capa de subcuencas.
- Se presionó **Ok**.

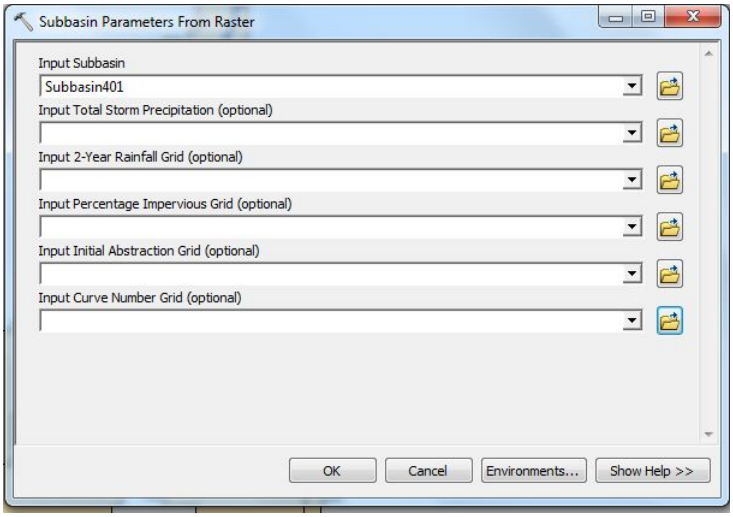


Figura 96. **Editor de Parámetros de la subcuenca desde archivo RASTER**

3.19 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA PARA LAS SUBCUENCAS

El Número de Curva para la subcuenca será estimado mediante la construcción de un tema **Grid** para el Número de Curva. La construcción se basó en el procedimiento especificado en el Apéndice E del Manual de Usuario de HEC-GeoHMS, que se esquematiza en la figura 97.

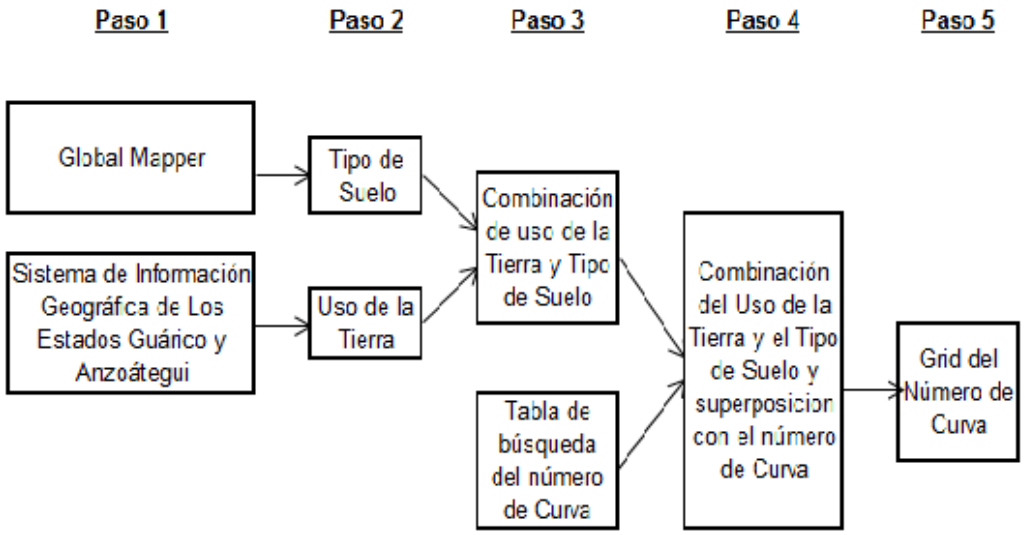


Figura 97. **Metodología para la estimación del número de curva para las subcuencas**

3.19.1 Procesamiento del tipo de suelo

La base de datos utilizada para el suelo se fundamentó en los "Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001", este documento contiene una metodología para la definición de regiones, sub-regiones y áreas naturales del país y fue suministrado por el MARN.

3.19.2 Unión de la bases de datos para suelos y creación del uso de la tierra

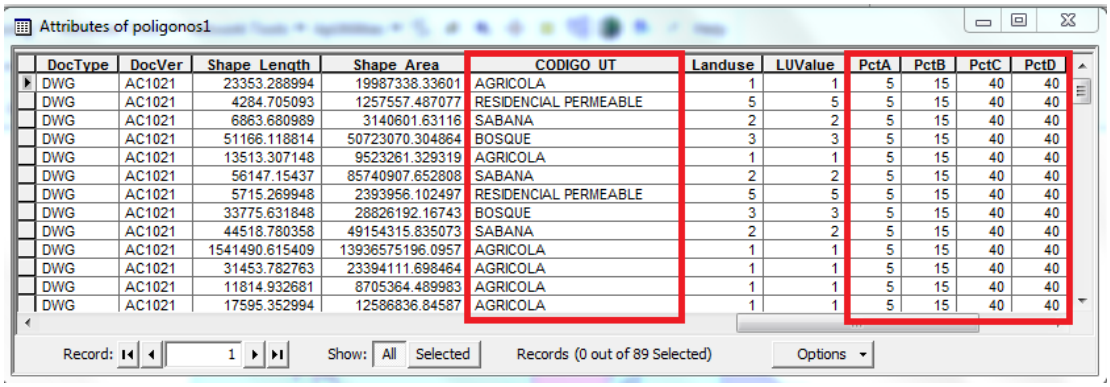
Se requirió unir diversas bases de datos del suelo para establecer una base de datos común. La creación de la base de datos digitalizados del uso del suelo se ha realizado a partir de fotografías aéreas obtenidas desde Google Earth y otras fuentes por parte de la división de Sistemas de

Información Geográfica de los Estados Guárico y Anzoátegui. Para crear una combinación única del uso de la tierra y el tipo de suelo se requirió el uso del software ArcGis v10.0 y de la extensión Hec-GeoHMS v5.0.

3.19.3 Combinación del uso de la tierra y tipo de suelos con la tabla de búsqueda del Número de Curva

- **Combinación del uso de la tierra y tipo de suelos**

Comparando la clasificación del tipo del suelo de la zona según la base de datos y la descripción de la clasificación hidrológica de los suelos (Monsalve, 1995), se estimaron los porcentajes de grupos de suelos hidrológicos; “PctA”, “PctB”, “PctC” y “PctD”, de las zonas delimitadas en el plano de la base de datos, como se muestra en la Figura 98.



DocType	DocVer	Shape_Length	Shape_Area	CODIGO_UT	Landuse	LUValue	PctA	PctB	PctC	PctD
DWG	AC1021	23353.288994	19987338.33601	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40
DWG	AC1021	4284.705093	1257557.487077	RESIDENCIAL PERMEABLE	5	5	5	15	40	40
DWG	AC1021	6863.680989	3140601.63116	SABANA	2	2	5	15	40	40
DWG	AC1021	51166.118814	50723070.304864	BOSQUE	3	3	5	15	40	40
DWG	AC1021	13513.307148	9523261.329319	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40
DWG	AC1021	56147.15437	85740907.652808	SABANA	2	2	5	15	40	40
DWG	AC1021	5715.269948	2393956.102497	RESIDENCIAL PERMEABLE	5	5	5	15	40	40
DWG	AC1021	33775.631848	28826192.16743	BOSQUE	3	3	5	15	40	40
DWG	AC1021	44518.780358	49154315.835073	SABANA	2	2	5	15	40	40
DWG	AC1021	1541490.615409	13936575196.0957	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40
DWG	AC1021	31453.782763	23394111.698464	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40
DWG	AC1021	11814.932681	8705364.489983	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40
DWG	AC1021	17595.352994	12586836.84587	AGRICOLA	1	1	5	15	40	40

Figura 98. **Porcentajes de grupos de suelos hidrológicos y uso de la tierra**

- **Tablas de búsqueda del Número de Curva**

En la tabla de contenidos de ArcMap, se crearon tres tablas para diferentes condiciones de humedad del suelo; seca, normal y húmeda, respectivamente CN I, CN II y CN III. La asignación de los valores de CN para los tipos de suelos A, B, C y D se realizó con base en las tablas del Apéndice H de este documento desarrolladas por el Servicio de Conservación de Suelos y publicadas en el Reporte Técnico 55 (comúnmente conocido como TR-55). Para ello se importaron las tablas creadas en un archivo de Microsoft Excel y se guardaron las tablas dentro de la carpeta del proyecto, como se muestra en la Figura 99

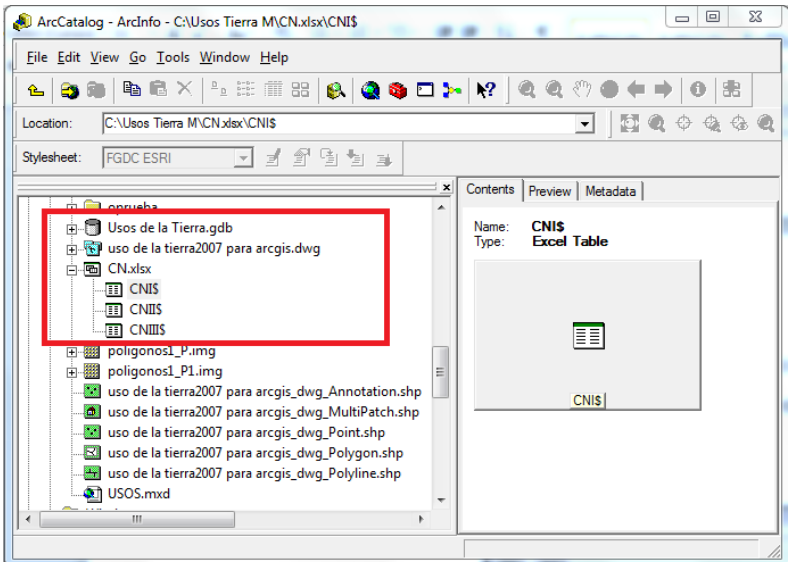


Figura 99. **Creación de tablas de búsqueda de CN para distintas condiciones de humedad del suelo**

Una vez creadas las tablas de búsqueda de CN para diferentes condiciones de humedad del suelo, éstas se combinaron con el tema de

polígonos referente al uso de la tierra/tipo de suelo mediante la aplicación de la opción Generate CN theme ubicado en el menú Utility de GeoHMS, a la combinación del tema de polígonos con el campo del número de curva se le denomina como tema de polígonos del número de curva, la Figura 100 muestra esta combinación.

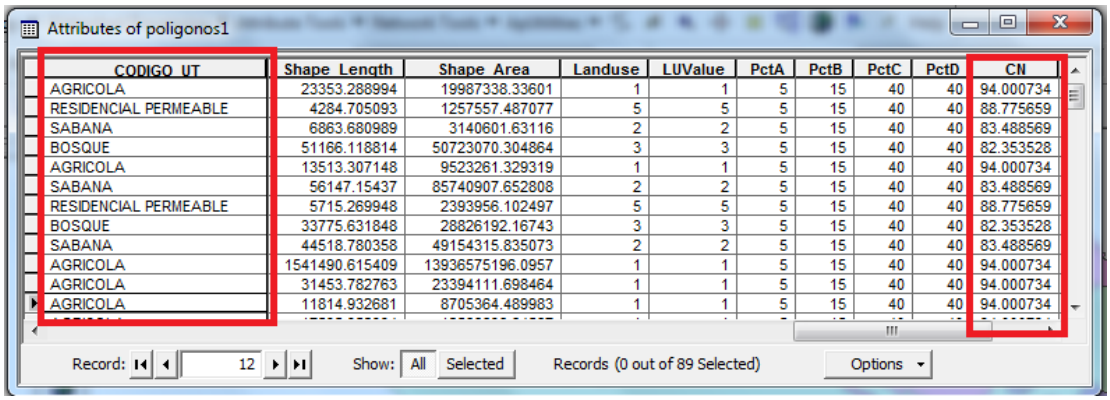


Figura 100. **Polígonos del número de curva**

3.19.4 Conversión del Tema de Polígonos del Número de Curva a un tema de Número de Curva en cuadrículas (Grid)

Para convertir el tema de polígonos del número de curva en un tema grid de número de curva se usó la Extensión ***Utility*** de Hec-GeoHMS, en la cual se selecciona la herramienta ***Generate CN Grid*** , introduciendo el ***HydroDEM*** perteneciente a la cuenca del río Unare, el polígono de número de curva generado en el paso anterior y finalmente la tablas de CN que fueron importadas desde Microsoft Excel, es importante mencionar que se generará un grid para cada Número de Curva, esto se aprecia en la Figura 101.

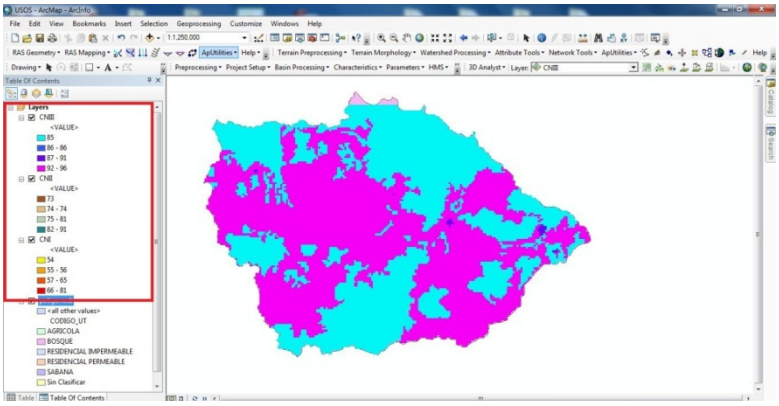


Figura 101. **Temas grid en la Tabla de contenidos y muestra de mapas**

3.19.5 Uso del tema en cuadrículas del Número de Curvas

Para usar los temas Grid generados, al momento de utilizar la Herramienta Data Managment de Hec-GeoHMS, se cargan se selecciona el número de curva que se desea utilizar como se muestra en la Figura 102

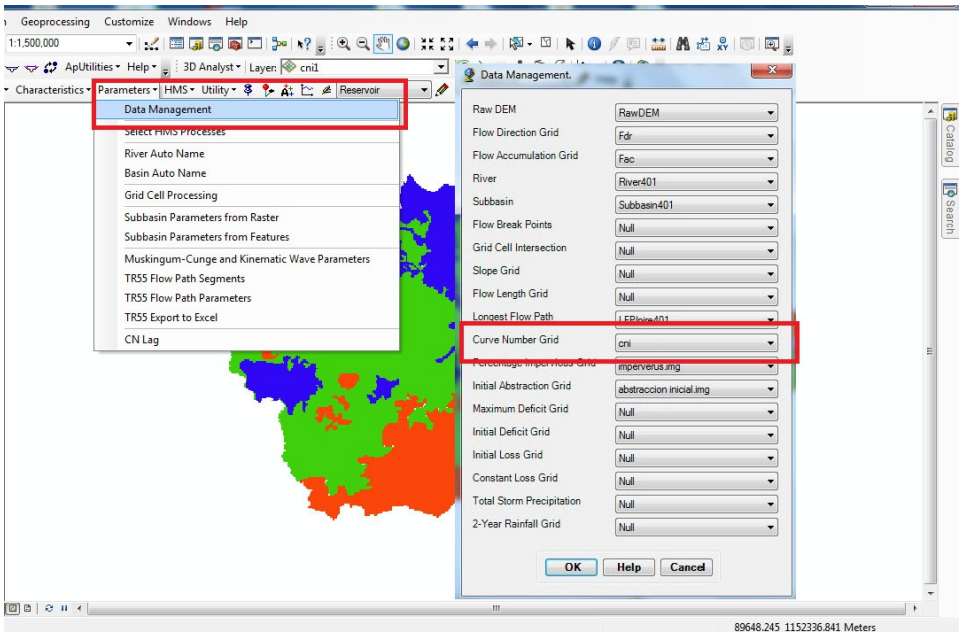


Figura 102. **Ingreso de temas para la estimación del número de curva**

3.20 MÉTODO CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETARDO DE LA CUENCA BASADO EN EL NÚMERO DE CURVA (CN LAG METHOD)

Esta herramienta calcula de forma automática el tiempo de retardo de la cuenca. La tabla de atributos de la capa subcuenca posee dos campos denominados “BasinCN” y “BasinSlope” que fueron llenados en el procedimiento: “*Parámetros de la subcuenca desde un archivo Raster*” del menú de parámetros hidrológicos, de la misma forma debe existir un campo llamado “slope” que fue llenado su respectivo momento en la ejecución del “*Preprocesamiento del terreno*”; si este paso fue omitido deben llevarse los campos de forma manual.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **Hydrologic Parameters (Parámetros Hidrológicos)** y luego **CN Lag (cálculo del tiempo de retardo de la cuenca basado en el número de curva).**
- Se presionó **Ok**.

3.21 TRABAJO EN HEC-HMS

Para iniciar el trabajo con HEC-HMS, posterior a la instalación del programa en el computador, se debe ubicó el icono que se muestra en la Figura 103

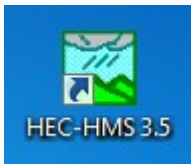


Figura 103. **Icono HMS**

El trabajo con HMS requiere el desarrollo de los siguientes tres componentes; **Basin model** (Modelo de Cuenca); **Meteorologic model** (Modelo Meteorológico) y **Control Specifications model** (Modelo de Especificaciones de Control). La configuración inicial, calibración y el trabajo con los componentes se describen posteriormente.

3.21.1 Pantalla del programa

La pantalla del programa contiene una barra de título, sistema de menús, barra de herramientas, y cuatro paneles. Estos paneles se conocen como el Explorador de Cuenca, Escritorio, Editor de Componentes, y el Registro de Mensajes, como se muestra en la Figura 104. La barra de título muestra la versión del programa utilizado y la localización del proyecto

abierto actualmente. Las otras partes de la pantalla del programa se discuten en detalle en este capítulo.

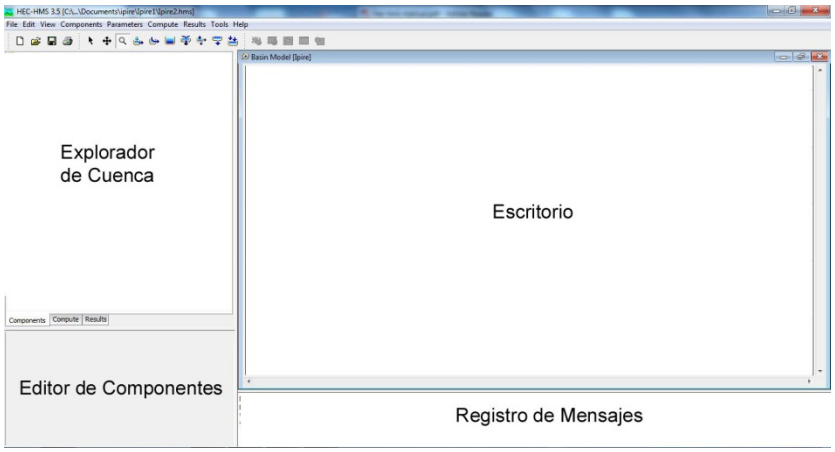


Figura 104. **Pantalla del Programa**

3.21.2 Configuración Inicial

Para definir la configuración inicial, en primer lugar hay que abrir el proyecto, para ello seleccionamos; en el menú **File ⇒ Open Project**, Después de presionar el botón se abrirá una ventana donde se puede nombrar, elegir una ubicación en su computadora o un equipo de red para guardar el nuevo proyecto, y escribir una descripción para el nuevo proyecto. Si la descripción es larga, puede pulsar el botón a la derecha del campo de descripción para abrir un editor. También debe seleccionar el sistema de unidades predeterminado, siempre se puede cambiar el sistema de unidades de cualquiera de los componentes después de su creación, pero el valor por defecto proporciona comodidad. Pulse el botón Crear cuando esté satisfecho

con el nombre, la ubicación y descripción. No es posible pulsar el botón Crear, si no hay ningún nombre o la ubicación se especifica para el nuevo proyecto. Si usted cambia de opinión y no quiere crear un nuevo modelo meteorológico, pulse el botón Cancelar o el botón X en la parte superior derecha de la ventana Crear una nuevo proyecto.

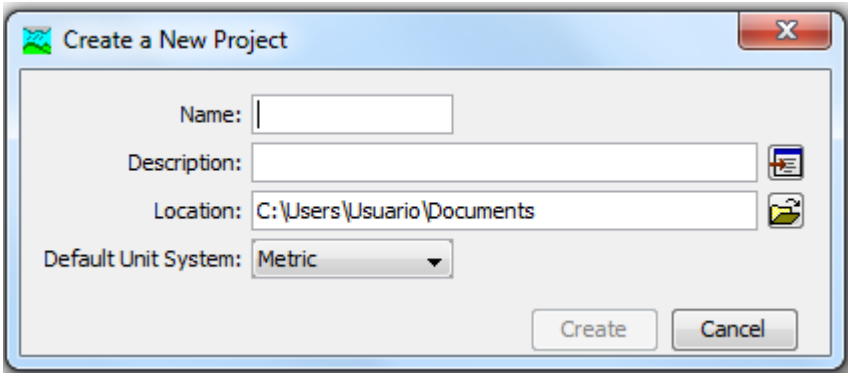


Figura 105. **Creación del nuevo proyecto.**

3.21.3 Ingreso de datos compartidos

Se selecciona la pestaña ***File*** (archivo) y en el menu que se despliega seleccionar ***Import…*** (importar…), a continuación se despliega una pestaña en la cual se selecciona la opción ***Simulation Run*** (Corrida de Simulación), para importar el proyecto ya creado en el Hec-GeoHMS y se cargarán en el explorador de cuenca las carpetas con el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y el modelo de Especificaciones de Control.

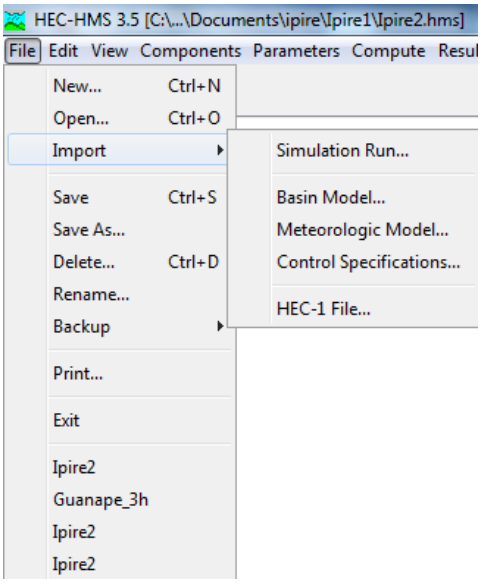


Figura 106. **Selección de Archivos a Importar desde Hec-GeoHMS**

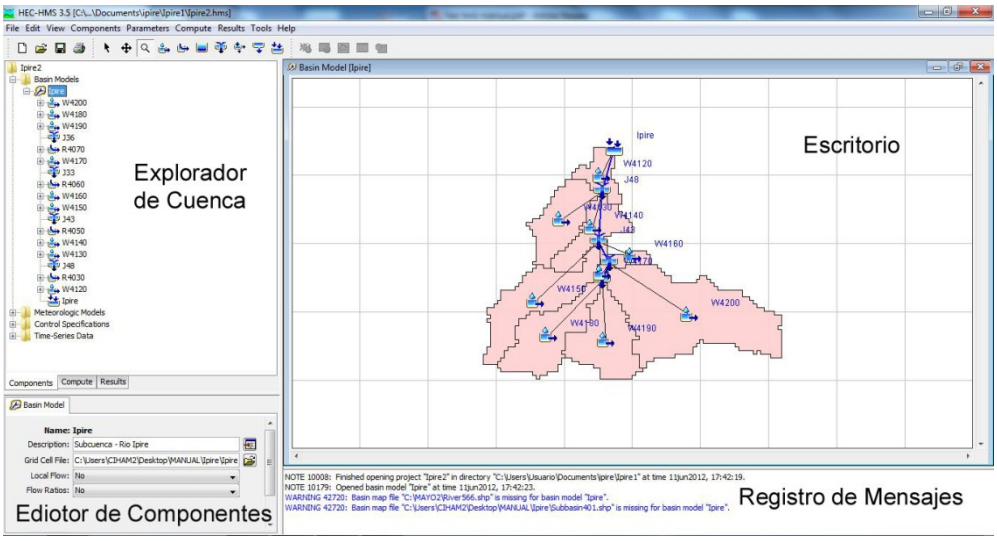


Figura 107. **Corrida de simulación importado desde Hec-GeoHMS**

3.22 EDICION DE PARÁMETROS DE LA CUENCA

El modelo de simulación importado posee cuatro carpetas de selección que se explican a continuación:

3.22.1 Modelo de Cuenca

El Modelo de Cuenca es uno de los principales componentes de un proyecto. Su propósito principal es convertir condiciones atmosféricas en caudal en lugares específicos de la cuenca. Los Elementos hidrológicos se utilizan para romper la cuenca en pedazos manejables, los cuales están conectados entre sí en una red dendrítica para formar una representación del sistema de flujo.

Hay una serie de propiedades para los modelos de cuencas que están seleccionadas en el editor de componentes (Figura 108). Estas propiedades controlan los valores de configuración para el modelo de la cuenca o para cada uno de los elementos dentro del modelo hidrológico de la cuenca, accediendo al editor de componentes desde el Explorador de Cuenca en la ficha "Componentes" haciendo clic en el icono de un modelo de cuenca.

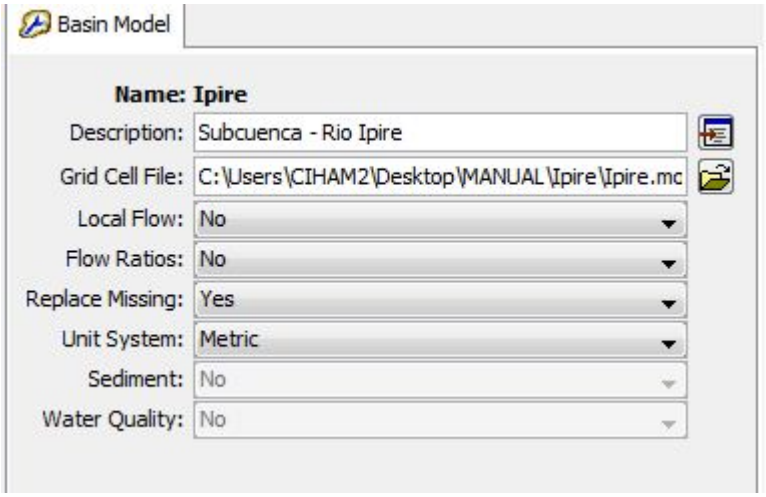


Figura 108. **Componentes del Editor de Modelo de la Cuenca y opciones de cálculos de flujo**

3.22.2 Menú de Parámetros

El menú de Parámetros contiene los métodos a aplicar para la cuenca global, estos son:

- Loss (Pérdidas): Los métodos de pérdidas son de conservación de la masa, esto es, la suma de la infiltración y la precipitación sobre la superficie será siempre igual a la precipitación entrante total.

Para editar este parámetro se selecciona la cuenca, en el menú parámetros en la opción ***Loss*** se escoge el método de ***SCS Curve Number*** (Número de Curva SCS). (Ver Figura 109)

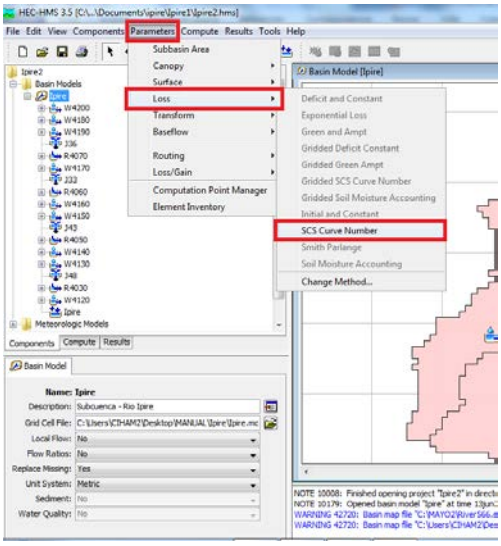
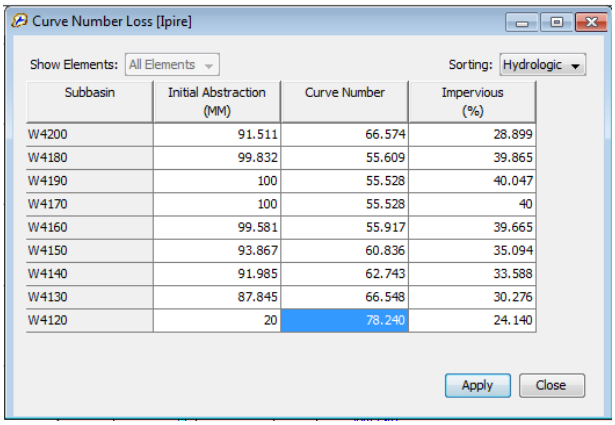


Figura 109. **Selección del método de pérdidas SCS Curve Number para la simulación de la cuenca del río Ipire.**

Luego de este paso se abre una ventana que muestra las variables a considerar para el método en cada elemento, se pueden asignar manualmente los valores a cada casilla y posteriormente hacer click en el botón ***Apply*** (aplicar), o en este caso, como es una un archivo importado desde el Hec-GeoHMS el modelo ya trae los valores de las variables asignadas con anterioridad. (Ver Figura 110)



Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W4200	91.511	66.574	28.899
W4180	99.832	55.609	39.865
W4190	100	55.528	40.047
W4170	100	55.528	40
W4160	99.581	55.917	39.665
W4150	93.867	60.836	35.094
W4140	91.985	62.743	33.588
W4130	87.845	66.548	30.276
W4120	20	78.240	24.140

Figura 110. **Variables del método de pérdidas SCS Curve Number para la simulación de la cuenca del río Ipire.**

- Transform (Transformación): los cálculos de la escorrentía superficial reales se llevan a cabo mediante un método de transformación de contenido dentro de la subcuenca.

Para editar este parámetro se selecciona la cuenca, en el menú parámetros en la opción ***Transform*** se escoge en este ejemplo el método ***Snyder Unit Hydrograph*** (Hidrograma unitario de Snyder). (Ver Figura 111)

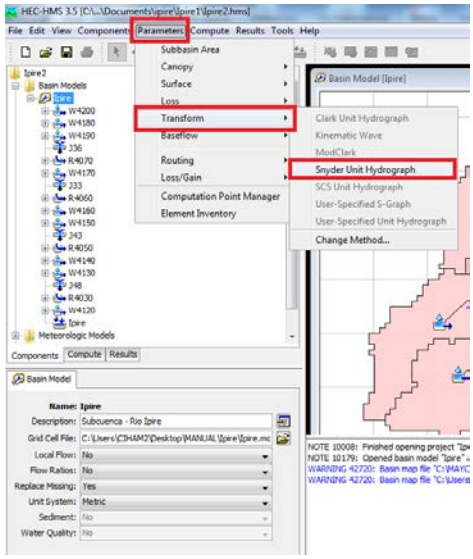


Figura 111. **Selección del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

Luego de este paso se abre una ventana que muestra las variables a considerar para el método en cada elemento, se pueden asignar manualmente los valores a cada casilla y posteriormente hacer click en el botón ***Apply*** (aplicar), o en este caso, como es una un archivo importado desde el Hec-GeoHMS el modelo ya trae los valores de las variables asignadas con anterioridad. (Ver Figura 112)

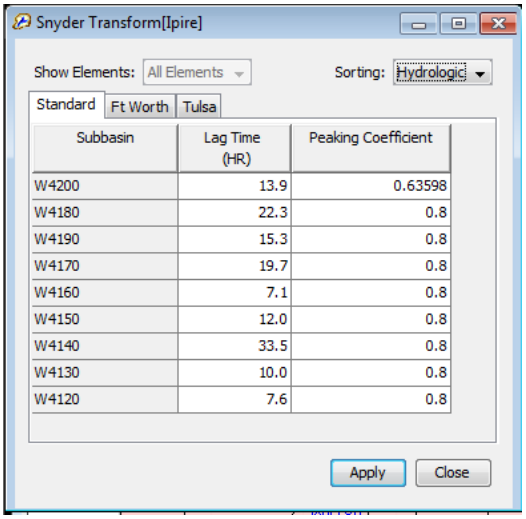


Figura 112. **Variables del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

- Baseflow (Flujo base): los cálculos del subsuelo reales se llevan a cabo mediante un método de flujo base contenida dentro de la subcuenca,

Para editar este parámetro se selecciona la cuenca, en el menú parámetros en la opción ***Baseflow*** se escoge en este ejemplo el método ***Constant Monthly*** (Mensual constante). (Ver Figura 113)

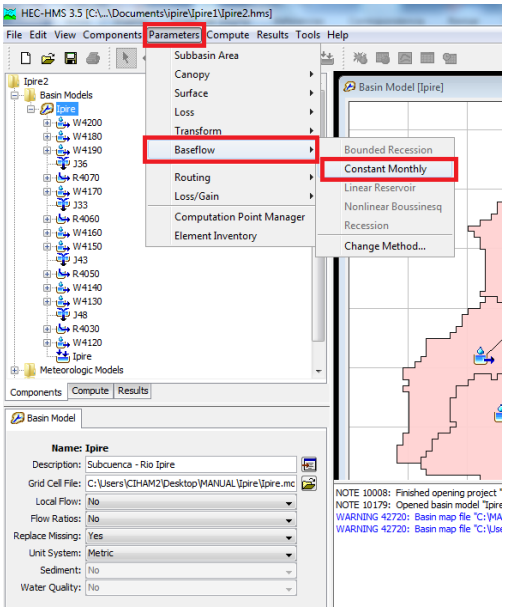


Figura 113. **Selección del método Mensual Constante para el Flujo base en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

Luego de este paso se abre una ventana que muestra las variables a considerar para el método en cada elemento, se le asignan manualmente los valores a cada casilla y posteriormente hacer click en el botón ***Apply*** (aplicar). (Ver Figura 114)

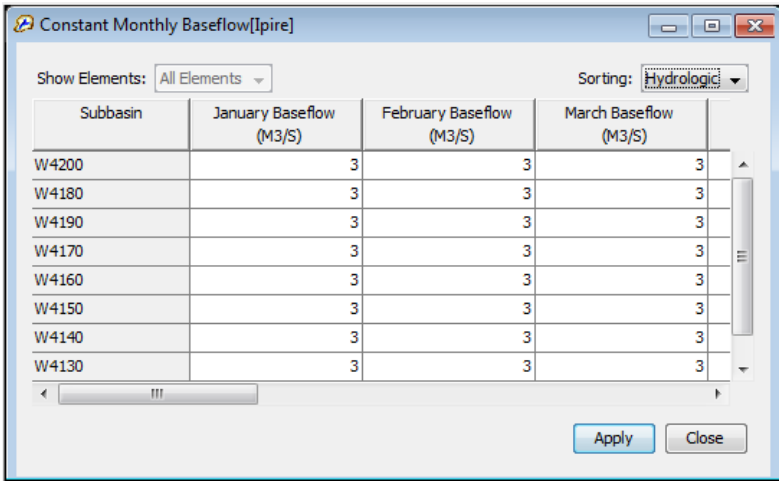


Figura 114. **Variables del método de Constante Mensual para el Flujo Base en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

- Routing (Tránsito): los cálculos de los tramos del río son ejecutados mediante un método de tránsito intrínseco a cada río en particular. Cada método implementa una metodología hidrológica de tránsito a comparar con un valor hidráulico estimado que provee las ecuaciones completas de flujo inestable.

Para editar este parámetro se selecciona la cuenca, en el menú parámetros en la opción ***Routing*** se escoge en este ejemplo el método ***Muskingum*** (Ver Figura 115)

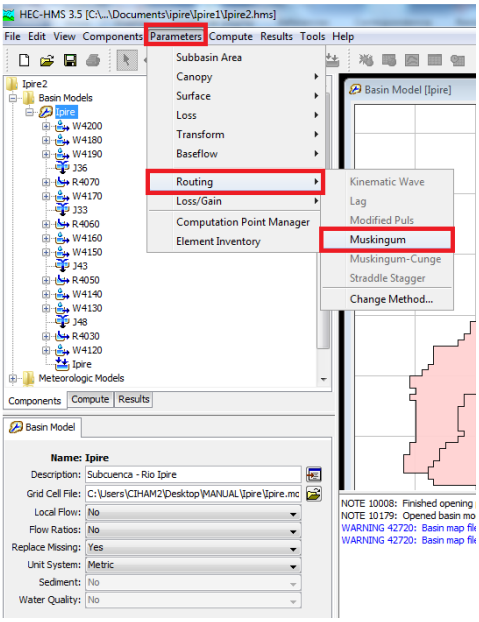


Figura 115. **Selección del método Muskungum para el tránsito de crecientes en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

Luego de este paso se abre una ventana que muestra las variables a considerar para el método en cada elemento, se le asignan manualmente los

valores a cada casilla y posteriormente hacer click en el botón ***Apply*** (aplicar). (Ver Figura 116)

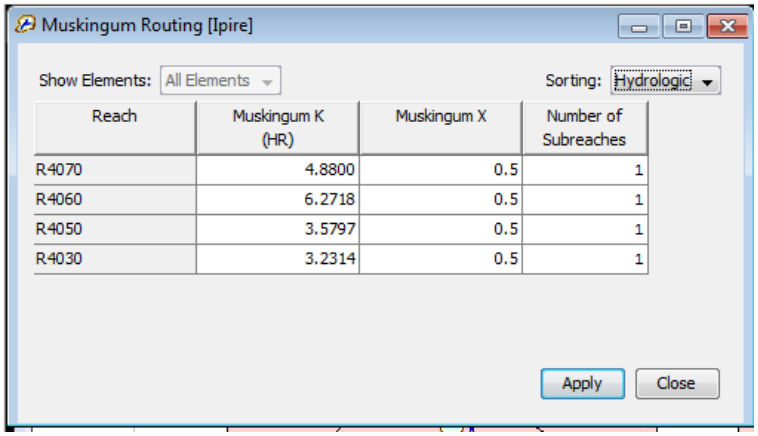


Figura 116. **Variables del método de Hidrograma Unitario de Snyder para la Transformación de lluvia-escorrentía en la simulación de la cuenca del río Ipire.**

3.23 EDICION DE SERIES DE TIEMPO

Los modelos hidrológicos a menudo requieren de series temporales de datos de precipitación media de la cuenca y una serie temporal de datos de flujo, a menudo llamado el flujo observado o descarga observada, los cuales son útiles para la simulación y calibración de un modelo.

3.23.1 Pluviómetros

Para la creación de los pluviómetros existentes en la cuenca, se realiza a través del administrador de los datos de serie de tiempo. Para acceder al administrador, haga clic en el menú de componentes y seleccione

Time-Series Data Manager (Administrador de Series de tiempo). Se abrirá una ventana en cuya parte superior se encuentra un menú desplegable que contiene todos los tipos de datos de serie de tiempo que posee el programa, allí se selecciona la opción ***Precipitation Gages*** (Pluviómetros). Ver Figura 117

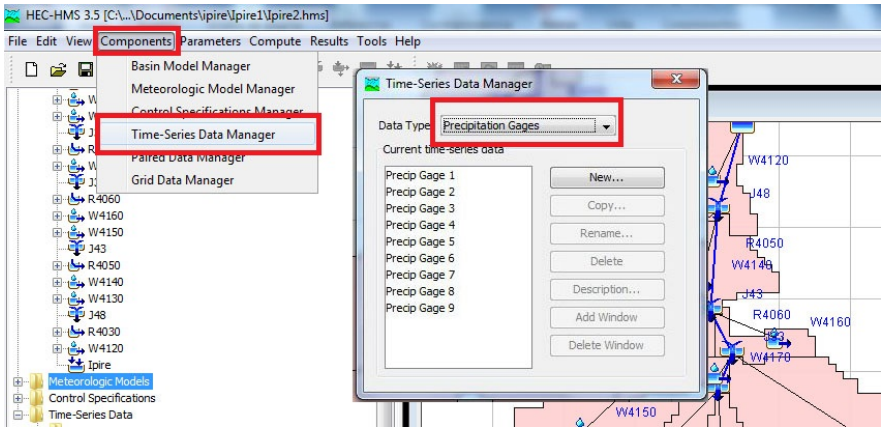


Figura 117. **Administrador de Series de Tiempo para la generación de pluviómetros.**

Una vez que se tengan la cantidad de pluviómetros existentes en la zona, se introduce la información correspondiente para cada uno, en la pestaña ***Time-Series Gage*** que se encuentra en el editor de componentes, y se llenan los siguientes campos: ***Description*** (Descripción), ***Data Source*** (Fuente de la información a suministrar), ***Units*** (Unidades), ***Time Interval*** (Intervalo de tiempo), ***Latitud Degrees*** (Latitud en Grados), ***Latitud Minutes*** (Latitud en Minutos), ***Latitud Seconds*** (Latitud en Segundos). Ver Figura 118

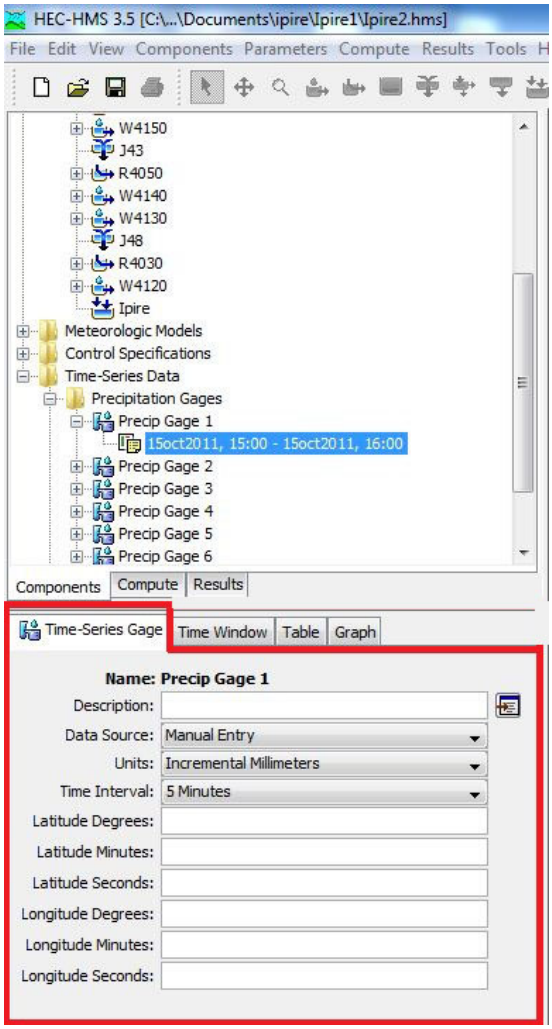


Figura 118. **Editor de características de los pluviómetros.**

Una vez definidas las características del pluviómetro, en la pestaña siguiente ***Time Window*** (Ventana de Tiempo) se introducirá la información correspondiente a la fecha y hora de inicio y fin del modelo de precipitación que se va a utilizar. Ver figura 119

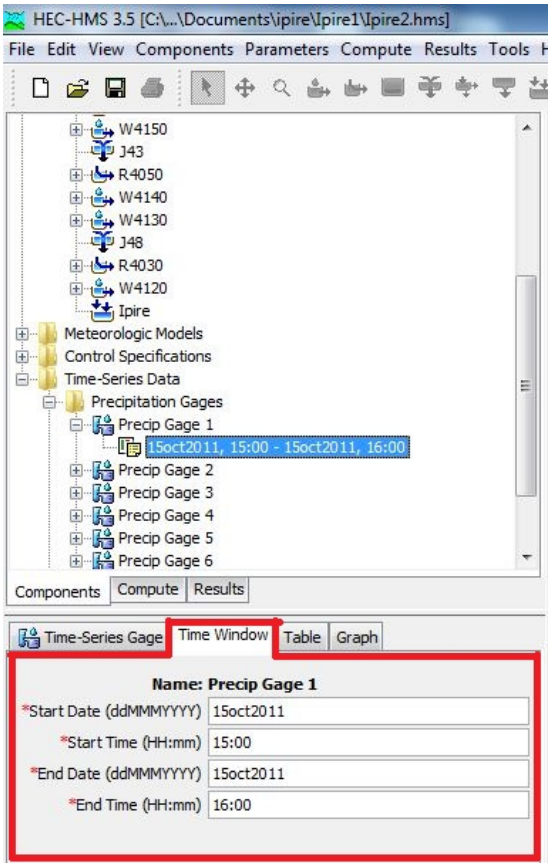


Figura 119. **Editor de Fecha y hora inicial y final de la precipitación.**

Luego de indicar el intervalo de tiempo a trabajar, en la pestaña siguiente ***Table*** (Tabla), se introduce la información de la lluvia para cada intérvalo de tiempo. Ver Figura 120.

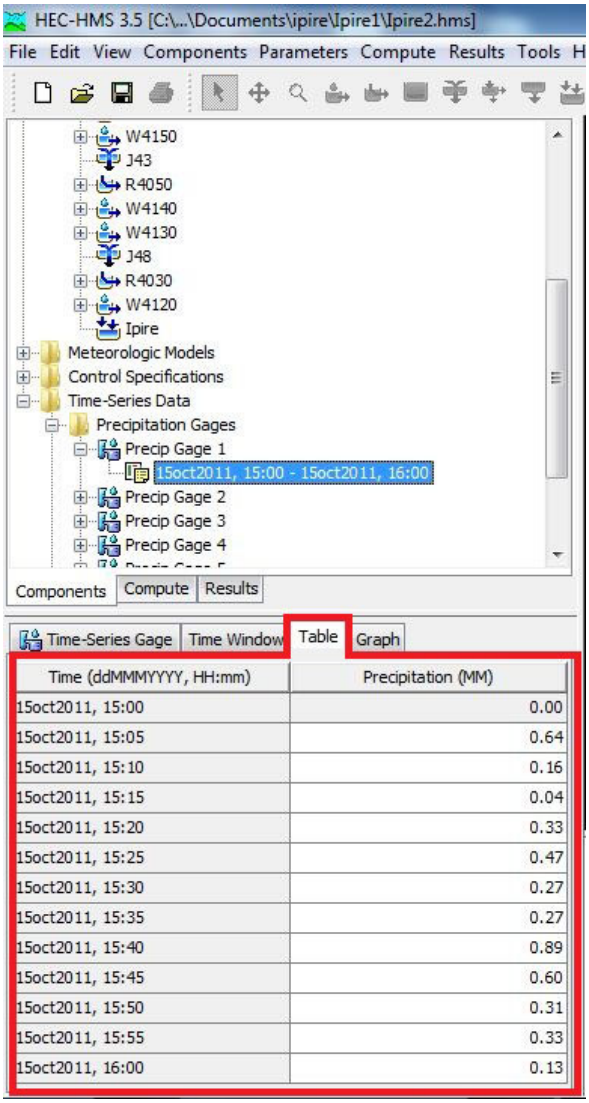


Figura 120. **Editor de Tabla de valores de precipitación.**

En la pestaña siguiente Graph (Gráfico), se visualiza el Hietograma correspondiente a la precipitación introducida. Ver Figura 121.

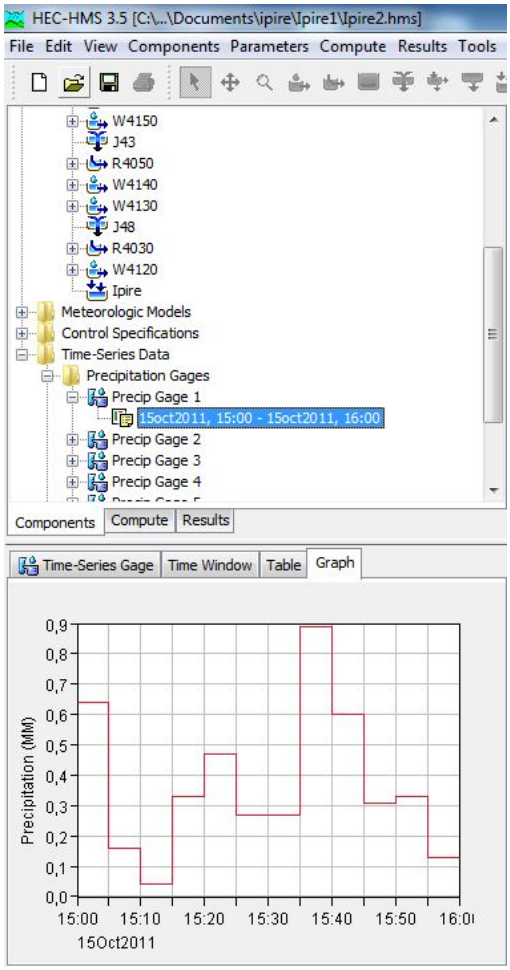


Figura 121. **Hietograma correspondiente de la Precipitación.**

3.23.2 Descarga

Para introducir los datos de descarga observado existente en la cuenca, se realiza a través del administrador de los datos de serie de tiempo. Para acceder al administrador, haga clic en el menú de componentes y seleccione ***Time-Series Data Manager*** (Administrador de Series de tiempo). Se abrirá una ventana en cuya parte superior se encuentra un menú desplegable que contiene todos los tipos de datos de serie de tiempo que

posee el programa, allí se selecciona la opción ***Discharge Gages*** (Medidor de Descarga) Ver Figura 122.

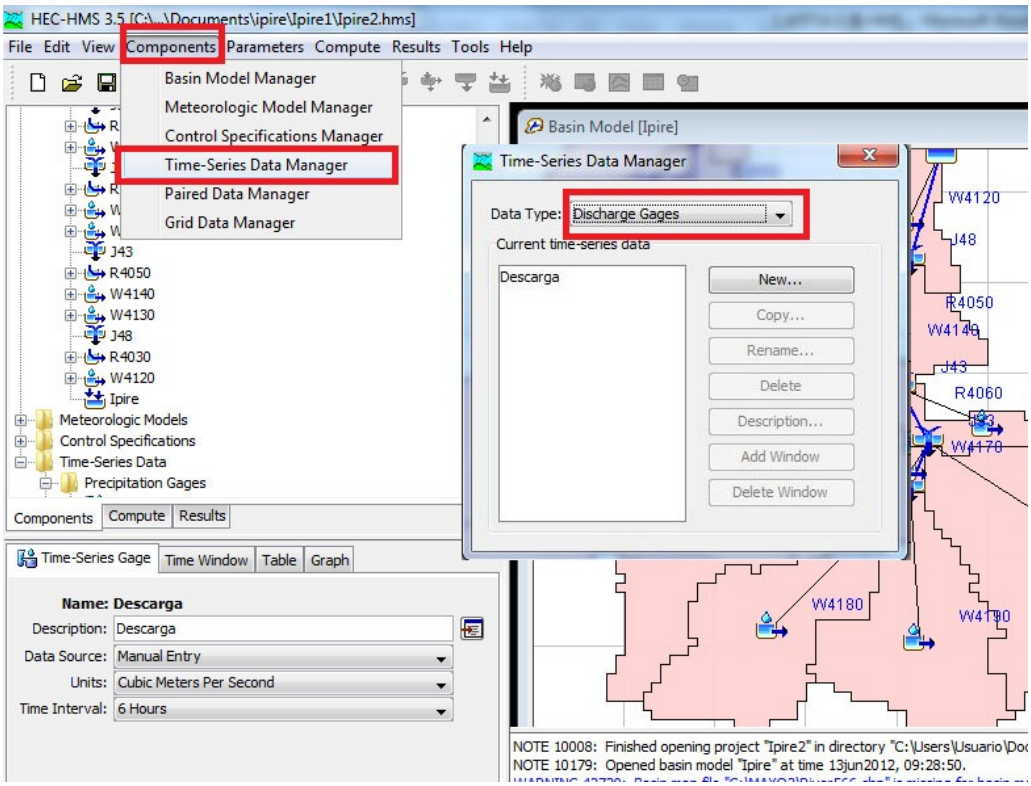


Figura 122. **Administrador de Series de Tiempo para introducir la descarga observada correspondiente a la precipitación introducida.**

Una vez que se introdujo el Medidor de Descarga, en la pestaña ***Time-Series Gage*** que se encuentra en el editor de componentes, se llenan los siguientes campos: ***Description*** (Descripción), ***Data Source*** (Fuente de la información a suministrar), ***Units*** (Unidades), ***Time Interval*** (Intervalo de tiempo). Ver Figura 123

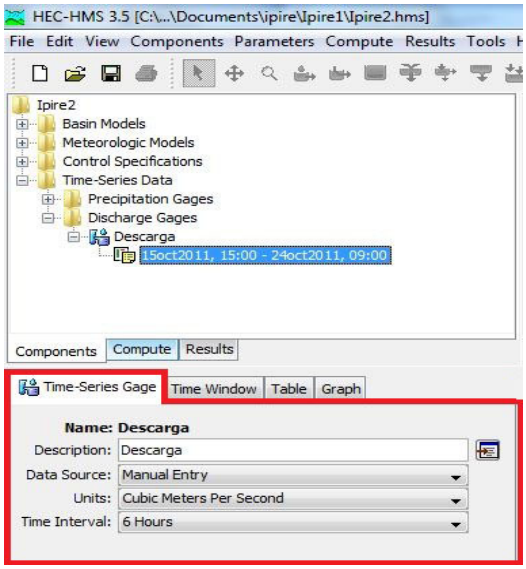


Figura 123. **Editor de características del dispositivo de Descarga.**

Posteriormente en la pestaña ***Time Window*** (Ventana de Tiempo) se introducirá la información correspondiente a la fecha y hora de inicio y fin de la Descarga que se va a utilizar. Ver figura 124

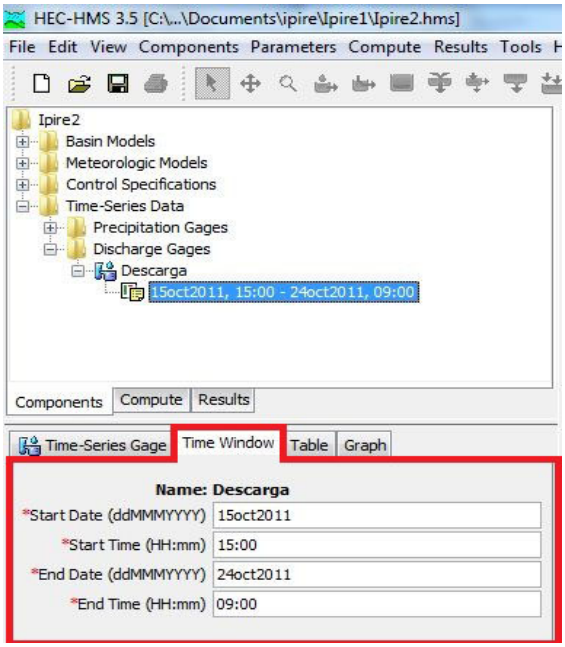


Figura 124. **Editor de Fecha y hora inicial y final de la descarga.**

Luego de indicar el intervalo de tiempo a trabajar, en la pestaña siguiente ***Table*** (Tabla), se introduce la información de descarga para cada intervalo de tiempo. Ver Figura 125

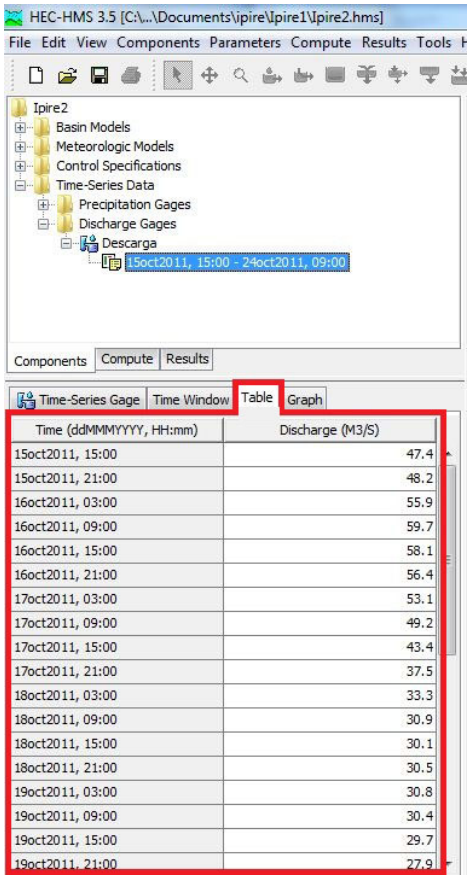


Figura 125. **Editor de Tabla de valores de Descarga.**

En la pestaña siguiente Graph (Gráfico), se visualiza el Hidrograma correspondiente a la precipitación introducida. Ver Figura 126.

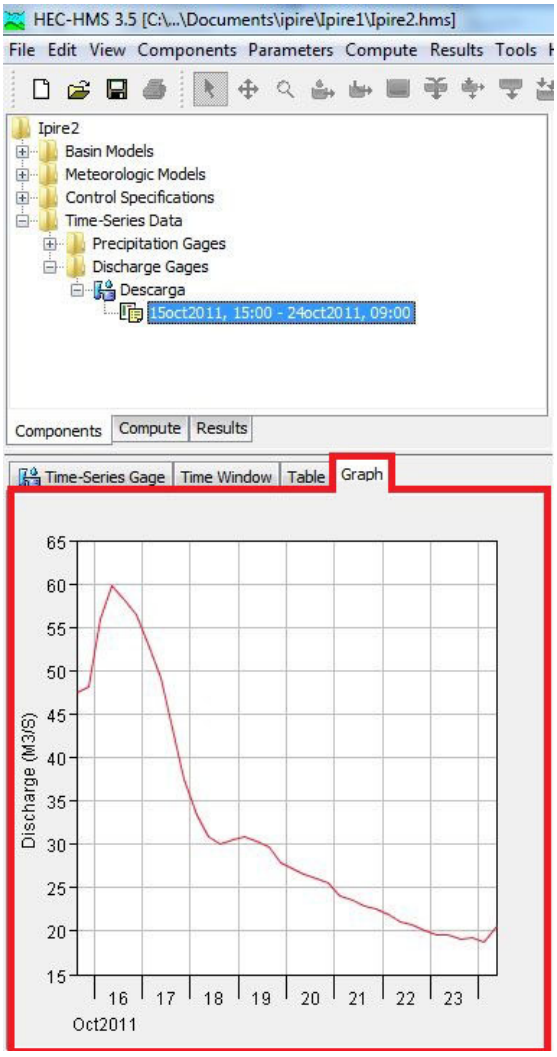


Figura 126. **Hidrograma correspondiente a la descarga observada introducida.**

3.24 MODELO METEOROLÓGICO

El modelo meteorológico es uno de los componentes principales de un proyecto. Su propósito principal es preparar las condiciones meteorológicas para subcuencas. Este modelo es importado conjuntamente con la corrida de Simulación creada en Hec-GeoHMS, sus especificaciones se pueden

visualizar y editar en la pestaña ***Meteorologic Model*** que se encuentra en Editor de Componentes. En este caso se observa que no se toma en cuenta para este estudio el efecto de Evaporación y el efecto del derretimiento de la nieve. (Ver Figura 127)

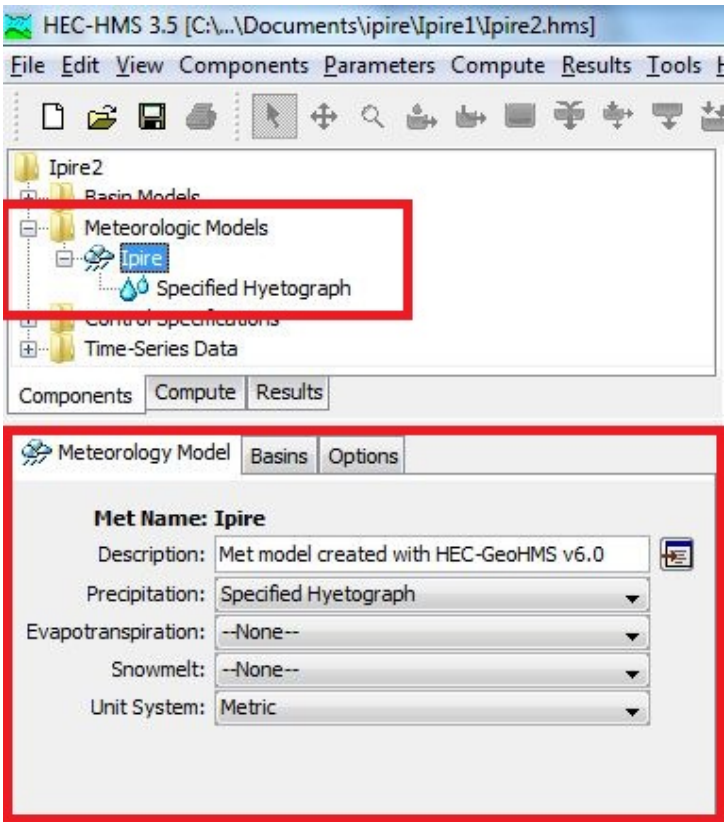


Figura 127. **Visualizador de Modelo Meteorológico importado desde Hec-GeoHMS**

3.25 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Las especificaciones de control establece la ventana de tiempo durante el cual se realiza una simulación. La ventana especifica la fecha de inicio, hora de inicio, fecha de finalización, y el tiempo final.

Haciendo click en la carpeta ***Control Specifications*** (Especificaciones de Control) que se encuentra en el Explorador de Cuenca, se abre una pestaña de edición en el editor de componentes donde se puede visualizar y editar el intervalo de tiempo en el cual se va a hacer la simulación. (Ver Figura 128)

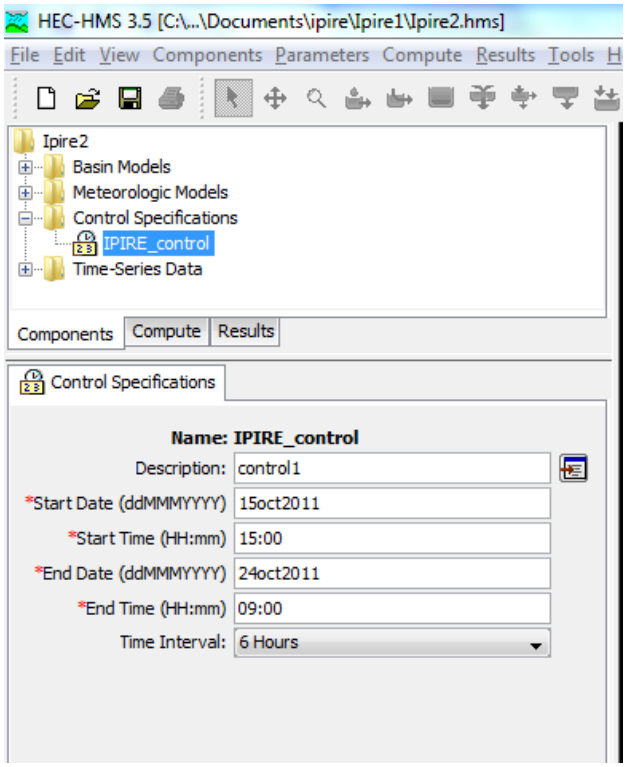


Figura 128. **Visualizador del Control de Especificaciones. Intervalo de tiempo de la simulación.**

3.26 SIMULACION HIDROLOGICA

En esta sección se describe cómo la información de cuencas hidrográficas y la meteorología se combina para simular la respuesta hidrológica. La ejecución de la simulación es el modo principal para la realización de simulaciones.

Cada corrida se compone de un modelo meteorológico, un modelo de cuenca, y uno de control de las especificaciones. Los resultados pueden ser visualizados como gráficos, tablas de resumen y tablas de series de tiempo, ya sea a través del mapa de la cuenca o desde el Explorador de Cuenca.

3.26.1 Creación de la corrida de simulación

Para crear una corrida se debe hacer clic en el menú y seleccionar ***Compute*** (Calcular) y se selecciona la opción ***Create Simulation Run*** (Crear Corrida de Simulación). (Ver Figura 129)

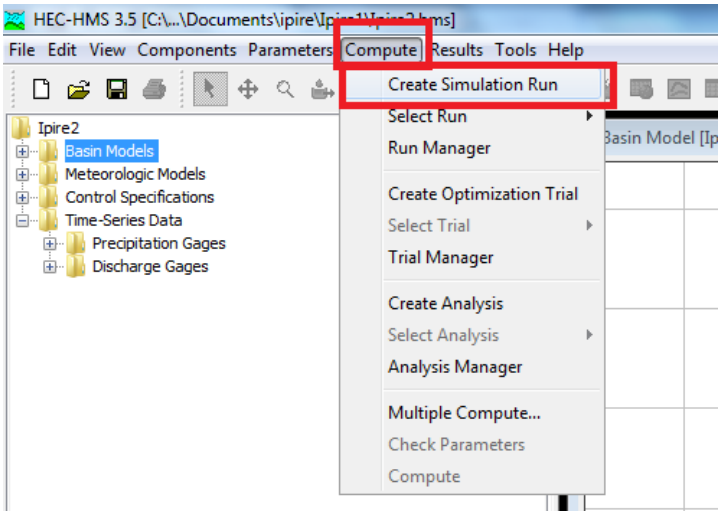


Figura 129. **Creación de la Corrida de Simulación.**

El asistente se abrirá y comenzará el proceso de creación de una nueva simulación que esta conformado por cuatro pasos:

- Paso 1: En la ventana emergente se encuentra un campo vacío en el cual se debe introducir el nombre de la nueva corrida, por defecto el programa asigna el nombre ***Run 1***. Pulse el botón ***Next >*** (Siguiente>) cuando se está satisfecho con el nombre que ha introducido y está listo para proceder al siguiente paso. Ver Figura 130

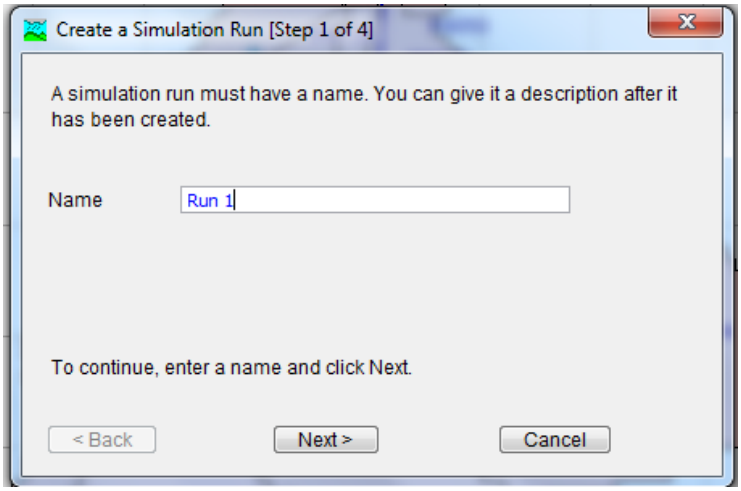


Figura 130. **Asignación de Nombre a la Corrida de Simulación.**

- Paso 2: El segundo paso de la creación de una ejecución de simulación consiste en seleccionar un modelo de cuenca que por defecto será el modelo de cuenca importado. Luego Pulse el botón ***Next>*** (Siguiente>) cuando se esté satisfecho con el modelo de cuenca que ha seleccionado. Ver Figura 131.

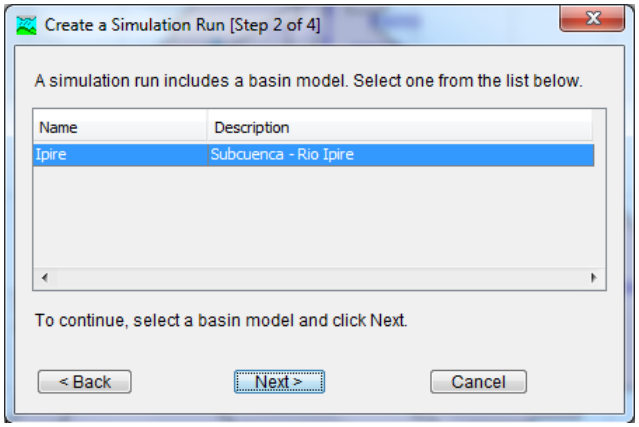


Figura 131. **Asignación del Modelo de Cuenca a utilizar en la Corrida de Simulación.**

- Paso 3: El tercer paso de la creación de una corrida de simulación consiste en seleccionar un modelo meteorológico, por defecto, se selecciona el modelo meteorológico importado. Pulse el botón ***Next>*** (Siguiente>) cuando esté satisfecho con el modelo meteorológico que ha seleccionado. Ver Figura 132.

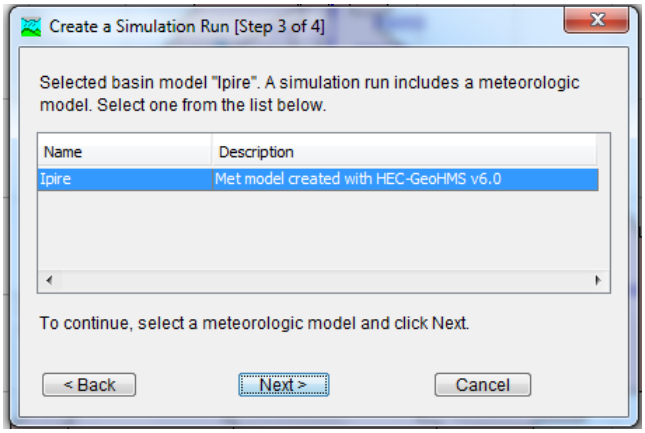


Figura 132. **Asignación del Modelo Meteorológico a usar en la corrida de Simulación.**

- Paso 4: El cuarto y último paso de crear una simulación es seleccionar las especificaciones de control, por defecto se selecciona la

especificación de control importada. Pulse el botón ***Finish*** (Finalizar) cuando esté satisfecho con el nombre que ha introducido y los componentes seleccionados, y están listos para crear la simulación. Ver Figura 133.

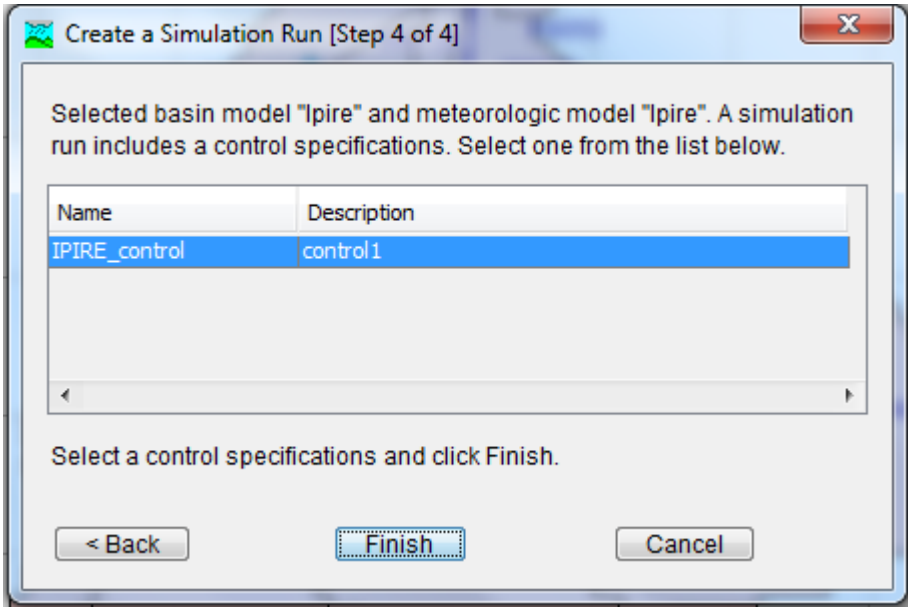


Figura 133. **Asignación del Control de la Corrida de Simulación.**

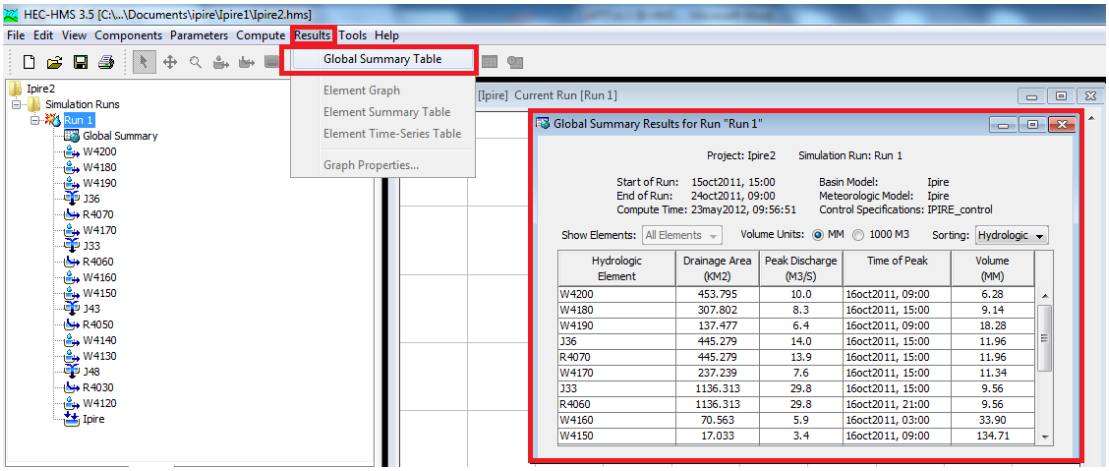
3.27 RESULTADOS DE LA CORRIDA DE SIMULACION

Una variedad de resultados gráficos y tabulares están disponibles después que se ejecuta la corrida de simulación.

3.27.1 Tabla Resumen global

Para acceder a la visualización de los resultados de la Tabla de Resumen Global se utiliza el menú Resultados. Haga clic en el menú

Resultados y seleccionar el comando Resumen de la tabla mundial. La tabla resumen se abrirá automáticamente, esta incluye una fila para cada elemento, el área de drenaje, el flujo máximo, el tiempo de flujo máximo y el volumen total. Ver Figura 134



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W4200	453.795	10.0	16oct2011, 09:00	6.28
W4180	307.802	8.3	16oct2011, 15:00	9.14
W4190	137.477	6.4	16oct2011, 09:00	18.28
J36	445.279	14.0	16oct2011, 15:00	11.96
R4070	445.279	13.9	16oct2011, 15:00	11.96
W4170	237.239	7.6	16oct2011, 15:00	11.34
J33	1136.313	29.8	16oct2011, 15:00	9.56
R4060	1136.313	29.8	16oct2011, 21:00	9.56
W4160	70.563	5.9	16oct2011, 03:00	33.90
W4150	17.033	3.4	16oct2011, 09:00	134.71

Figura 134. **Tabla de Resultados Resumen Global**

3.27.2 Resultados de Elementos Individuales

Para visualizar los resultados individuales de elementos se utiliza el menú Resultados haga clic en la Pestaña ***Results*** (Resultados) y seleccione el elemento al cual se desea visualizar la información, a modo de ejemplo se muestra el elemento ***Sink*** (Salida) de la cuenca del río Ipire:

- Graph (Gráfico): Se muestra el caudal observado, escorrentía del río, Caudal Calculado a la Salida y el Caudal de la subcuenca más próxima a la salida. Ver Figura135.

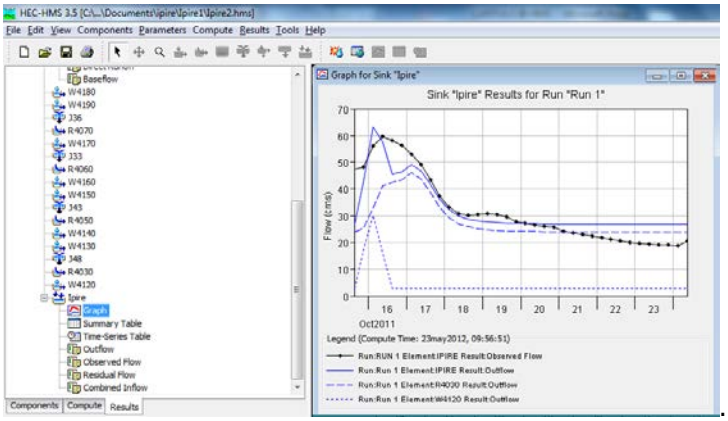


Figura 135. **Gráfico de Resultados a la Salida de la Cuenca del río Ipire.**

- Summary Table (Tabla Resumen): En la tabla Resumen se muestran el nombre del proyecto, el nombre de la corrida de simulación, el elemento seleccionado; el control, el modelo meteorológico y el modelo de cuenca utilizados en la corrida de simulación; así como también los resultados calculados y los valores observados introducidos. Ver Figura 136

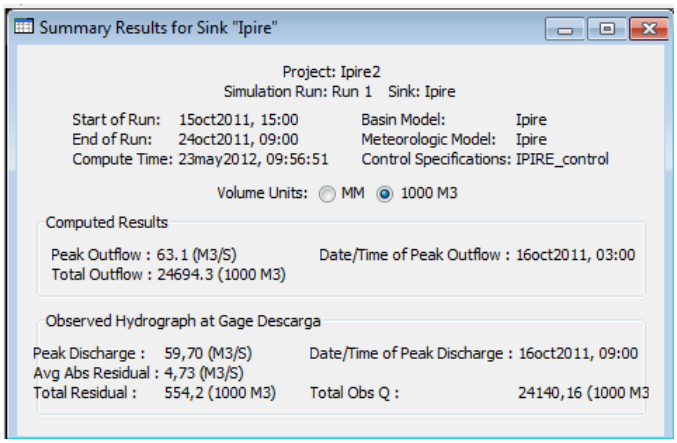


Figura 136. **Resumen de Resultados a la salida de la Cuenca del río Ipire.**

- Time-Series Table (Tabla de Datos de Serie de Tiempo): En esta Tabla se Muestra La Fecha, La hora, el Caudal Observado y el Caudal Calculado para cada intervalo de tiempo en estudio de la corrida de Simulación en estudio. Ver Figura 137.

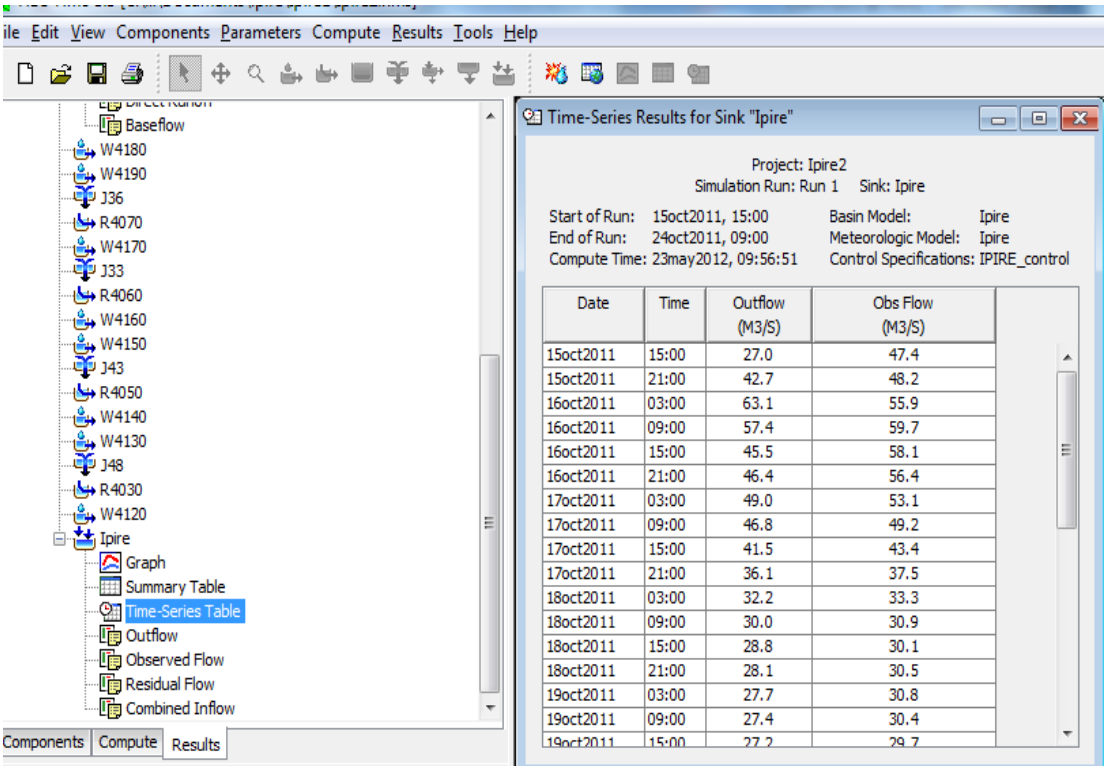


Figura 137. **Tabla de Datos de Serie de tiempo para la salida de la cuenca del río Ipire.**

- Outflow (Caudal a la salida): Se muestra una gráfica en la cual se observa el Caudal Calculado a la salida de la cuenca del río Ipire. Ver Figura 138.

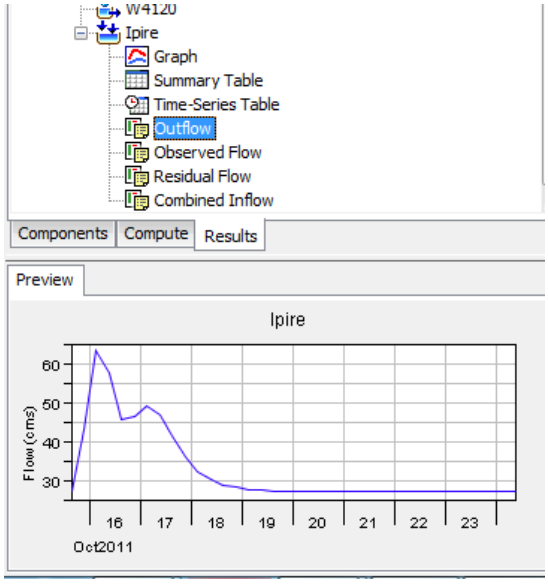


Figura 138. **Resultado de Caudal Calculado a la salida de la cuenca del río Ipire.**

- Observe Flow (Caudal Observado): Se muestra una gráfica en la cual se observa el Caudal Observado a la salida de la cuenca del río Ipire. Ver Figura139.

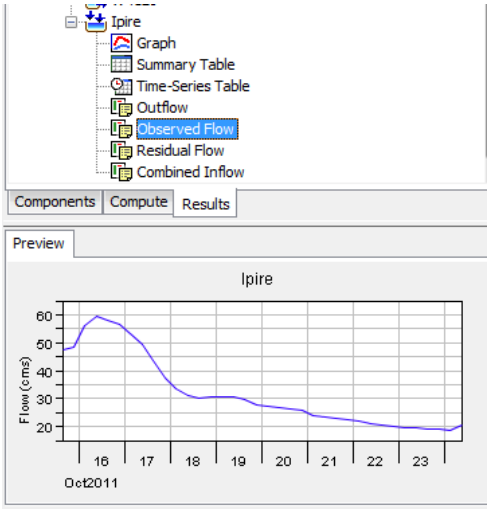


Figura 139. **Resultado de Caudal Observado a la salida de la cuenca del río Ipire.**

• Residual Flow (Caudal Residual): Se muestra una gráfica en la cual se observa el Caudal Residual a la salida de la cuenca del río Ipire. Ver Figura 140.

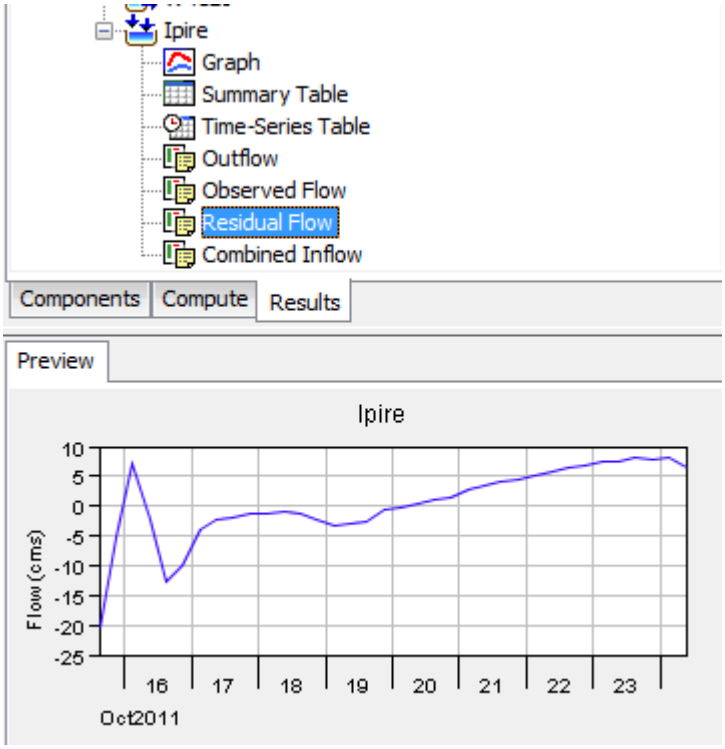


Figura 140. **Resultado de Caudal Residual a la salida de la cuenca del río Ipire.**

• Combined Inflow (Entrada combinada de Caudales): Se muestra una gráfica en la cual se observa la entrada combinada de Caudales a la salida de la cuenca del río Ipire. Ver Figura 141

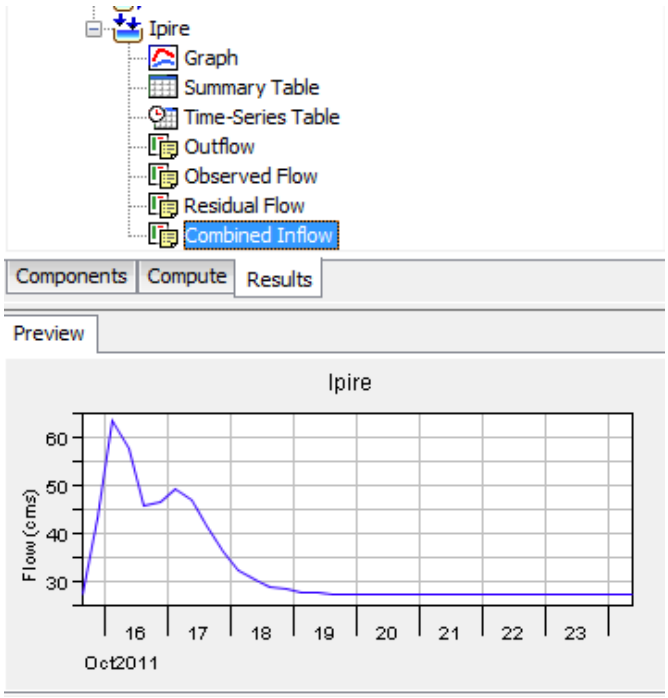


Figura 141. **Resultado de la Entrada combinada de Caudales a la salida de la cuenca del río Ipire.**

3.28 PREPROCESAMIENTO CON HEC-GeoRAS

El objetivo de esta sección fue desarrollar los datos espaciales requeridos para generar el archivo de importación que son las entradas para el proyecto en HEC-RAS.

Para el pre-procesamiento se usa el menú RAS Geometry de la barra de herramientas de HEC-GeoRAS. Ver figura 142.

Figura 142. **Menú RAS Geometry de la barra de Herramientas de Hec-GeoRas 4.3**

3.28.1 Creación de las Capas RAS (Create RAS layers)

En este menú se crean las capas que serán usadas para el desarrollo de los datos geométricos y de extracción. Las capas que pueden ser creadas se muestran en la figura 143

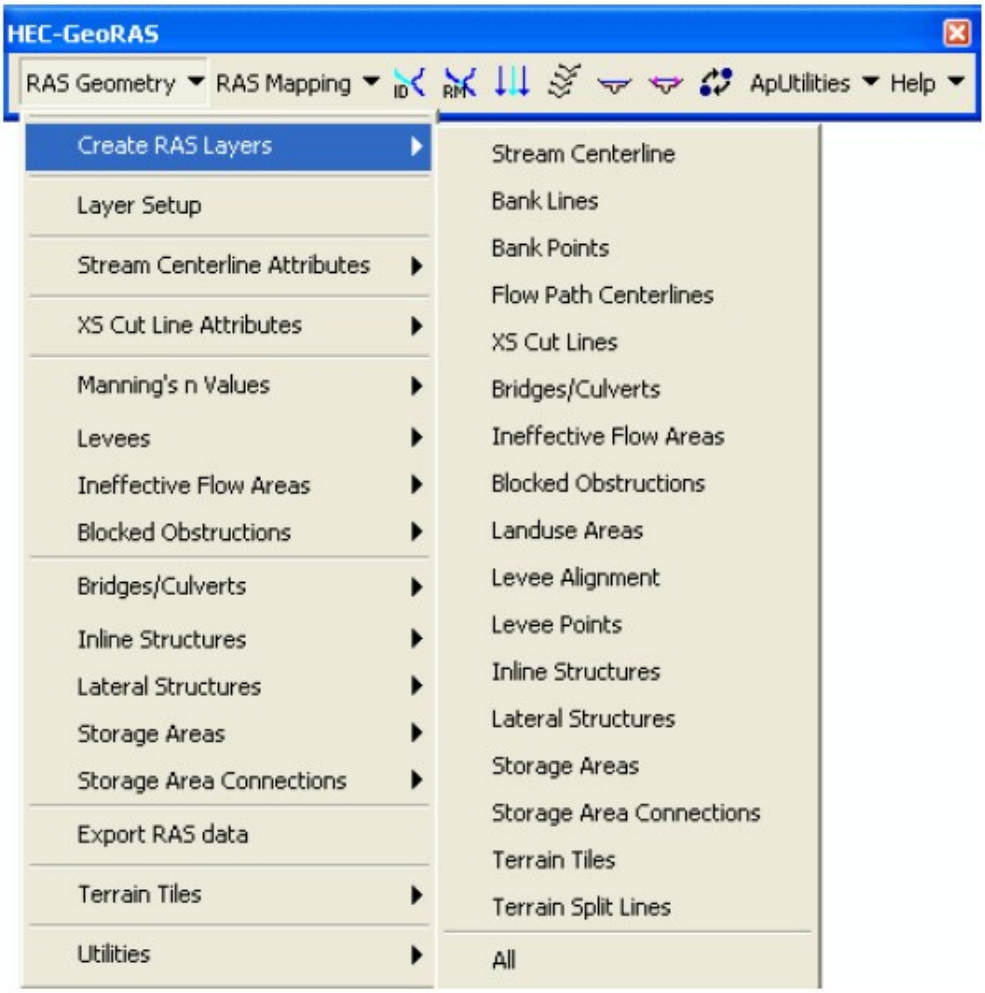


Figura 143. **Menú RAS Geometry - barra de Herramientas de Hec-GeoRas 4.3**

3.28.2 Eje Central de la corriente (Stream Centerline)

Esta es la primera capa que debe ser creada. Los pasos para la creación de esta capa se muestran a continuación:

En la barra de Herramientas de HEC-GeoRAS se selecciona **RAS Geometry,** luego **Create RAS layers** y por ultimo **Stream Centerline,** esto

despliega un cuadro de dialogo donde se introdujo el nombre del archivo y se presionó Ok. Ver figura 144

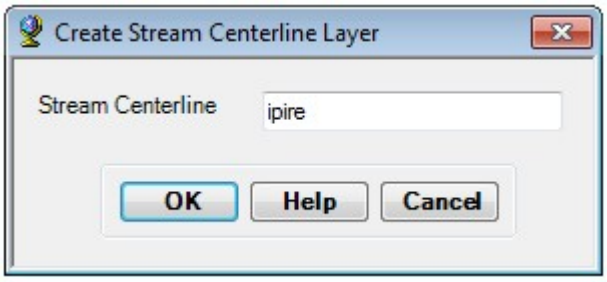


Figura 144. **Nombre de la Capa del Eje Central de la corriente**

La capa se agregó al mapa y se comenzó a editar dibujando los ríos, la edición se realizó desde la barra de herramientas **Editor**.

Se seleccionó **Editor,** luego **Start Editing** y se escogió la capa recién creada lo que activó el editor **Create Features** (**Crear Caracteristicas**). Ver Figura 145. Seleccionando el nombre de la capa se activó también la herramienta de construcción.

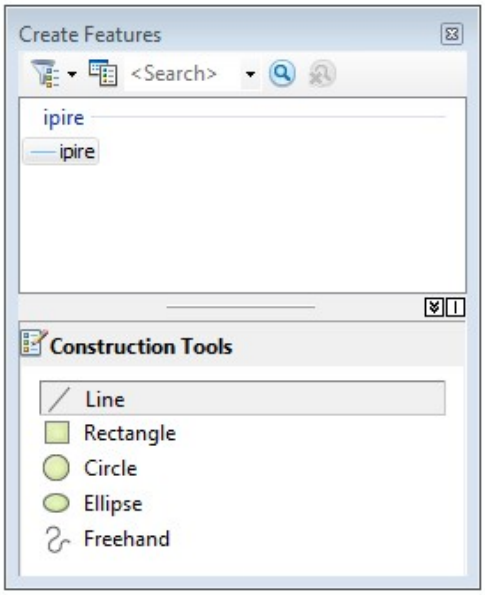


Figura 145. **Editor de Crear Características y la Herramienta Construcción**

Al elegir el comando línea comienza el trazado del rio el cual tiene como regla general que el trazado debe hacerse desde aguas arriba hacia aguas abajo, el trazado de cada segmento se finaliza haciendo doble click sobre el ultimo punto. Para la edición del segmento que se está dibujando el programa muestra un pequeño menú de edición para la construcción de características. Ver figura 146.

Figura 146. **Menú de edición Construcción de Características**

Al terminar de crear la red de ríos, ir al menú **Editor**, se pulsó **Save Edits** para guardar la edición y luego **Stop Editing** para detenerla.

Para este trazado fue preciso apoyarse de los rios dibujados en el procesamiento de la cuenca con HEC-GeoHMS o bien con rios dibujados a partir de las cartas geográficas adquiridas para la digitalización de las curvas de nivel. La Figura 147 indica el resultado de esta ejecución.

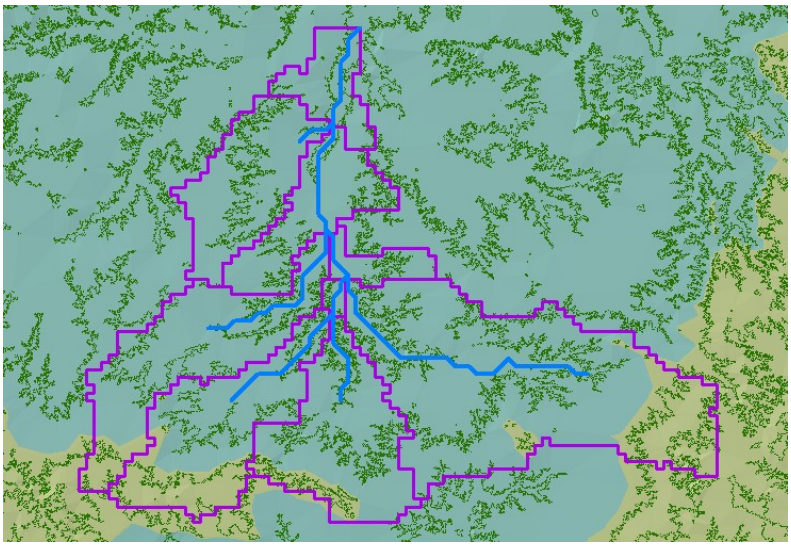


Figura 147. **Eje del Cauce**

Sin embargo el proceso no se completó hasta que se le asigno un nombre a cada río y a cada tramo, para ello fue preciso pulsar el icono **River and Reach ID** (Identificador de ríos y tramos) hacer click sobre el río, éste se tornó de color rojo para indicar que habia sido seleccionado, y se introdujo la identificación correspondiente, como se indica en la Figura 148.

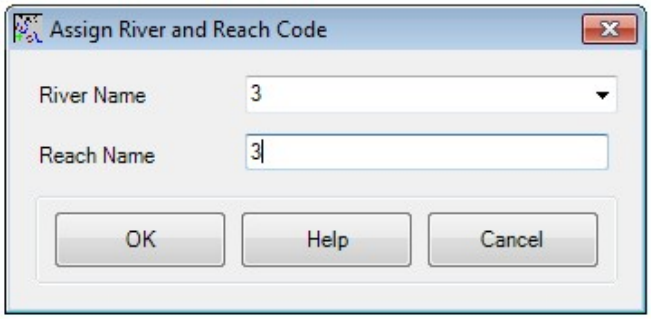


Figura 148. **Ventana *River and Reach IDs***

3.28.3 Creación de líneas que permiten medir la distancia recorrida por el flujo en los márgenes del cauce del río (*FLOW PATH CENTERLINES*)

Este paso es opcional pero si se omitía, las distancias entre las secciones transversales debían ser agregadas manualmente cuando se ejecutara el proyecto en la interfaz de HEC-RAS. Los pasos para la creación de esta capa se muestran a continuación:

Se seleccionó **RAS Geometry,** luego **Create RAS layers** y por último **Flow Path Centerlines,** se le dio nombre a la capa y se presionó **OK**. Como ya existía una capa de Eje central de la corriente, esta se copió automáticamente como eje para el cauce. Ver figura 149

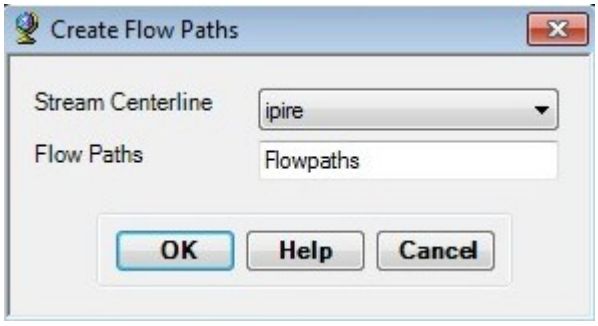


Figura 149. **Ventana Flow Paths**

3.28.4 Creación de las líneas de corte de las secciones transversales (*CROSS-SECTIONAL CUT LINES*)

En la barra de Herramientas de HEC-GeoRAS se selecciona **RAS Geometry,** luego **Create RAS layers** y por ultimo **XS Cut Lines,** esto despliega un cuadro de dialogo donde se introdujo el nombre de la capa y se presionó Ok. Ver figura 150

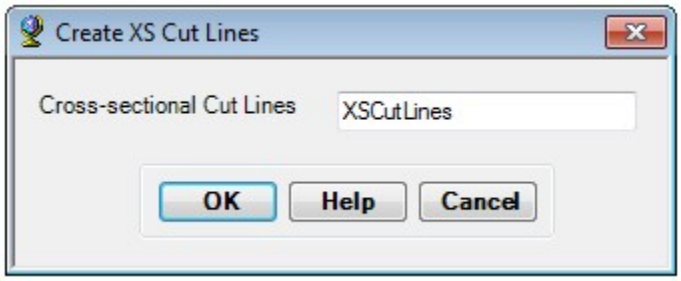


Figura 150. **Ventana XS Cut Lines**

Existen dos formas de editar esta nueva capa para añadir las características, una es usando la herramienta **Sketch** para dibujar la ubicación de cada sección, estas deben ser dibujada desde aguas arriba hasta aguas abajo, desde el lado izquierdo al lado derecho del cauce y siempre cuidando que exista perpendicularidad entre la sección dibujada y el eje central del flujo.

La segunda forma las genera de forma automática especificando la longitud de los intervalos y el ancho de la sección. (Ver Figura 89), esto se realiza con la herramienta **(Construct XS Cut Lines)**, aunque debe

tenerse cuidado ya que este proceso puede generar secciones que crucen varios canales al mismo tiempo o incluso pudiese cortar el mismo rio múltiples veces.

Se eligió el segundo método, se confirmaron las capas correspondientes, se tomó el valor de 1000 metros para los intervalos, para ancho de la sección transversal 5000 metros y se pulsó ok. Ver figura 142.

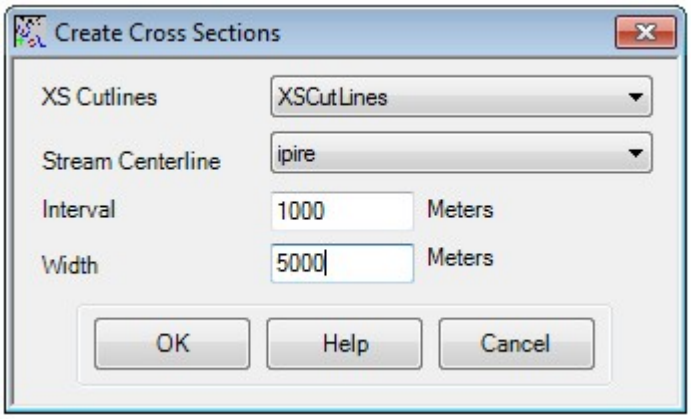


Figura 151. **Editor de Ventana XS Cut Lines**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 152

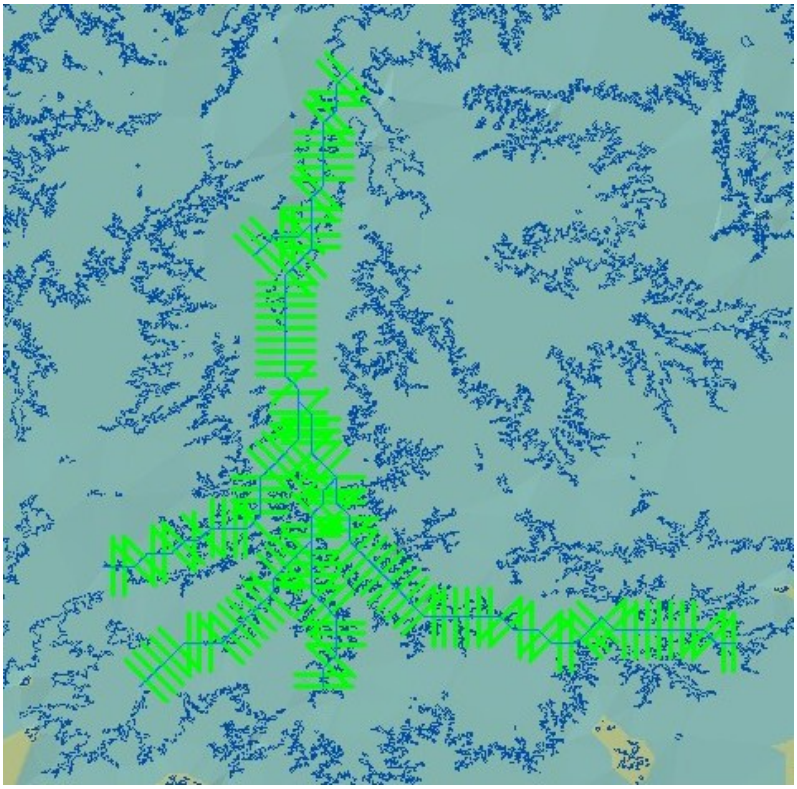


Figura 152. **Secciones Transversales del cauce**

3.29 CONFIGURACIÓN DE CAPAS (LAYER SETUP)

Una vez que se crearon y editaron las capas necesarias, se seleccionó el menú **RAS Geometry** y luego **Layer Setup**. Se mostró una ventana de dialogo para la configuración de las capas creadas en el preprocesamiento usadas para el desarrollo y extracción de los datos, se ubicaron las capas correspondientes en cada pestaña y se pulso **OK** en esta ventana hay 4 pestañas

- **Required Surface** (Superficie Requerida). En esta pestaña se selecciona el tipo de archivo del terreno del cual será extraída la información de elevaciones. Ver figura 153

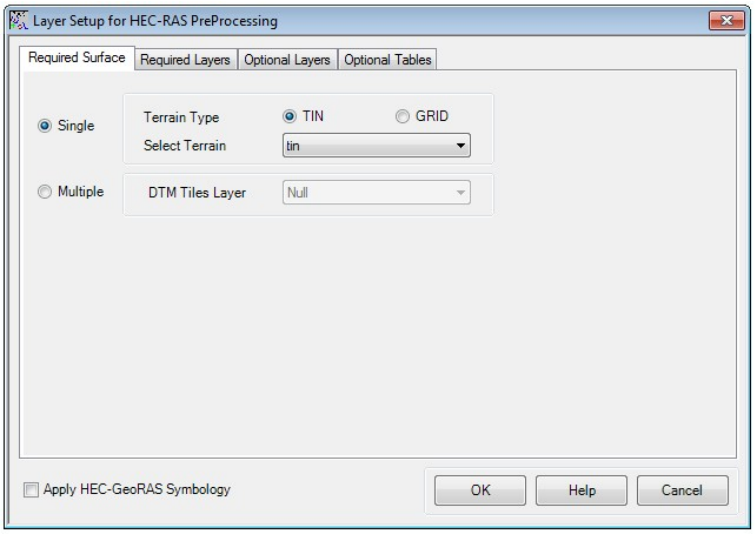


Figura 153. **Superficie Requerida**

- **Required layers** (Capas Requeridas): estas capas son **Stream Centerline**, **XS Cut Lines** y **XS Cut Lines Profiles**. Ver figura 145

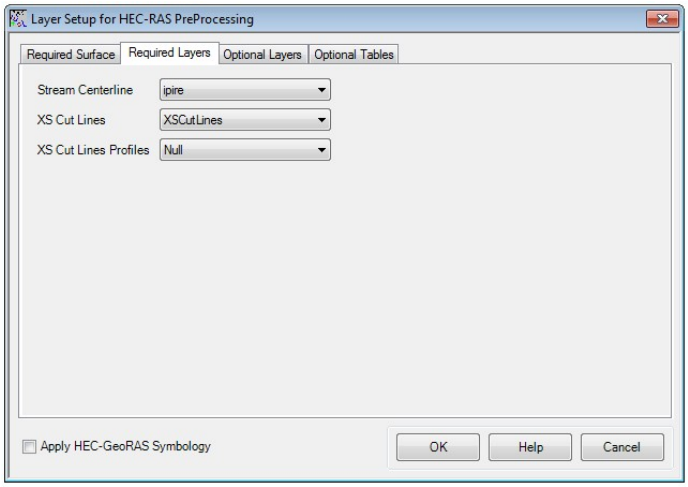


Figura 154. **Capas Requeridas**

- **Optional Layers** (Capas Opcionales). ver figura 155

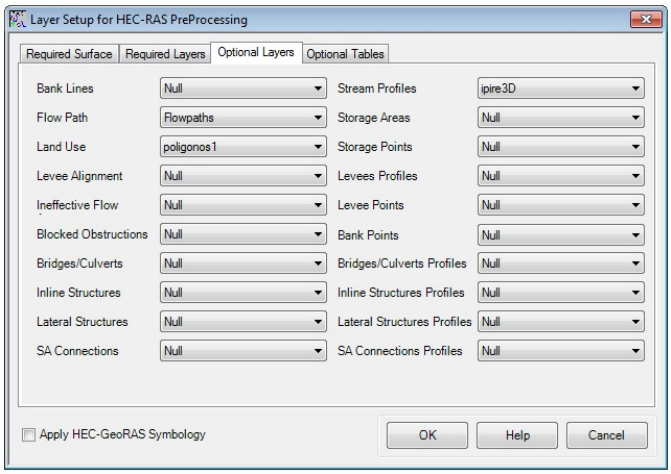


Figura 155. **Capas opcionales**

- **Optional Tables** (Tablas Opcionales). Ver figura 156

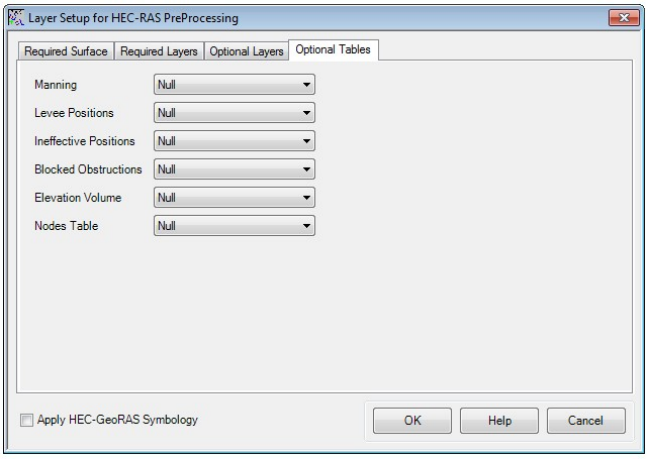


Figura 156. **Tablas Opcionales**

3.30 ATRIBUTOS DEL EJE CENTRAL DE LA CORRIENTE

El siguiente paso fue completar los atributos del eje central de la corriente, este menú se muestra a continuación. Ver figura 157

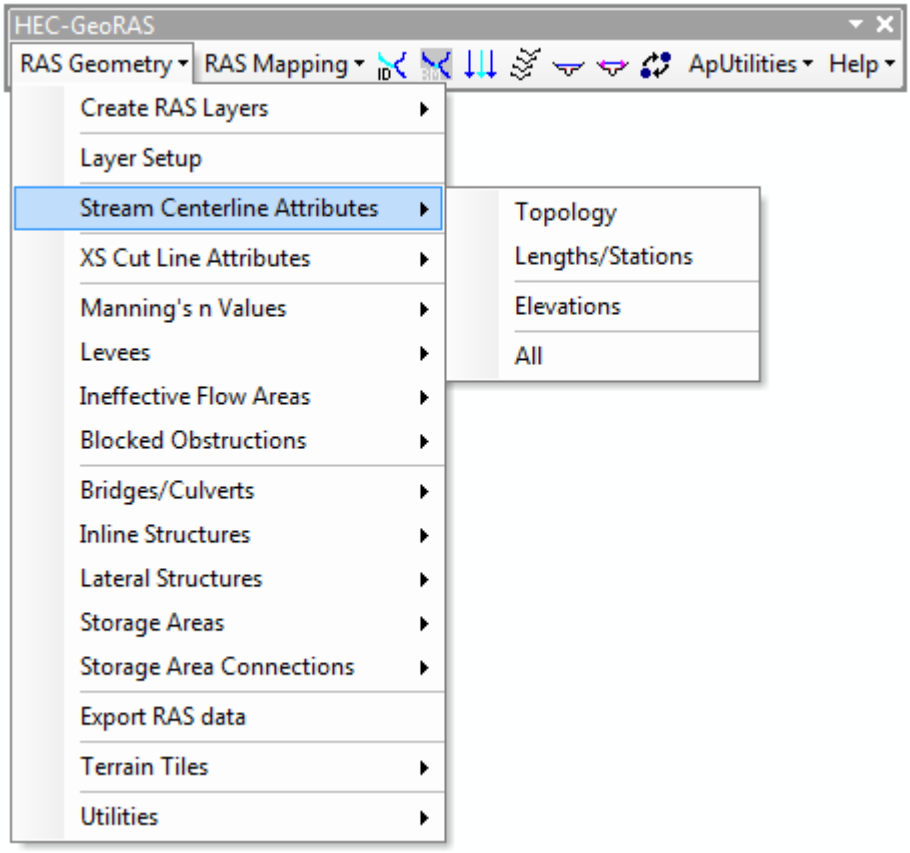


Figura 157. **Menú de Atributos del eje central de la corriente**

3.30.1 Topología (Topology)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **Stream Centerline Attributes** y finalmente **Topology**. Este proceso completó la topología llenando los campos “Fromnode” y “ToNode” de la tabla de atributos de la capa del Eje

central de la corriente. Además, se creó automáticamente una tabla para almacenar las coordenadas X, Y, Z de los nodos que representan la unión de dos o mas corrientes. Esto se utiliza más tarde para crear el archivo de importación SIG. Al finalizar el proceso aparece el mensaje que indica que los campos han sido computados satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 158.

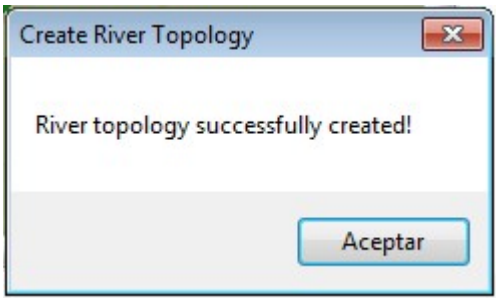


Figura 158. **Topología del rio creada satisfactoriamente.**

3.30.2 Longitud y Estaciones del Eje central de la corriente (Length/Stations)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **Stream Centerline Attributes** y finalmente **Length/Stations**. Este proceso asignó los valores de longitud y las estaciones de la tabla de atributos de la capa del Eje central de la corriente. Al finalizar el proceso aparece el mensaje que indica que los campos han sido computados satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 159

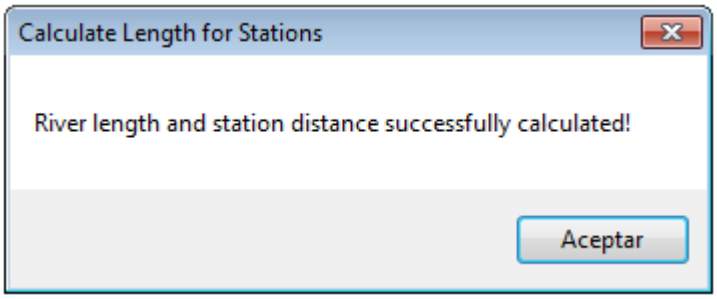


Figura 159. **Longitud del rio y distancias de las estaciones creadas satisfactoriamente**

3.30.3 Elevaciones (Elevations)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **Stream Centerline Attributes** y finalmente **Elevations** para crear una capa de 3 dimensiones a partir de eje central de la corriente (capa de 2 dimensiones) y de las elevaciones observables en el MDT. Este paso no es necesario, la capa no es requerida como entrada para HEC-RAS ya que este no utiliza los datos de elevación extraídos a lo largo del eje central de corriente, por lo cual al elegir la opción, el programa muestra un mensaje que lo informa. Ver figura 151.

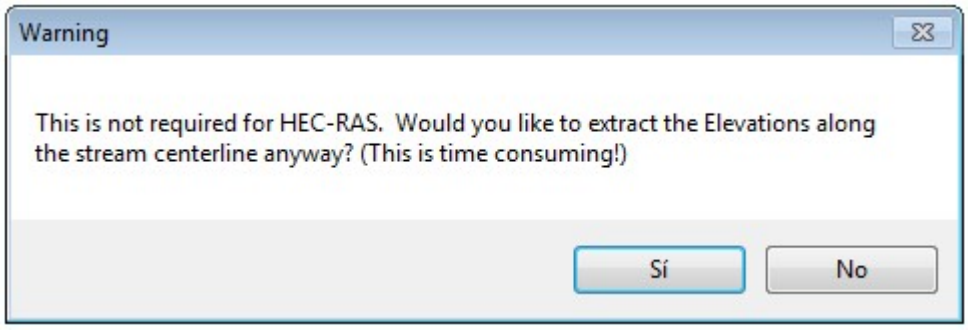


Figura 160. **Alerta en la Creación de la Capa de rio 3D**

Al aceptar la alerta de la figura anterior se despliega el editor de Rio3D, se seleccionaron las capas correspondientes, se le dio nombre a la capa que se creó y por ultimo se pulsó **OK.** Ver figura 161

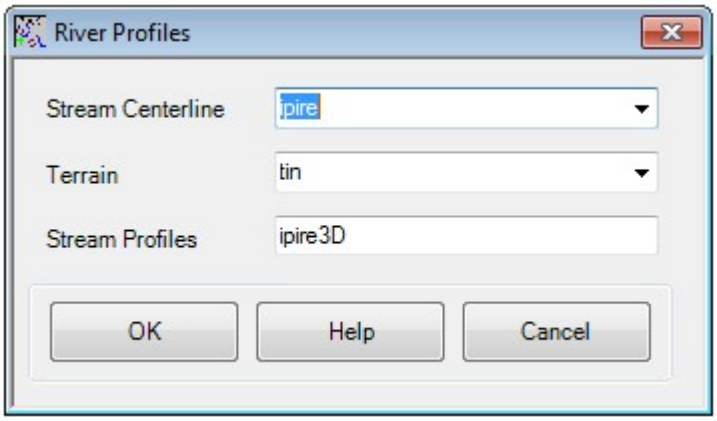


Figura 161. **Creación de la Capa de rio 3D**

3.31 ATRIBUTOS DE LAS LÍNEAS DE CORTE DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES (XS CUT LINE ATTRIBUTES)

El siguiente paso fue la completar los atributos del eje central de la corriente, este menú se muestra a continuación. Ver figura 162

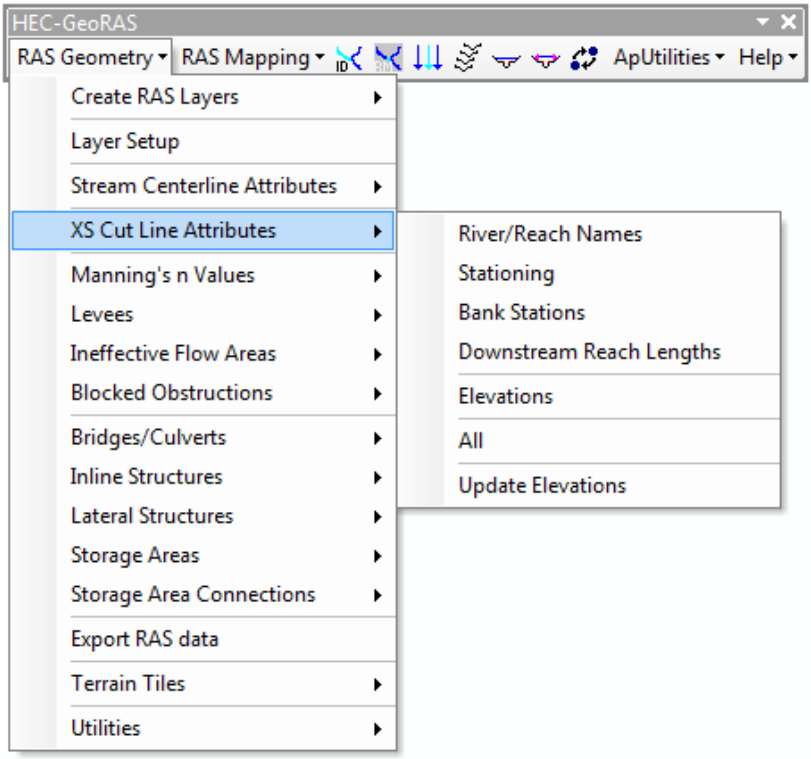


Figura 162. **Menú de Atributos de las secciones transversales**

Se realizó el menú paso a paso de arriba hacia abajo, para verificar las acciones se abrió la tabla de atributos de la capa XS Cute Line después de cada paso, Cuando alguno proceso evocó algún error, se solucionó y se volvió a correr la herramienta.

3.31.1 Nombres de los rios y tramos (River/Reach Names)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **XS Cut Line Attributes** y finalmente **River/Reach Names.** Al finalizar el proceso aparece el mensaje

que indica que los campos han sido computados satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 163

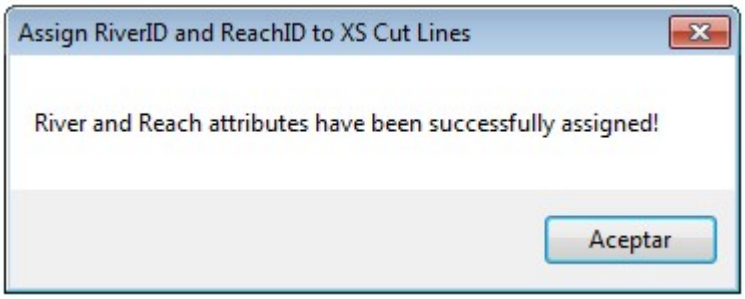


Figura 163. **Asignación de nombres de los ríos y tramos**

3.31.2 Estaciones (Stationing)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **XS Cut Line Attributes** y finalmente **Stationing.** Al finalizar el proceso aparece el mensaje que indica que los campos han sido computados satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 164

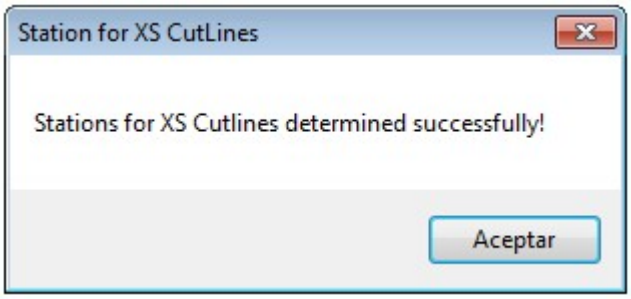


Figura 164**. Estaciones en las secciones transversales**

3.31.3 Longitud de los tramos hasta la salida de la cuenca (Downsrtream Reach Lengths)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **XS Cut Line Attributes** y finalmente **Downsrtream Reach Lengths.** Al finalizar el proceso apareció el mensaje que indica que los campos han sido computados satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 165

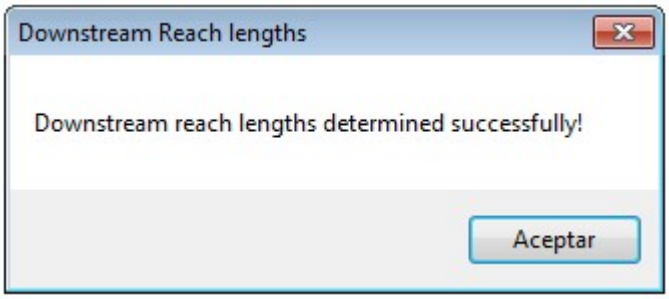


***Figura 165*. Longitud de los tramos hasta salida de la cuenca**

3.31.4 Elevaciones (Elevations)

Se seleccionó **RAS Geometry**, luego **XS Cut Line Attributes** y finalmente **Elevations.** Esto creó una capa de 3 dimensiones a partir de las secciones transversales (capa de 2 dimensiones) y de las elevaciones observables en el MDT. Al finalizar el proceso apareció el mensaje que indica que la capa ha sido creada y convertida a 3D satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 166

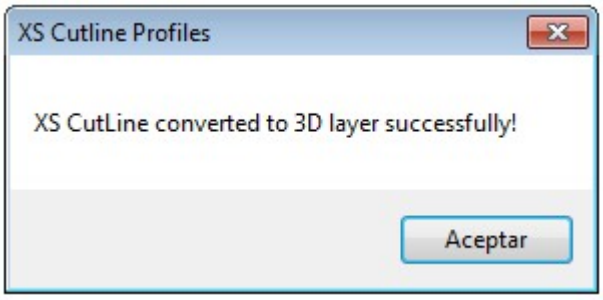


Figura 166. **Secciones transversales creadas satisfactoriamente.**

3.32 EXPORTAR DATOS (EXPORT RAS DATA)

Esta herramienta genera el archivo de importación GIS RAS en dos formatos: uno en formato SDF y otro en formato XML. El formato XML está diseñado para su uso futuro. Nótese que esta herramienta utiliza los archivos predefinidos XML y XSL, localizados en la carpeta "bin" de la carpeta de instalación HEC-GeoRAS. Estos archivos son instalados automáticamente, y no deben ser movidos de su ubicación ya que la herramienta espera encontrar estos archivos en dicha ubicación.

Se seleccionó **RAS Geometry** y luego **Extract GIS Data**. Se desplegó una ventana en la que se dio la ubicación del archivo de importación GIS RAS y se pulsó **OK.** Ver figura 167

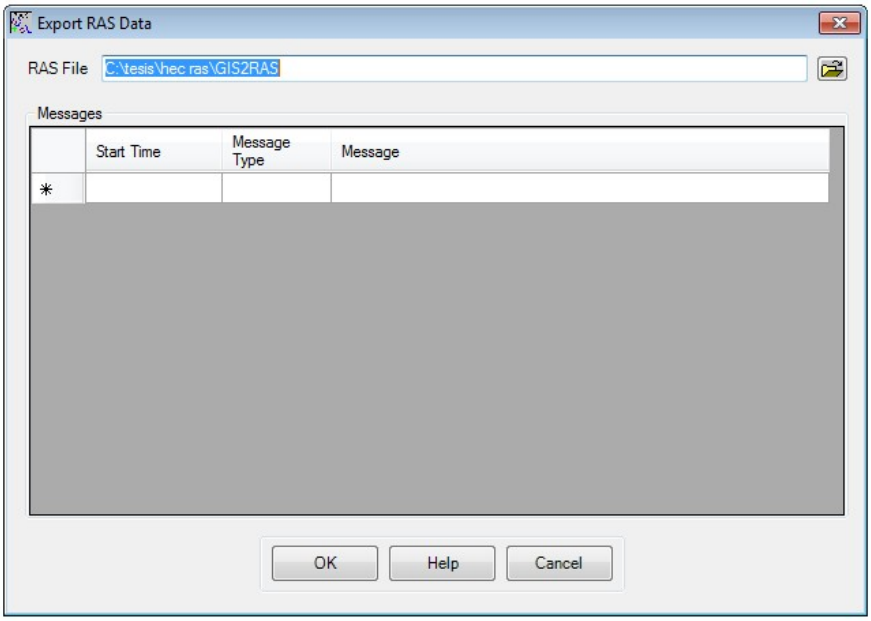


***Figura 167*. Exportar datos RAS**

Al finalizar el proceso apareció el mensaje que indicaba que el archivo de importación había sido creado satisfactoriamente y se pulsó aceptar. Ver figura 168

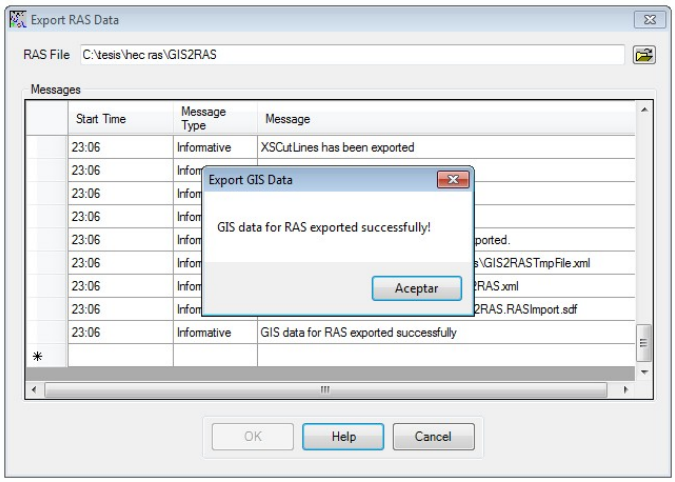


Figura 168. **Datos RAS exportados satisfactoriamente**

3.33 TRABAJO EN HEC-RAS

HEC-RAS es un paquete integrado de programas de análisis hidráulicos, en el cual el usuario interactúa con el sistema mediante el uso de una interfaz de usuario gráfica (GUI). El sistema es capaz de realizar los cálculos de los modelos Flujo Estable e Inestable de aguas, Cálculos del Perfil de la Superficie, Transporte de sedimentos, Calidad del agua y otros cálculos de diseño hidráulico.

En la terminología de HEC-RAS, un **PROYECTO** es un conjunto de archivos de datos asociados a un sistema de ríos en particular. El modelador puede realizar los diversos tipos de análisis para uno o varios modelos al mismo tiempo como parte del proyecto. Los archivos de datos para un proyecto se clasifican de la siguiente manera: los datos del plan, los datos geométricos, los datos de flujo permanente, los datos de flujo inestable, los datos del flujo cuasi-estacionario, los datos de los sedimentos, los datos de calidad del agua, y los datos de diseño hidráulico.

Durante el transcurso de un estudio el modelador puede formular varios planes diferentes. Cada plan representa un conjunto específico de datos geométricos y de flujo de datos (y, posiblemente, los datos de sedimentos, los datos de calidad del agua, y la información de diseño hidráulico). Una vez que los datos básicos se introducen en el HEC-RAS, el modelador puede formular nuevos planes. Después que se realizan las

simulaciones para los diferentes planes, los resultados pueden ser comparados simultáneamente en forma tabular y gráfica. Este capítulo proporciona una visión general de cómo se lleva a cabo un estudio con el software HEC-RAS.

Para crear un nuevo proyecto en HEC-RAS, se hizo doble click en el ícono del programa desde el directorio de trabajo en Windows, indicado en la Figura 169.

Figura 169. **Icono de HEC-RAS**

Cuando inició HEC-RAS, se observó la ventana principal como se muestra en la Figura 170

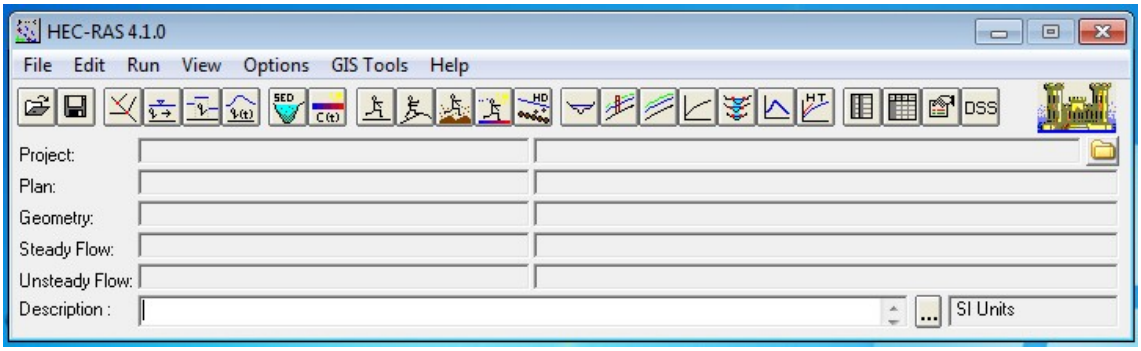


Figura 170**. Ventana Principal de HEC-RAS**

3.33.1 Creación del proyecto

Para crear un nuevo proyecto se seleccionó **File** y luego **New Project,** esta acción desplegó el cuadro de diálogo, donde se ubicó el directorio para almacenar el proyecto, se colocó un título para el proyecto y un identificador corto para el mismo, esto se puede observar en la Figura 171

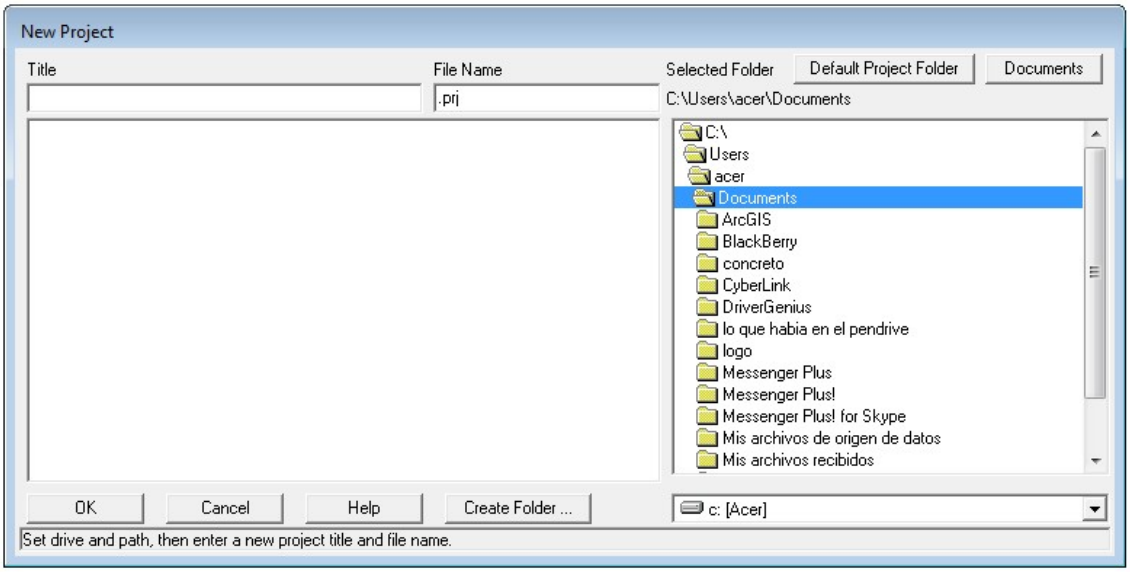


Figura 171. **Ventana *HEC-RAS – File – New Project***

Antes de introducir los datos geométricos y de flujo, se seleccionó el Sistema Métrico como Sistema de Unidades del Proyecto, este paso se llevó a cabo seleccionando **UNIT SYSTEM (Sistema de Unidades)** en el menú **Options (Opciones)** de la principal ventana de HEC-RAS y adicionalmente se tildó la casilla **Set as default for new projects** para establecer como sistema de unidades por defecto para los nuevos proyectos. Ver figura 172.

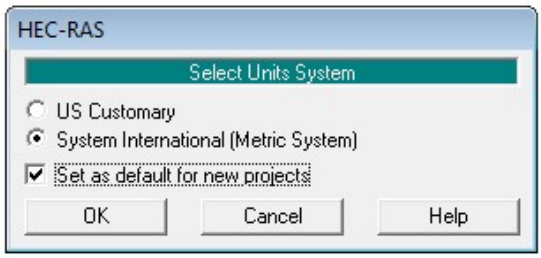


Figura 172*. Ventana *HEC-RAS – Units Sistem.

3.33.2 Edición de los Datos Geométricos

Para abrir el **Editor de Datos Geométricos** se seleccionó desde el menú de HEC-RAS; **Edit y** luego **Geometric Data**, lo que desplegó la ventana correspondiente de este menú, que se puede ver en la figura 173

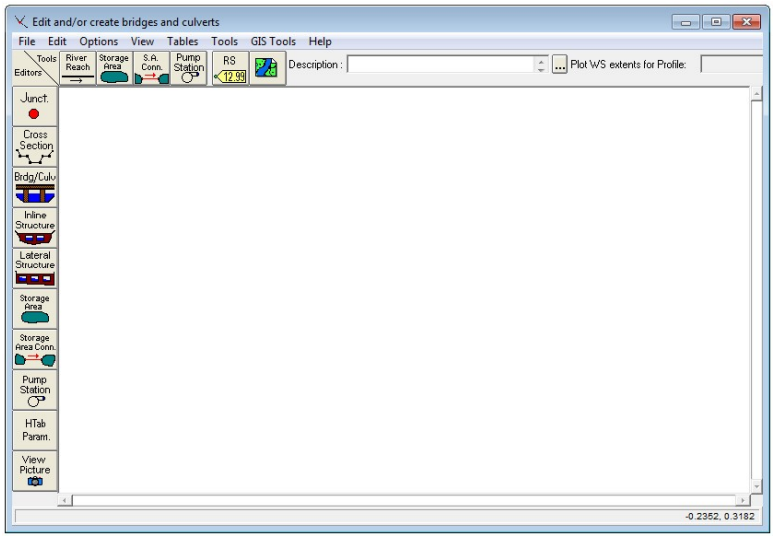


Figura 173 Ventana *HEC-RAS – Geometric Data*

Una vez abierta la pantalla, desde el menú se procedió a identificar el archivo con el cual serán almacenados los datos geométricos, para ello se seleccionó **File** y seguidamente **Save geometric Data As...,** se colocó un título y se aceptó que dicho

archivo fuese almacenado como un documento del proyecto, esta ventana se muestra en la Figura 174.

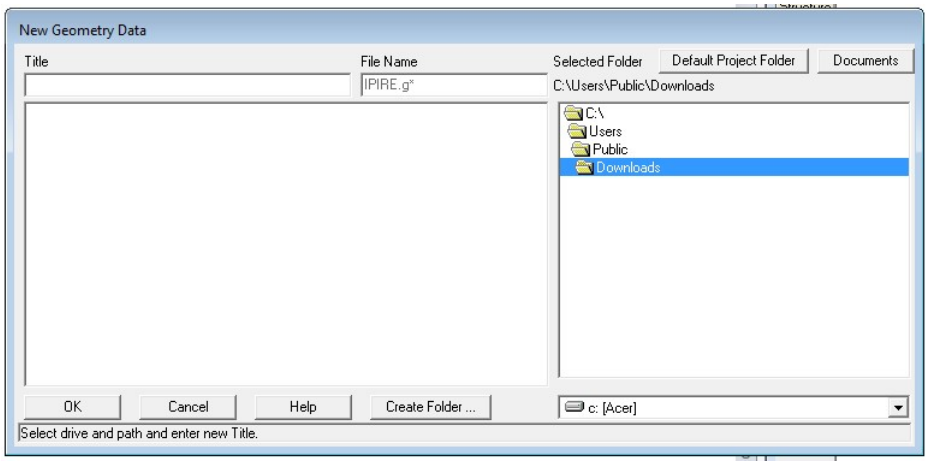


Figura 174. **Ventana *File - New Geometry Data***

3.33.3 Importación del archivo de datos Geométricos

Para importar el archivo se seleccionó **File,** luego **Import Geometry Data** y por último **GIS Format,** en el modulo **Edit – Enter Geometric Data** desplegado, se buscó el Archivo de Importación creado por ArcMap, como se muestra en la Figura 175

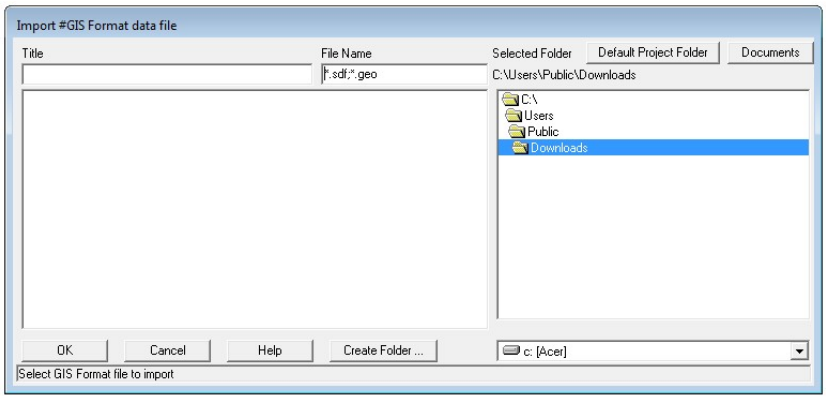


Figura 175. **Ventana de importación de la data geométrica.**

La importación del archivo dio como resultado el esquema de río y secciones transversales, como se muestra en la Figura 176

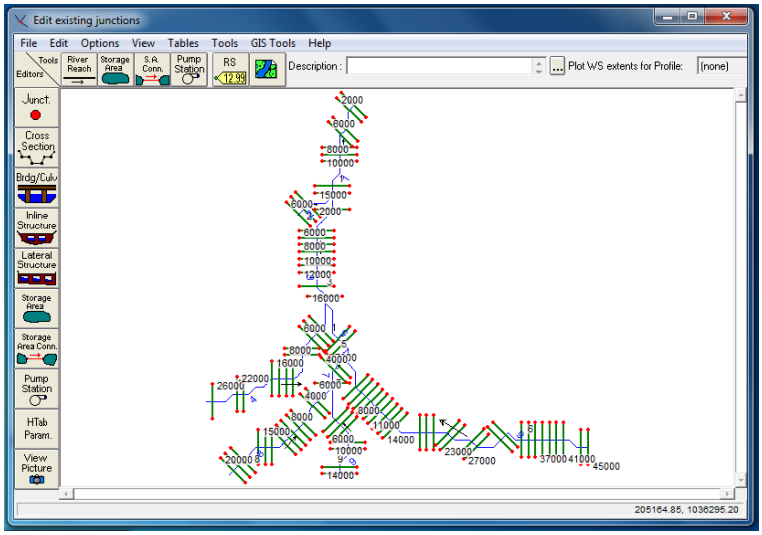


Figura 176. **Archivo de Importación creado en PreRAS**

3.34 COMPLETACIÓN DE LOS DATOS PARA LAS SECCIONES TRANSVERSALES

La completación de los datos para las secciones transversales implicó cargar los números de Manning, coeficientes de contracción y expansión y las obstrucciones, interpolación de secciones y edición de puentes. La selección del editor de secciones transversales se realizó pulsando el ícono **Cross Section**

Este ícono desplegó la pantalla donde se completó la información de las secciones, como se muestra en la Figura 177. En esta figura se puede observar que es preciso asignar el número de Manning y

revisar los valores asignados por defecto para el coeficiente de contracción y expansión, los campos **Downstream Reach Length y Main Channel Bank Stations** son importados desde HEC-GeoRAS.

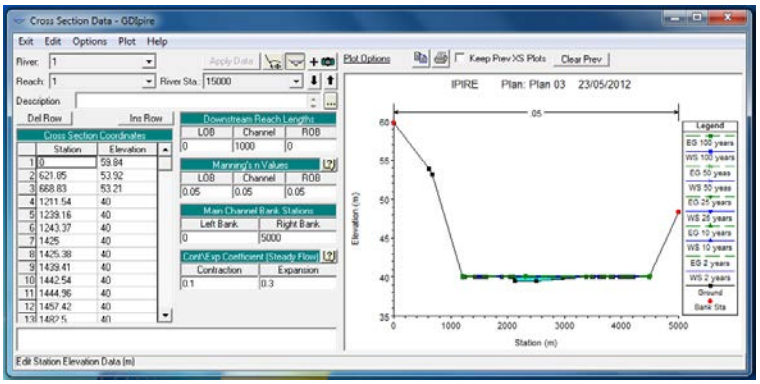


***Figura 177*. Datos de secciones transversales.**

3.34.1 Asignación de los números de Manning

Para introducir el coeficiente n de Manning se consultó la tabla cargada por defecto en el campo **Manning's N Value**, al pulsar el botón [?], se desplegó el Manual de Referencia de programa en el cual se observó la tabla de valores típicos para los canales, tomado del libro "Hidraulica de Canales Abiertos" (Chow, 1959) como se muestra en la Tabla 1.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. *Natural Streams*			
1. **Main Channels**			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy. deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. **Flood Plains**			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. **Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged**			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

***Tabla 1*. Tabla para N de Manning, [Chow, 1959]**

3.34.2 N de Manning

El valor n de Manning tomado fue 0.05; canales sin revestir en tierra, con tramos de montaña o planicies de áreas cultivadas, ríos con poca vegetación márgenes con árboles y malezas, y con piedras dentro del curso, lo cual se puede ver en la Figura 178.

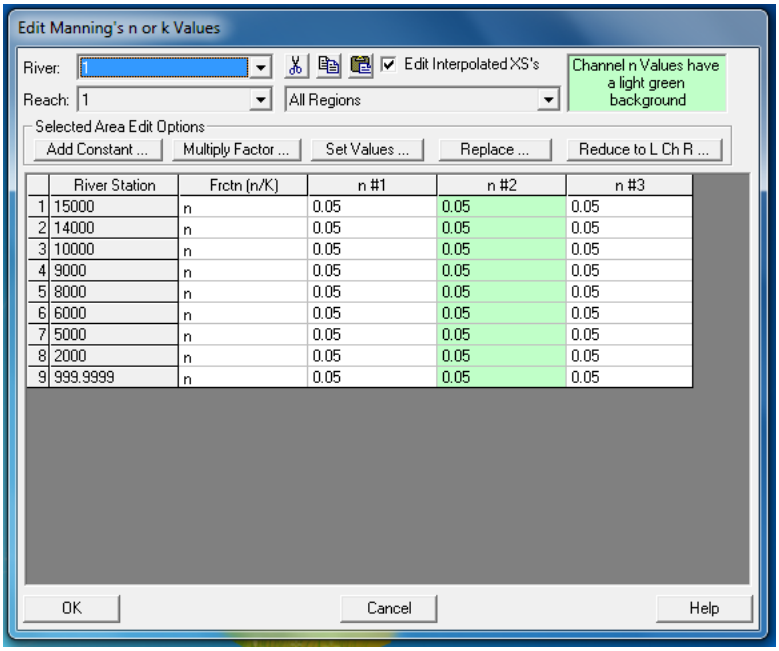


Figura 178. **Ventana de Edición de valores n de Manning**

3.34.3 Coeficientes de Contracción y Expansión

Para el ingreso de los coeficientes de contracción y expansión, se consideró un cambio gradual en las secciones transversales, se regularizaron las secciones transversales y en la montaña presenta secciones con poco cambio, es por ello que se utilizó 0.1 para el coeficiente de contracción y 0.3 para el coeficiente de expansión, Estos valores fueron tomados de la tabla de consulta proporcionada por el HEC-RAS en el campo **Cont/Exp Coefficients**, a la cual se accede presionando el botón , lo que desplegó el Manual de Referencia de programa en el cual se observó la tabla de coeficientes de contracción y expansión para flujo sub-critico como se indica en la tabla 2.

Subcritical Flow Contraction and Expansion Coefficients

	Contraction	Expansion
No transition loss computed	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Typical Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabla 2. **Coeficientes de Contracción y Expansión**

3.35 EDICIÓN DE LOS DATOS DE FLUJO

Una vez introducida la data geométrica, el modelador permite ingresar los datos de flujo, el tipo de dato de flujo introducido depende del tipo de análisis que se desea computar. En nuestro caso el tipo de análisis de flujo fue el de Flujo Permanente. Los datos de flujo consisten en: el número de perfiles a ser computados, la data de flujo y las condiciones de borde de la red de ríos.

El procedimiento para introducir los datos de flujo se seleccionó desde la ventana principal de HEC-RAS, en el menú **Edit** y luego **Steady Flow Data**, como se muestra en la Figura 179.

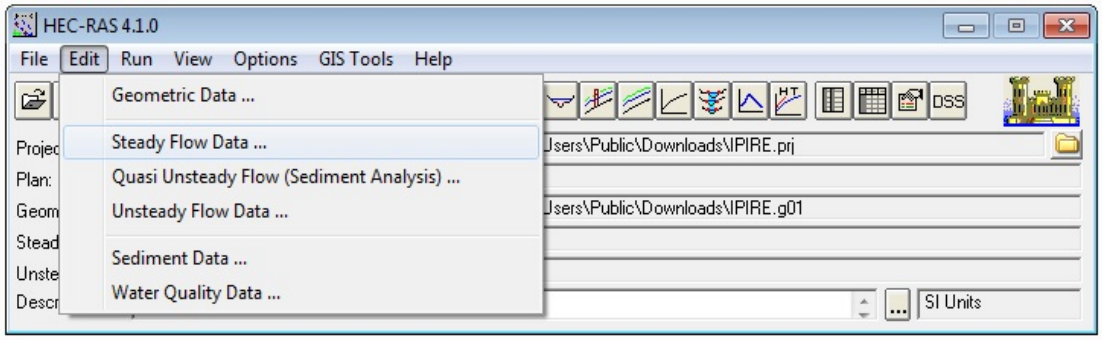


Figura 179. Selección de la opción para editar el flujo estable

Se desplegó la ventana para el editor de datos de flujo estable. En la casilla superior en la ventana del editor, se ingresó el número de perfiles. Se colocó el número 5 y una parte de la tabla se ajustó a 5 perfiles. Luego, desde el menú ***Options*** se seleccionó ***Edit Profile Names*** con el fin de colocar los distintos periodos de retorno para cada perfil, como se muestra en la Figura 180. Los nombres corresponden al período de retorno, y la duración de la tormenta que generó la creciente es de 1 hora.

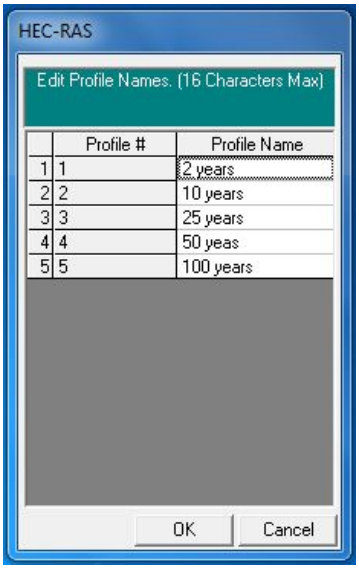


***Figura 180*. Edición del nombre de los perfiles**

Luego de presionar **OK**, se procedió a colocar en la ventana de **Steady Flow Data** los datos de los caudales picos de las crecientes generadas con HEC-HMS. El ingreso de estos datos en el editor se muestra en la Figura 181.

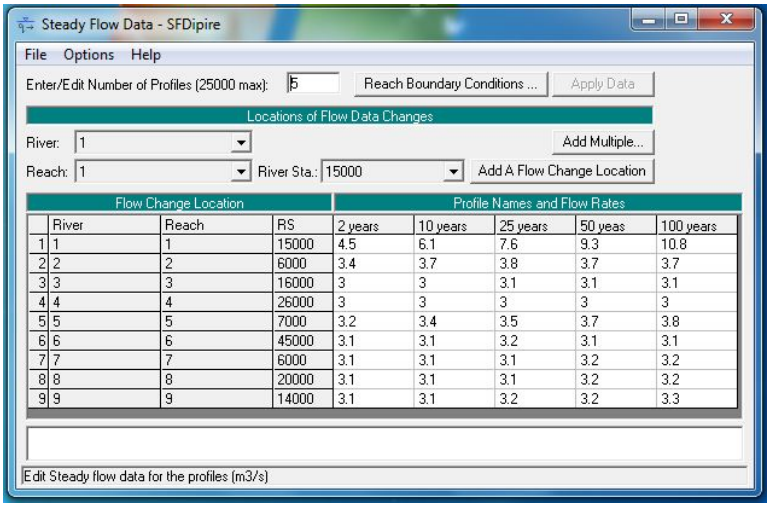


***Figura 181.* Ingreso de los caudales picos de crecientes en el editor de datos de flujo estable**

Después de esto se presionó el botón que se encuentra en la parte superior a la derecha de la ventana de ***Steady Flow Data***, para indicar las condiciones de borde. Al hacer esto se desplegó la ventana que aparece en la Figura 182, en esta se seleccionó el botón de ***Critical Depth*** (profundidad crítica) utilizado para cada tramo. Esta selección será discutida en el análisis de resultados.

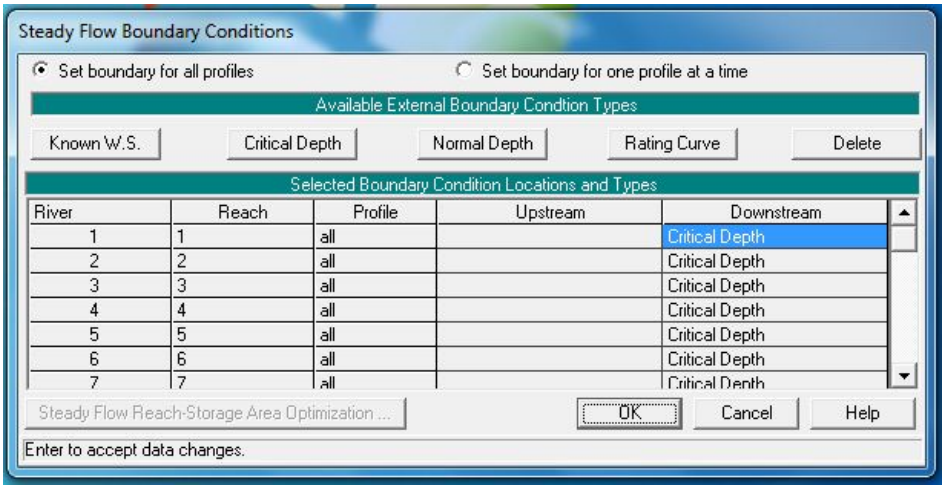


Figura 182. **Ingreso las condiciones límites para el flujo estable**

Para finalizar la edición de estos datos, los mismos fueron almacenados luego de seleccionar **File** y luego **Save Flow Data As,** en la carpeta de proyecto, como se muestra en la Figura 183

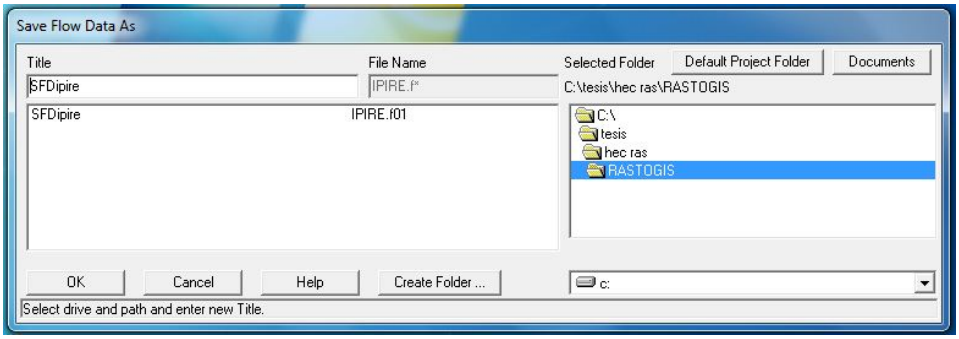


Figura 183. **Almacenamiento de los datos de flujo estable**

3.36 EJECUCIÓN DE LA CORRIDA DEL FLUJO ESTABLE

Todos los datos geométricos y de flujo requeridos por el programa se introdujeron. Entonces, se procedió a ejecutar el mismo, esto se hizo desde el menú ***Run*** de la ventana principal de HEC-RAS, colocando ***Steady Flow Analysis*****,** como se muestra en la Figura 184

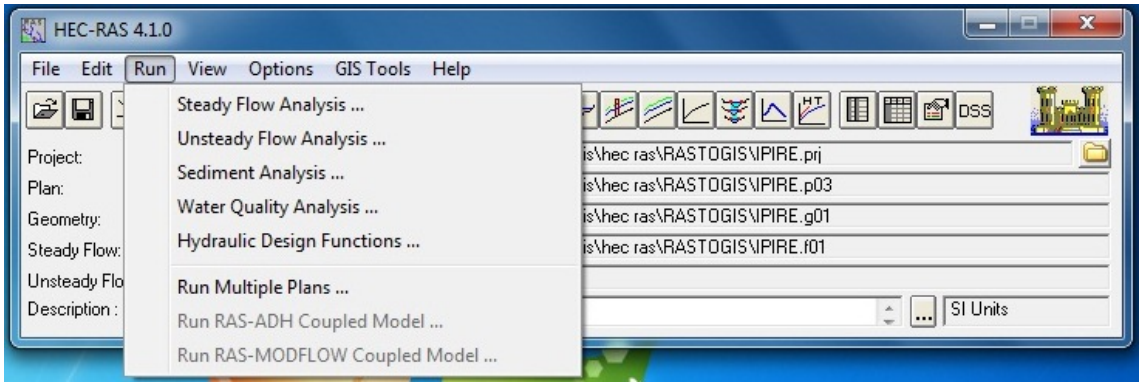


Figura 184. **Ventana principal, selección de Steady Flow Data desde el menú RUN**

Luego apareció la ventana de la Figura 185 en la cual se colocó el tipo de régimen a estudiar y la información fue guardada como un **Plan**, seleccionando **File** y luego **Save Plan As**, para luego introducir el título y se

presiono el botón **OK**. El título de este Plan apareció en la parte superior de la ventana de flujo estable (así como en la ventana principal del programa).

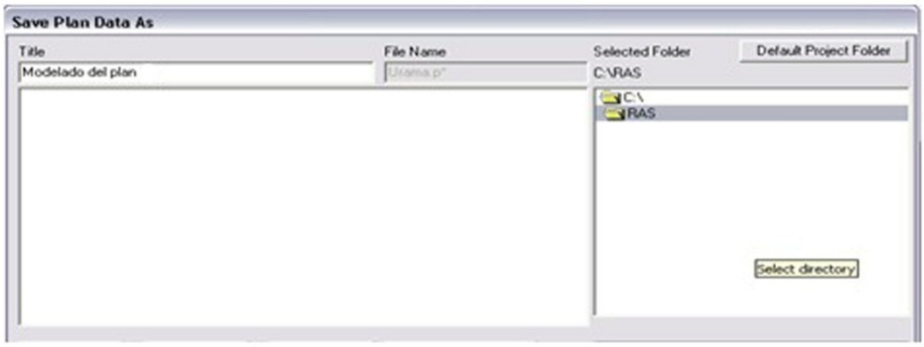


Figura 185. **Título para el plan 03**

Una vez dado el nombre se muestra el cuadro de confirmación del plan como se muetra en la figura 186

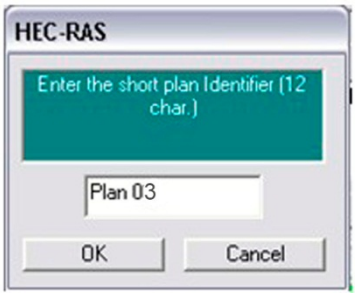


Figura 186**. Identificador del Plan**

Finalmente, el botón **Compute** fue seleccionado para realizar el análisis. Figura 187.

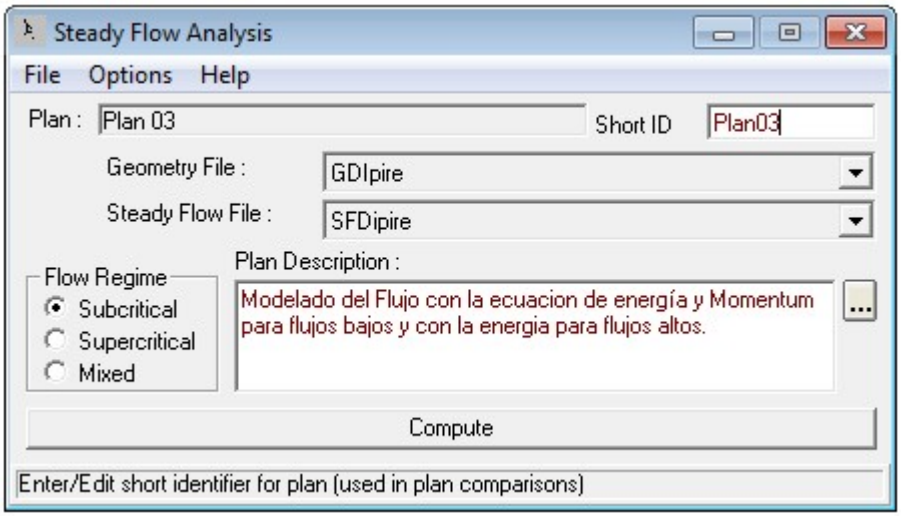


***Figura 187*. Selección del botón Compute para correr el Plan 03**

Luego de esto el programa corrió sin problemas, esto se muestra en la Figura 188. Para ver los resultados en forma gráfica y tabulada se presionó **Close.**

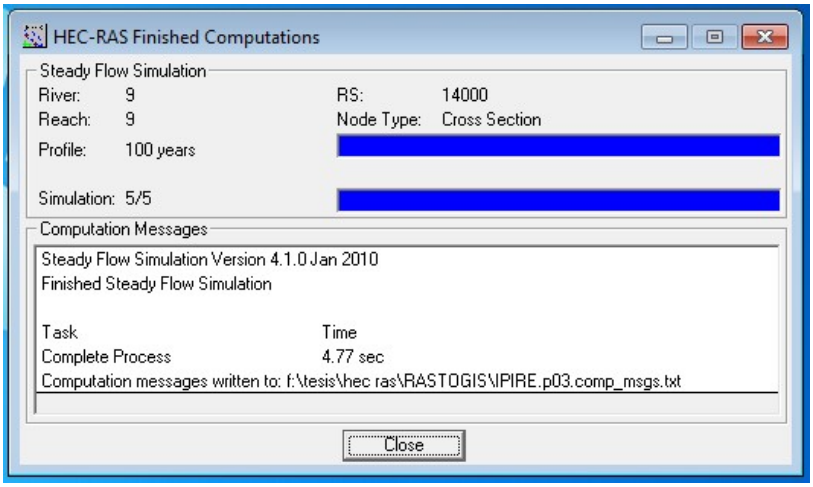


***Figura 188.* Ventana de Ejecución**

Para observar los resultados y el análisis se debe consultar el Capítulo IV.

Finalmente, la ventana principal de HEC-RAS posee todos los campos llenos, una vez que se han cargado la información de los datos geométricos del río, los datos de los caudales picos de las crecientes para distinto período de retorno y duración de lluvia, así como los datos de la corrida o plan, como se muestra en la Figura 189.

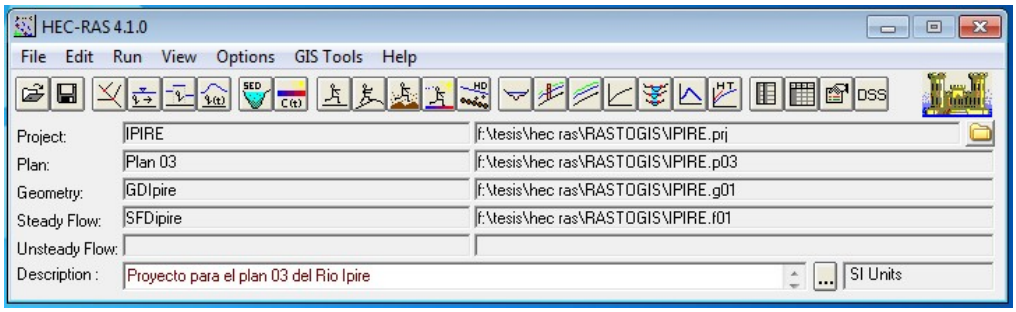


***Figura 189*. Ventana principal de HEC-RAS para proyecto del Plan 03**

3.37 DESARROLLO DEL ARCHIVO DE EXPORTACIÓN HACIA HEC-GEORAS

Luego de correr el programa en HEC-RAS, se creará el archivo de exportación; para ello se seleccionó **File** y luego **Export GIS Data** en la pantalla principal de HEC-RAS. Aparece un cuadro de diálogo, el cual se rellena a criterio del usuario, como se muestra en la Figura 190.

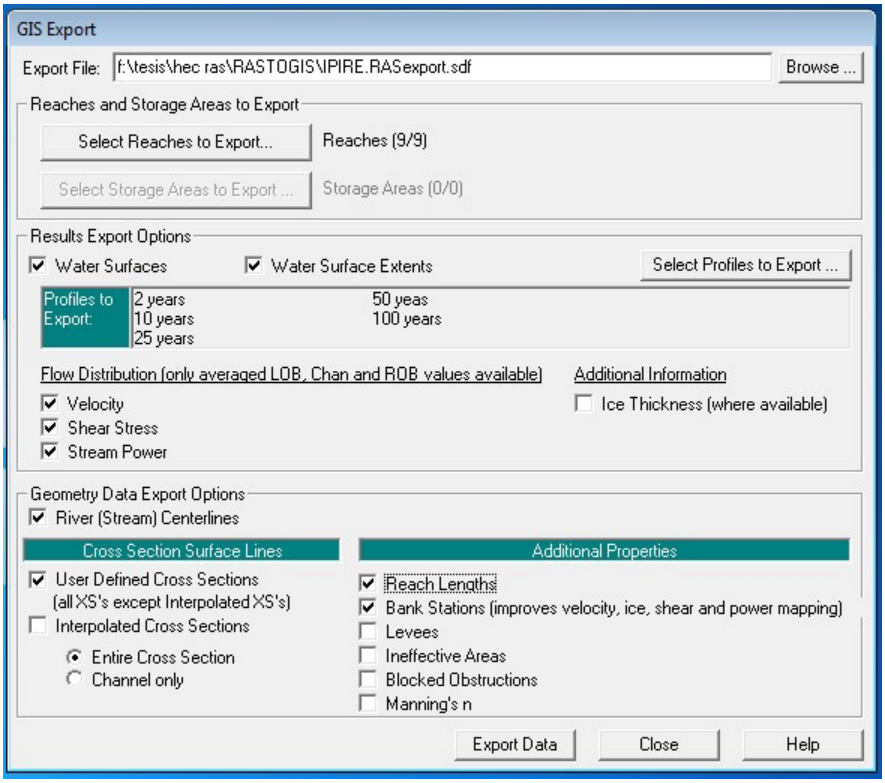


Figura 190. **Creación del archivo de exportación**

Para confirmar la creación del archivo de exportación, una vez presionado el botón Export Data, se despliega el cuadro que se muestra en la Figura 191.

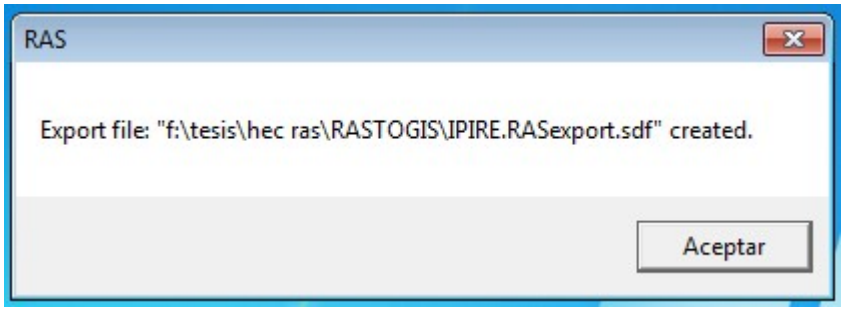


Figura 191. **Confirmación de la creación del archivo de exportación**

El último paso para culminar el procesamiento con el HEC-RAS fue la generación del reporte que contiene todas las tablas de datos y todos los procesos que se llevan a cabo dentro del programa, para ello se seleccionó **File** y luego **Generate Report** en la pantalla principal de HEC-RAS. Aparece un cuadro de diálogo, el cual se rellena a criterio del usuario, como se muestra en la Figura 192. Este archivo generado tiene una extensión *.rep y se guarda automáticamente en el directorio donde fue almacenado el proyecto, la visualización del mismo puede hacerse dentro del menú donde se generó y también modificando la extensión a uno *txt.

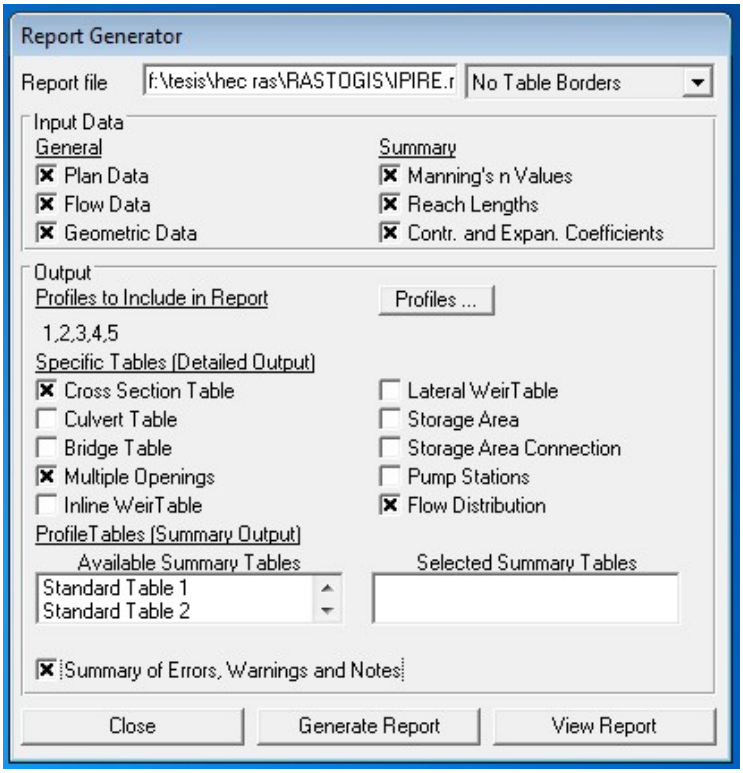


Figura 192. **Generación del Reporte Final**

Al rellenar los campos deseados se pulsó **view report**. Y se desplego una ventana como la que se muestra en la figura 193.

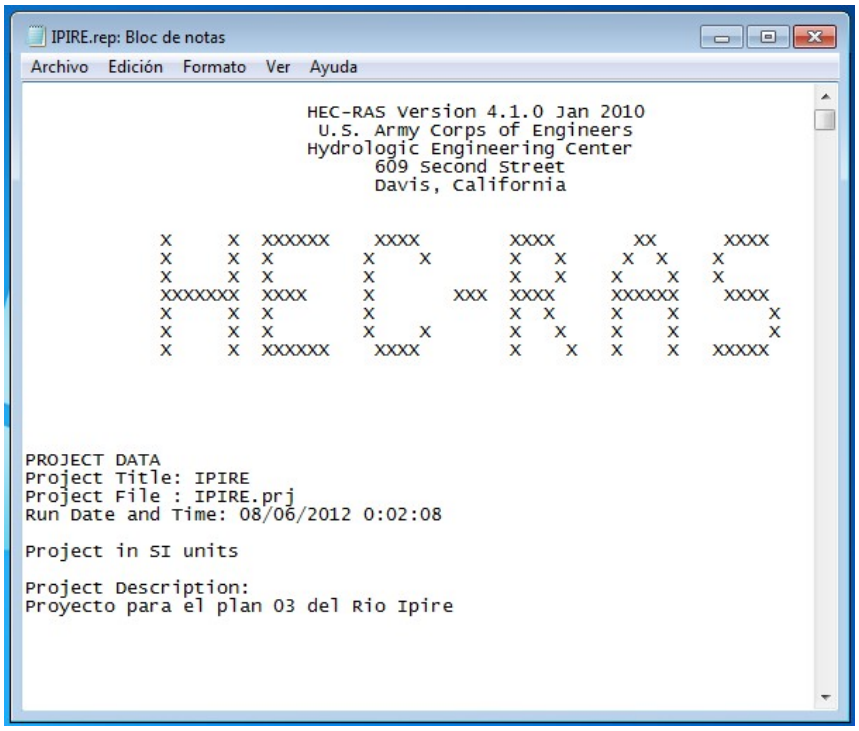


Figura 193. **Reporte Final**

Una vez generado el reporte se puede cerrar HEC-RAS para retornar a HEC-GeoRAS para la creación de los mapas de planicies inundables.

3.38 PROCESAMIENTO DEL ARCHIVO DE EXPORTACION RAS2GIS DESDE HEC-GEORAS.

Los primeros pasos para el procesamiento de los resultados de HEC-RAS son los siguientes:

- Leer el archivo de exportación RAS2GIS en HEC-GeoRas.
- Procesamiento de la base de datos de resultados de RAS.

3.38.1 Leer el archivo de exportación ras2gis en hec-georas

El primer paso para la importación de los resultados de HEC-RAS. Es convertir el archivo de datos de salida de formato SDF en uno de formato XML, ya que HEC-GeoRAS solo usa este formato. Haga clic en el botón (Convertir RAS SDF a XML) para ejecutar esta tarea. Esta herramienta inicia un programa ejecutable externo, llamado SDF2XML.exe que se encuentra en la carpeta "bin" dentro del directorio de instalación del software y se muestra el cuadro de diálogo de la Figura 194.

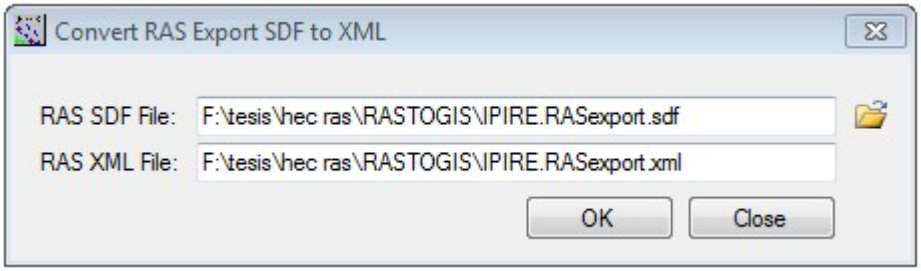


Figura 194. **Conversión del archivo de exportación de .SDF a .XML**

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó el archivo de exportación SIG RAS (RASExport.sdf), esto automáticamente rellena el campo inferior asignando el mismo nombre

del archivo pero cambiando la extensión a RASExport.xml, y guardándolo en el mismo directorio del archivo fuente.

- Seleccionó OK para concluir el proceso.

Al finalizar la conversión el programa muestra una ventana de dialogo. Ver figura 195.

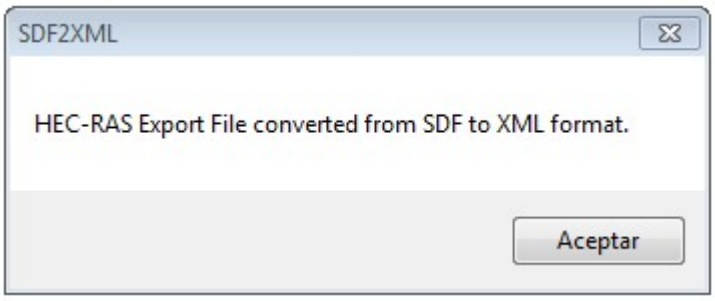


Figura 195. **Archivo de exportación convertido a formato XML**

3.38.2 Configuración de las capas para el postprocesamiento (layer setup)

El siguiente paso para la importación de los resultados de HEC-RAS es configurar las variables necesarias para el análisis post-RAS; cada nuevo análisis requiere de un nuevo directorio. Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping** y luego **Layer Setup**, lo que muestra una ventana de dialogo como la que se muestra en la figura 196. El esta ventana de dialogo eligió el tipo de análisis.

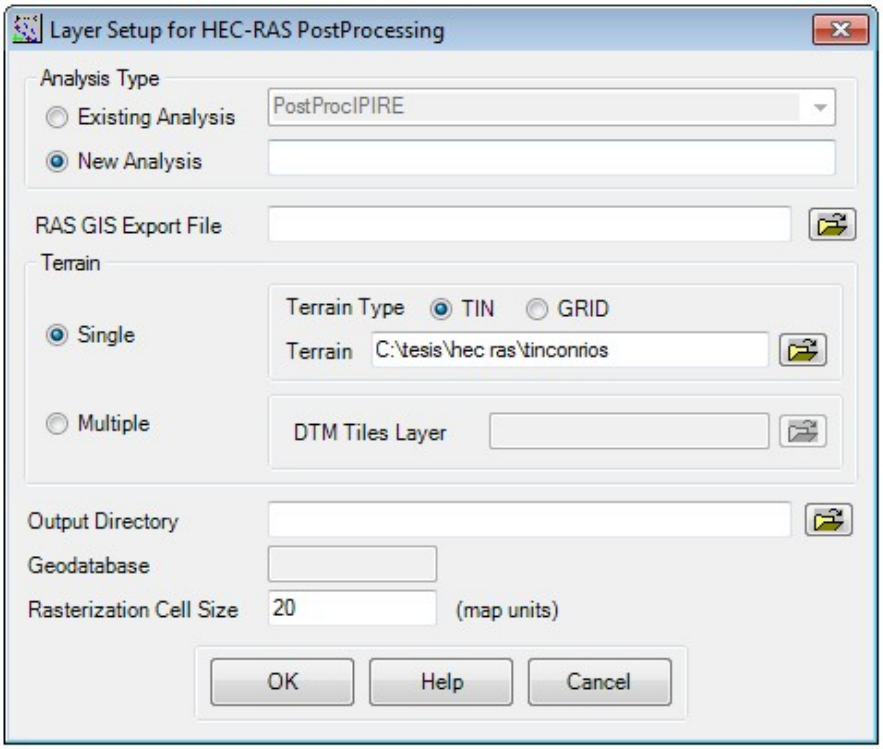


Figura 196. **Configuración de capas para el Postprocesamiento**

- Se seleccionó el tipo de análisis.
- Se ubicó el archivo RASExport.xml convertido en el paso anterior.
- Se ubicó la capa que contenía la topografía del terreno.
- Se dio nombre y se ubicó el directorio de almacenamiento del archivo de salida.
- Se especificó la base de datos geográfica
- Se especificó el tamaño de rasterización de la celda. Se tomó el valor por defecto el cual es 20 unidades del mapa

- Se pulsó ok.

3.38.3 Importar los Datos RAS (Import RAS Data)

Una vez realizada la configuración de las capas se realizó la importación de los datos desde el archivo RASexport.xml. Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping** y luego **Import RAS Data**, lo que muestra una ventana de dialogo como la que se muestra en la figura 197. El esta ventana de dialogo eligió el tipo de análisis.

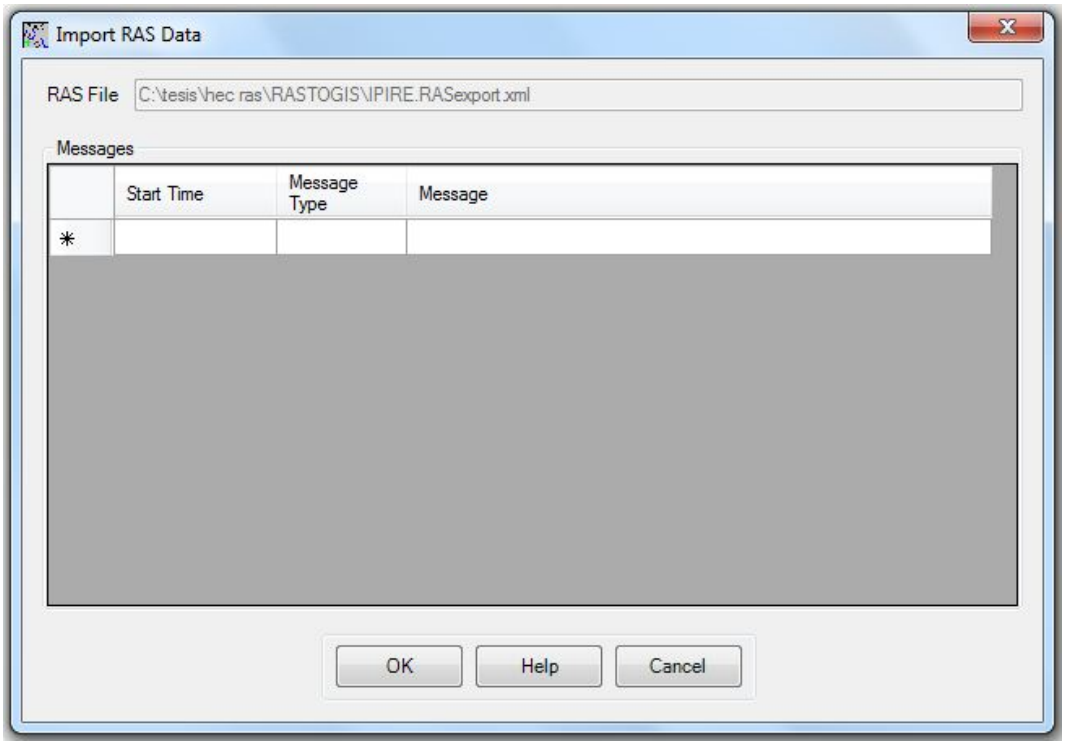


Figura 197. **Menú importación de los datos RAS**

- Se presionó OK, comenzó la importación de los datos como se muestra en la figura 198.

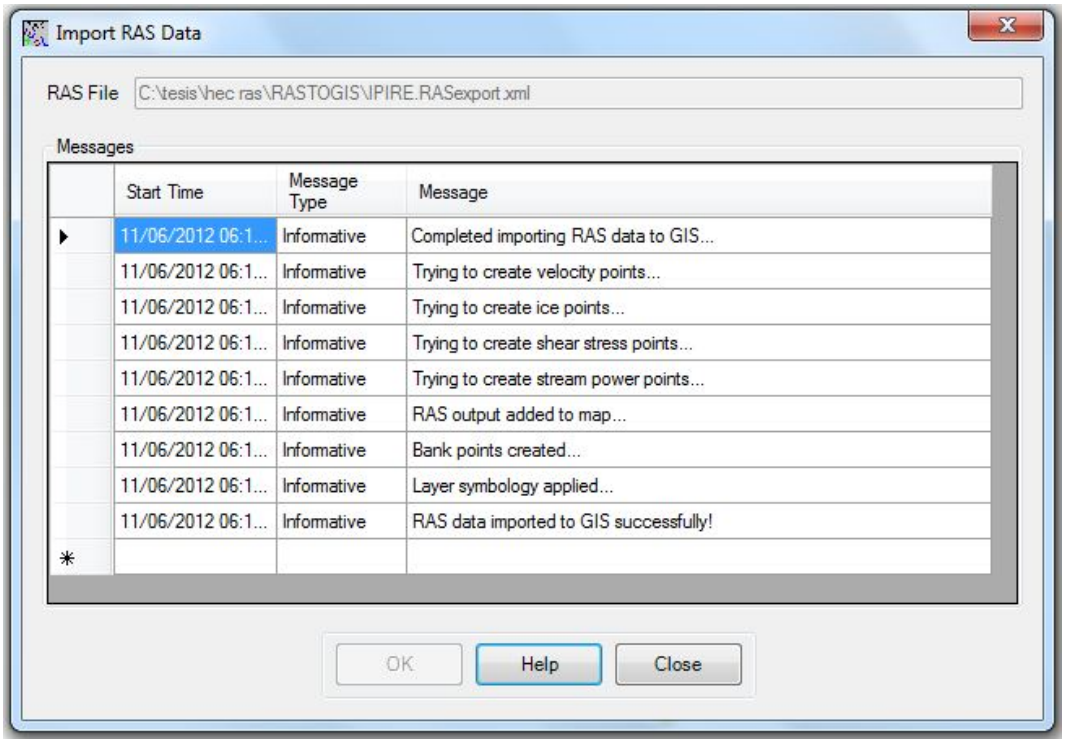


Figura 198. **Avance de la importación de datos**

- Una vez concluida la importación de datos el programa mostró una ventana de dialogo en la cual se pudo leer que los datos habían sido importados satisfactoriamente. Ver figura 199

Figura 199. **Finalización de la importación**

El resultado de este procedimiento genera capas que tiene la información necesaria para continuar el procesamiento, como se muestra en la figura 200. Estas capas son:

- BankPoints: puntos los limites laterales de la red hídrica.
- Power: Fuerza del flujo en el canal.
- Stress: Tension superficial del flujo.
- Velocities: Velocidades del flujo.
- Water Surface Extents: superficie sobre la que se extiende el flujo.
- XS Cut Lines 3D: Secciones transversales sobre el terreno con información de elevaciones.
- River2D: Rio sin información de elevaciones
- XS Cut Lines: Secciones transversales sobre el terreno sin información de elevaciones.
- Bounding Polygon: polígono de límites de la superficie del rio.

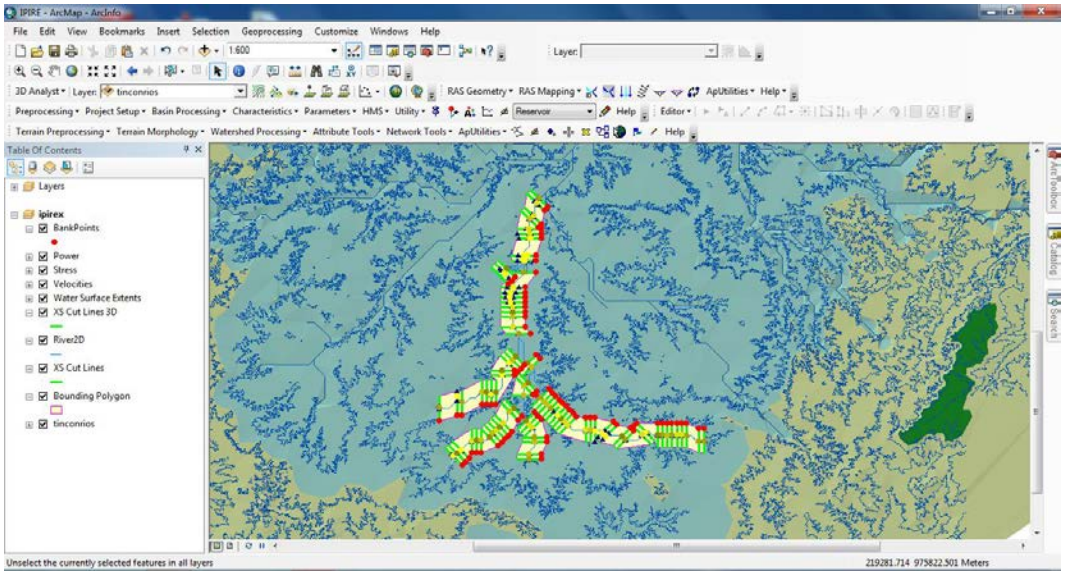


Figura 200. **Capas creadas en la importación de datos**

3.39 PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS DE RAS

El postprocesamiento de los resultados de RAS crea capas SIG para los análisis de inundación y velocidad de flujo, todas las capas desarrolladas en el post-procesamiento están basadas en los datos dentro del archivo de exportación creado en HEC-RAS. Para la consistencia de los datos el mismo TIN utilizado para la generación del archivo de importación (entrada de HEC-RAS) debe ser usado en el post-procesamiento.

3.39.1 Resultados de Inundación

Una vez que el archivo de exportación ha sido leído, se pueden crear los mapas de inundación y sus características.

3.39.1.1 Generación de las Superficies de Agua (Water Surface Generation)

El primer paso es la creación de las superficies de agua en un archivo TIN para cada perfil, estos perfiles corresponden a los distintos periodos de retorno de los eventos analizados, 2, 10, 25, 50 y 100 años respectivamente. Las capas con los TIN de cada perfil se nombran con la letra “t” seguida del nombre del perfil seleccionado, y se guardan en el directorio de salida especificado en la configuración de las capas. Los pasos se muestran a continuación.

- Se seleccionó **RAS Mapping**, luego **Inundation Mapping** y por último **Water Surface Generation**, lo que muestra una ventana de dialogo como la que se muestra en la figura 201.

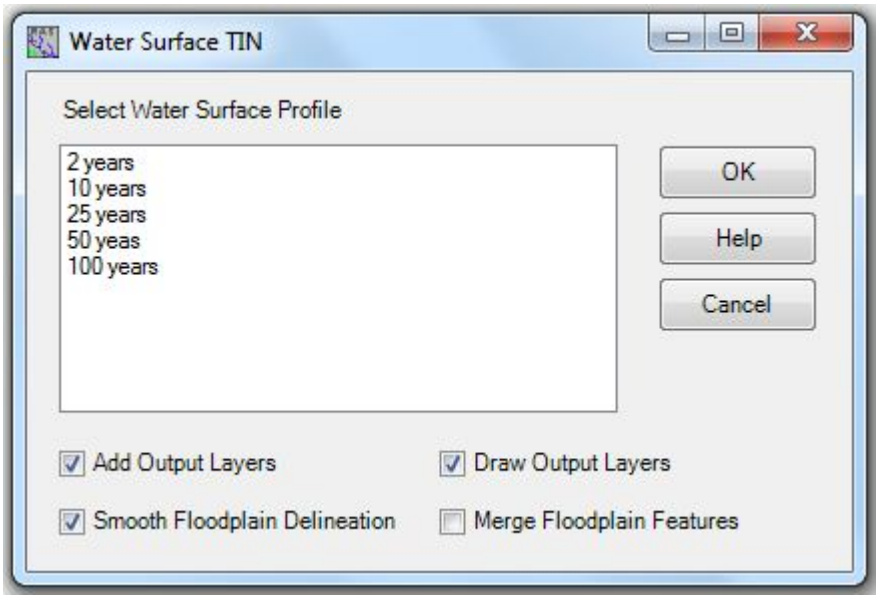


Figura 201. **Creación de la superficie de agua**

En esta ventana de diálogo se eligió el perfil de análisis, el cual a efectos de la realización esta metodología es el perfil de un evento de 2 Años de Periodo de retorno. Se pueden elegir varios perfiles para generar el TIN de varias superficies al mismo tiempo presionando la tecla SHIT durante la selección.

- Se presionó **ok**.

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 202, en la que también se puede observar la capa creada luego de finalizado el procedimiento.

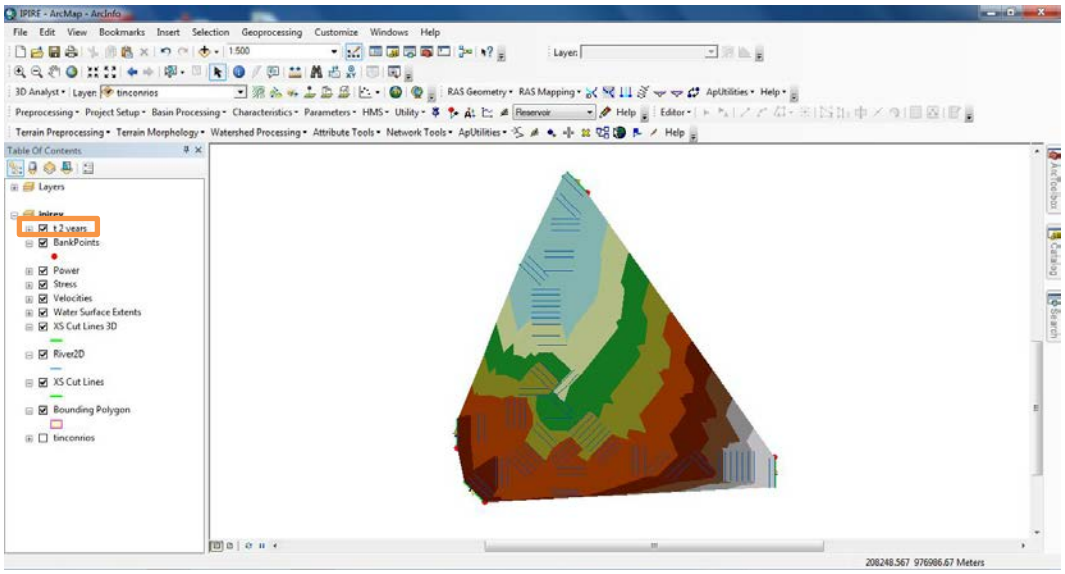


Figura 202. **TIN de superficie de agua generado.**

3.39.1.2 Delimitación de la Planicie de Inundación (Floodplain Delineation)

El siguiente paso fue generar la delimitación de una planicie de inundación para cada perfil, este procedimiento genera dos capas, una de GRID (de profundidades) y otra de POLIGONOS (del contorno de la inundación), este paso solo puede realizarse cuando existe un TIN de superficie del agua generado previamente.

Cada polígono se crea de la intersección entre la superficie de agua y la superficie del terreno, el TIN de superficie de agua y el TIN de terreno se convierten en GRID, con el mismo origen y el mismo tamaño de celda. Cada cuadrícula del GRID representa un valor de profundidad y se crea cuando un valor del GRID de superficie de agua es mayor que el de terreno. El GRID de profundidad se recorta con el POLIGONO de contornos de la superficie inundada para eliminar zonas no incluidas en la red de ríos.

Las capas de GRID de profundidad se nombran con la letra “d” seguido del nombre del perfil seleccionado (por ejemplo, "d 2 years"). Las capas de polígonos de contorno se nombran con la letra "b" seguido por el nombre del perfil seleccionado (por ejemplo, "b 2 years").

Ambas capas se guardan en el directorio de salida especificado en la configuración de las capas y al finalizar el proceso ambas capas son añadidas al mapa.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping**, luego **Inundation Mapping** y por último **floodplain delineation**, lo que muestra una ventana de diálogo como la que se muestra en la figura 203.

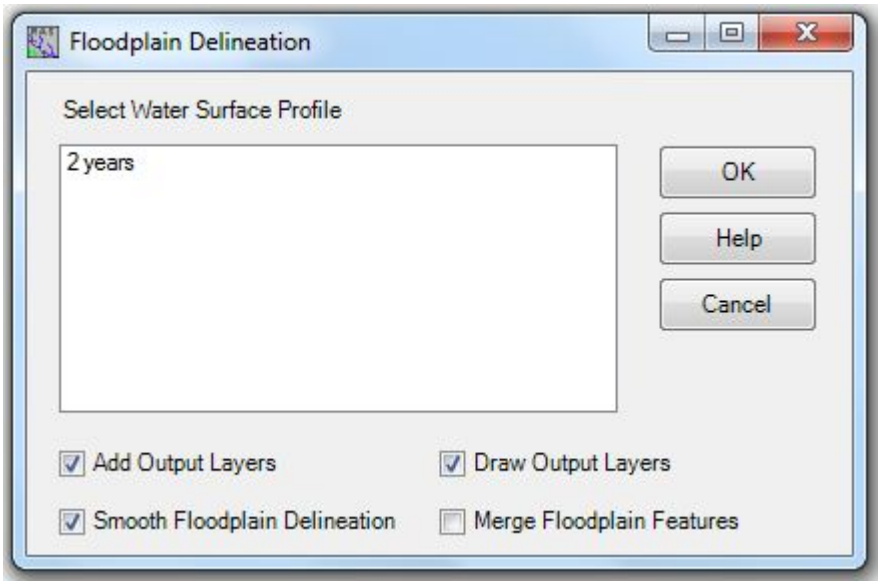


Figura 203. **Delimitación de la superficie de planicie de inundación**

- En esta ventana de diálogo se eligió el perfil a analizar y se presionó **ok**. Se pueden elegir varios perfiles al mismo tiempo presionando la tecla SHIT durante la selección.

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 204 en el cual se puede observar también las capas creadas luego de finalizado el proceso.

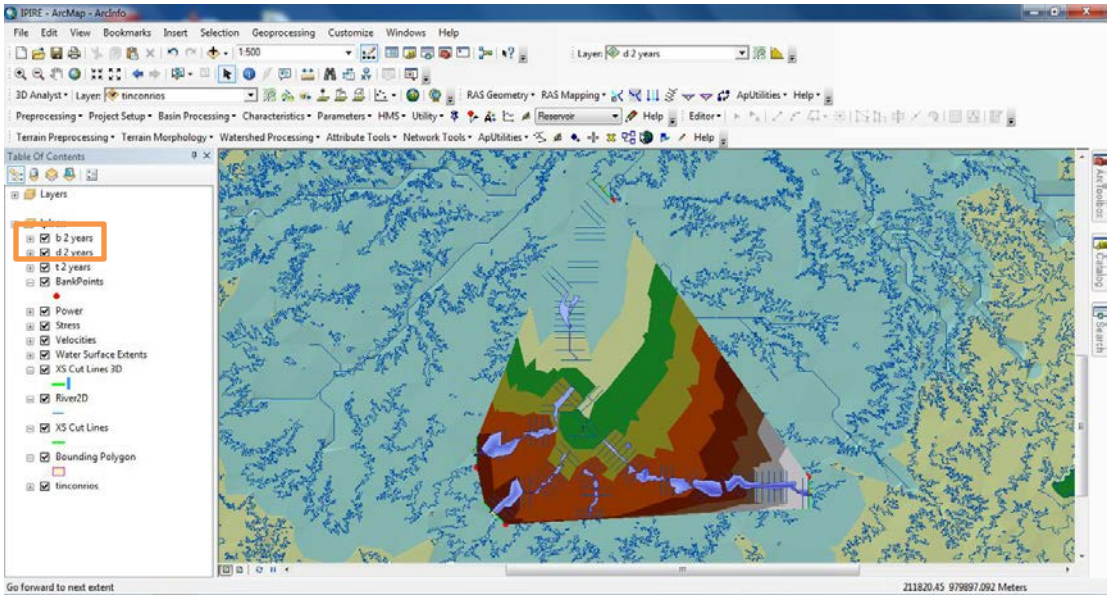


Figura 204. **Capas y Delimitación de la planicie de inundación generada.**

3.39.2 Resultados de Velocidad de flujo (Velocity)

Los resultados de velocidad de flujo exportados desde HEC-RAS pueden ser visualizados usando HEC-GeoRAS. Este procedimiento crea una capa de GRID de velocidades para cada perfil basado en la información de la capa “velocities” la cual posee puntos de velocidad, y la capa de contornos de la planicie inundable.

Las capas de GRID de velocidades se nombran con la letra “v” seguido del nombre del perfil seleccionado (por ejemplo, "v 2 years"). Las capas se guardan en el directorio de salida especificado en la configuración de las capas y al finalizar el proceso son añadidas al mapa.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping**, y luego **Velocity Mapping**, lo que muestra una ventana de diálogo como la que se muestra en la figura 205.

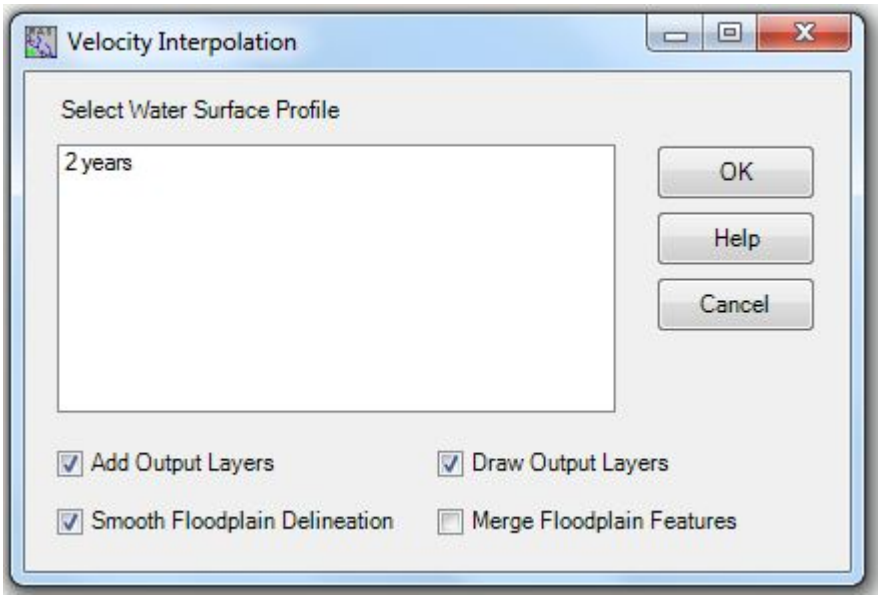


Figura 205. **Selección del perfil para generar el mapa de velocidades.**

- En esta ventana de diálogo se eligió el perfil a analizar y se presionó **ok**. Se pueden elegir varios perfiles al mismo tiempo presionando la tecla SHIT durante la selección.

Luego de finalizado el proceso se mostró una ventana en la que se podía leer que el proceso había sido completado satisfactoriamente. Ver figura 206

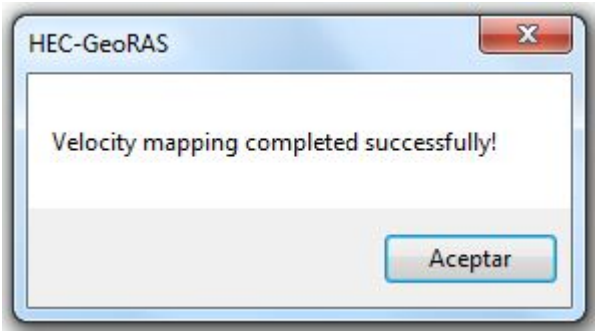


Figura 206. **Mapa de velocidades generado satisfactoriamente.**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 207 en el cual se puede observar también la capa creada.

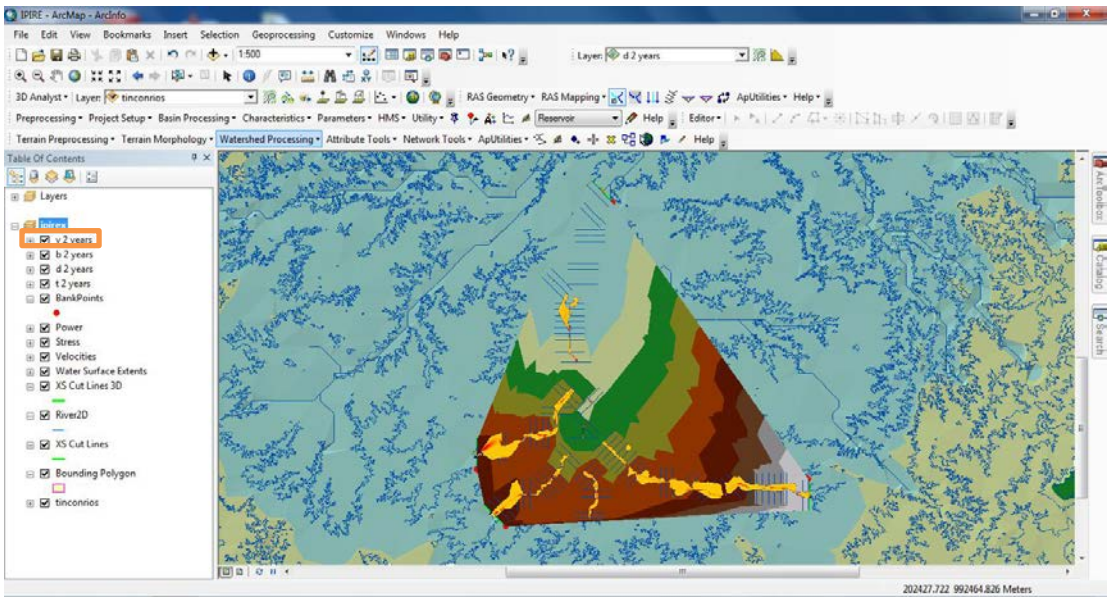


Figura 207. **Capa y Mapa de velocidades generado.**

3.39.3 Resultados de la Fricción en el Lecho del Canal (Shear Stress)

Los resultados de **Shear Stress** exportados desde HEC-RAS pueden ser visualizados usando HEC-GeoRAS. Este procedimiento crea una capa

de GRID de **Shear Stress** para cada perfil basado en la información de la capa “stress” la cual posee puntos de stress, y la capa de contornos de la planicie inundable.

Las capas de GRID de stress se nombran con la letra “s” seguido del nombre del perfil seleccionado (por ejemplo, "s 2 years"). Las capas se guardan en el directorio de salida especificado en la configuración de las capas y al finalizar el proceso son añadidas al mapa.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping**, y luego **Shear Stress Mapping**, lo que muestra una ventana de diálogo como la que se muestra en la figura 208.

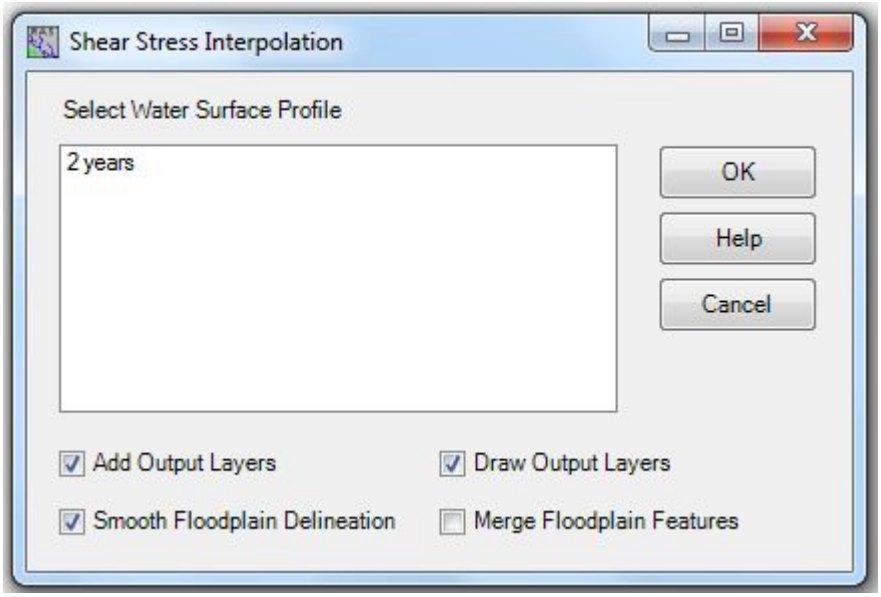


Figura 208. **Selección del perfil para generar el mapa de Fricción en el Lecho del Canal.**

- En esta ventana de diálogo se eligió el perfil a analizar y se presionó **ok**. Se pueden elegir varios perfiles al mismo tiempo presionando la tecla SHIT durante la selección.

Luego de finalizado el proceso se mostró una ventana en la que se podía leer que el proceso había sido completado satisfactoriamente. Ver figura 209

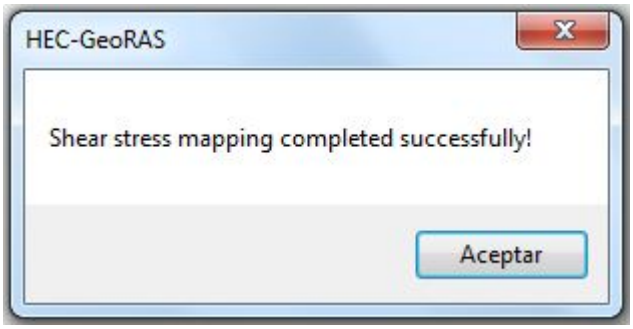


Figura 209. **Mapa de Fricción en el Lecho del Canal generado satisfactoriamente.**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 210 en el cual se puede observar también la capa creada.

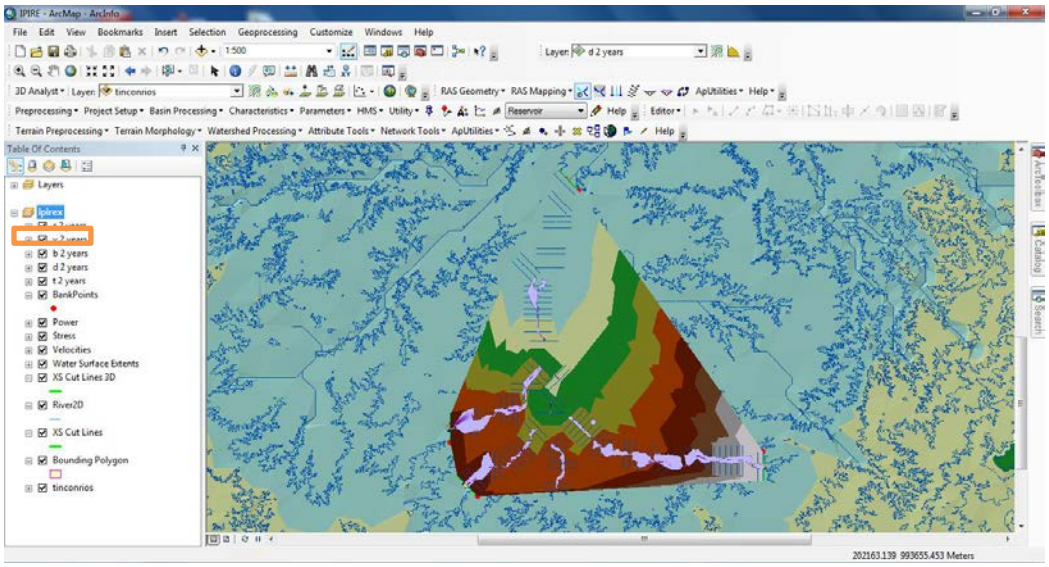


Figura 210. **Resultado del mapa de Fricción en el Lecho del Canal**

3.39.4 Resultados de la energía del flujo (Stream Power)

Los resultados de **Stream Power** exportados desde HEC-RAS pueden ser visualizados usando HEC-GeoRAS. Este procedimiento crea una

capa de GRID de **Stream Power** para cada perfil basado en la información de la capa “power” la cual posee puntos de power, y la capa de contornos de la planicie inundable.

Las capas de GRID de power se nombran con la letra “p” seguido del nombre del perfil seleccionado (por ejemplo, "p 2 years"). Las capas se guardan en el directorio de salida especificado en la configuración de las capas y al finalizar el proceso son añadidas al mapa.

Los pasos se muestran a continuación:

- Se seleccionó **RAS Mapping**, y luego **Stream Power Mapping**, lo que muestra una ventana de diálogo como la que se muestra en la figura 211.

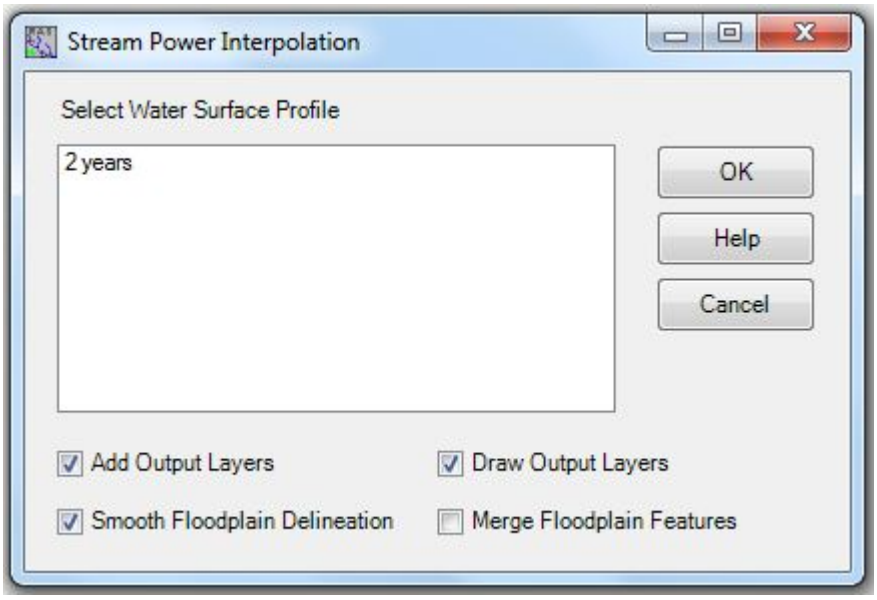


Figura 211. **Selección del perfil para generar el mapa de energía del flujo.**

- En esta ventana de diálogo se eligió el perfil a analizar y se presionó **ok**. Se pueden elegir varios perfiles al mismo tiempo presionando la tecla SHIT durante la selección.

Luego de finalizado el proceso se mostró una ventana en la que se podía leer que el proceso había sido completado satisfactoriamente. Ver figura 212

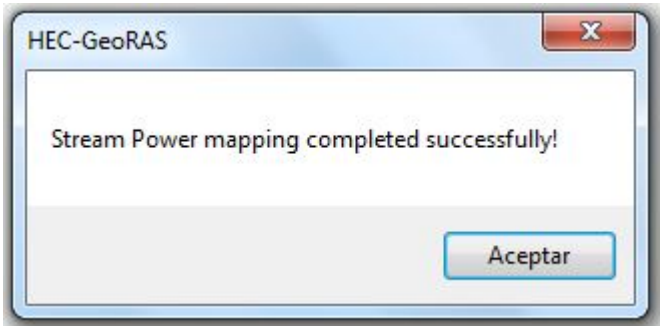


Figura 212. **Mapa de Energía del Flujo generado satisfactoriamente.**

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 213 en el cual se puede observar también la capa creada.

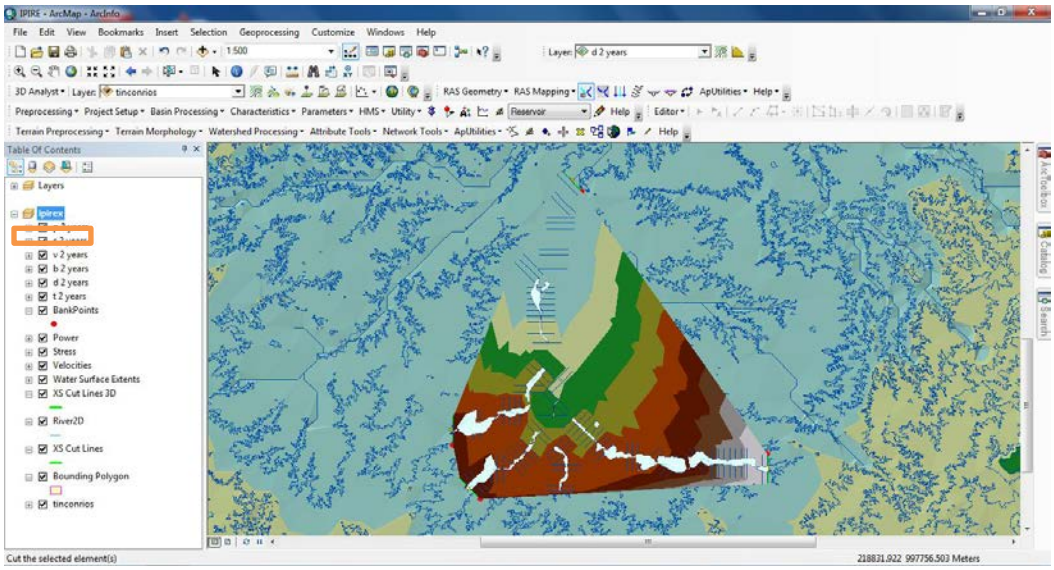


Figura 213. **Resultado del Mapa de Energía del Flujo**

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE DATOS DE LA RED DE ESTACIONES DE MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO UNARE

4.1.1 Lluvia

Las características de la lluvia se describen mediante los siguientes resultados:

4.1.1.1 Descripción de las series de tiempo de las lluvias medias mensuales.

A modo de ejemplo se mostrará los resultados de la estación Bella vista, el resto de la estación generada muestra en el apéndice K.

- **Estación Bella vista, serial: 2512**

En la Tabla 2 se comparan los resultados que se obtuvieron al someter los datos de precipitación (variable de estudio), aplicando los siguientes modelos

(A) Caminata aleatoria,

(B) Media constante = 104.499,

(C) Tendencia lineal = 95.5899 + 0.0218097 t ,

(H) Suavización exponencial simple con alfa = 0.096

(I) Suavización exp. De Brown con alfa = 0.0488

(J) Suavización exp. De Holt con alfa = 0.1226 y beta = 0.0111

(M) ARIMA(0,0,0)x(2,0,2)12 con constante

(N) ARIMA(0,1,1)x(2,1,2)12

(O) ARIMA(0,1,1)x(2,0,2)12

(P) ARIMA(1,0,0)x(2,0,2)12 con constante

(Q) ARIMA(0,0,1)x(2,0,2)12 con constante

Tabla 3. **Comparación de modelos, Estación Bella vista, serial: 2512**

Modelo	RMSE	MAE	ME	AIC
(A)	141.883	80.1806	1.50453	9.9724
(B)	93.0211	55.9451	-5.9137	9.13708
(C)	92.7606	55.8709	-5.9412	9.13742
(H)	115.731	64.3217	-8.00684	9.57397
(I)	125.01	68.4367	-9.1004	9.72821
(J)	123.884	67.5717	1.74108	9.71607
(M)	90.9732	53.8081	3.27204	9.05089
(N)	91.1885	56.3274	-0.0939641	9.05562
(O)	91.2302	56.4401	-4.36272	9.05653
(P)	90.995	53.9291	3.42419	9.05732
(Q)	90.9982	53.9241	3.43056	9.05739

En la Tabla 3 se muestran las pruebas aplicadas a cada uno de los modelos; evaluando el que mejor se ajusta y predice satisfactoriamente la ocurrencia futura de la precipitación mediante la aplicación de cuatro pruebas: la raíz del error cuadrado medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el error medio (ME), Criterio de información de Akaike (AIC).

Como resultado se obtiene que el modelo con el menor valor del Criterio de información de Akaike (AIC) es el modelo (M) siendo este el que mejor se ajusta y por esto será utilizado para generar los pronósticos (valores futuros). El modelo seleccionado es un promedio móvil autoregresivo integrado (ARIMA). Este modelo asume que el mejor pronóstico disponible para datos futuros está dado por el modelo paramétrico que relaciona el valor más reciente con los valores y ruido previos.

Parámetros del modelo seleccionado

En la Tabla 4 se muestra la significancia estadística de los términos en el modelo de pronósticos. Términos con valores-P menores que 0.05 son estadísticamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. El valor-P para el término SAR(2) es menor que 0.05, de modo que es estadísticamente diferente de 0. El valor-P para el término SMA(2) es menor que 0.05, de modo que es estadísticamente diferente de 0. El valor-P para el término de la constante es mayor o igual que 0.05, de modo que no es estadísticamente significativo. Usted debería considerar eliminar el término

de la constante del modelo. La desviación estándar estimada del ruido blanco de entrada es igual a 91.3741.

Tabla 4. Parámetros de modelo seleccionado, Estación Bella vista, serial: 2512

Parámetro	Estimado	Error Estd.	t	Valor-P
SAR(1)	0.0536417	0.0429572	1.24873	0.212617
SAR(2)	0.96138	0.0441501	21.7752	0.000000
SMA(1)	-0.0178988	0.0702531	-0.254776	0.799049
SMA(2)	0.671572	0.0693068	9.68984	0.000000
Media	76.1727	40.925	1.86128	0.063561
Constante	-1.14426			

En la figura 214 se observa los resultados de la predicción del modelo ARIMA(0,0,0)x(2,0,2)12 con constante con 348 datos observados, con un intervalo de muestra mensual, la longitud de la estacionalidad es igual a 12 y se generan 12 valores de pronostico reteniendo 12 valores para la comprobación se puede ver como el modelo se comporta y como la línea de pronostico y datos observados se asemejan y ambas se encuentran en los limites tanto inferior como superior que el modelo genera

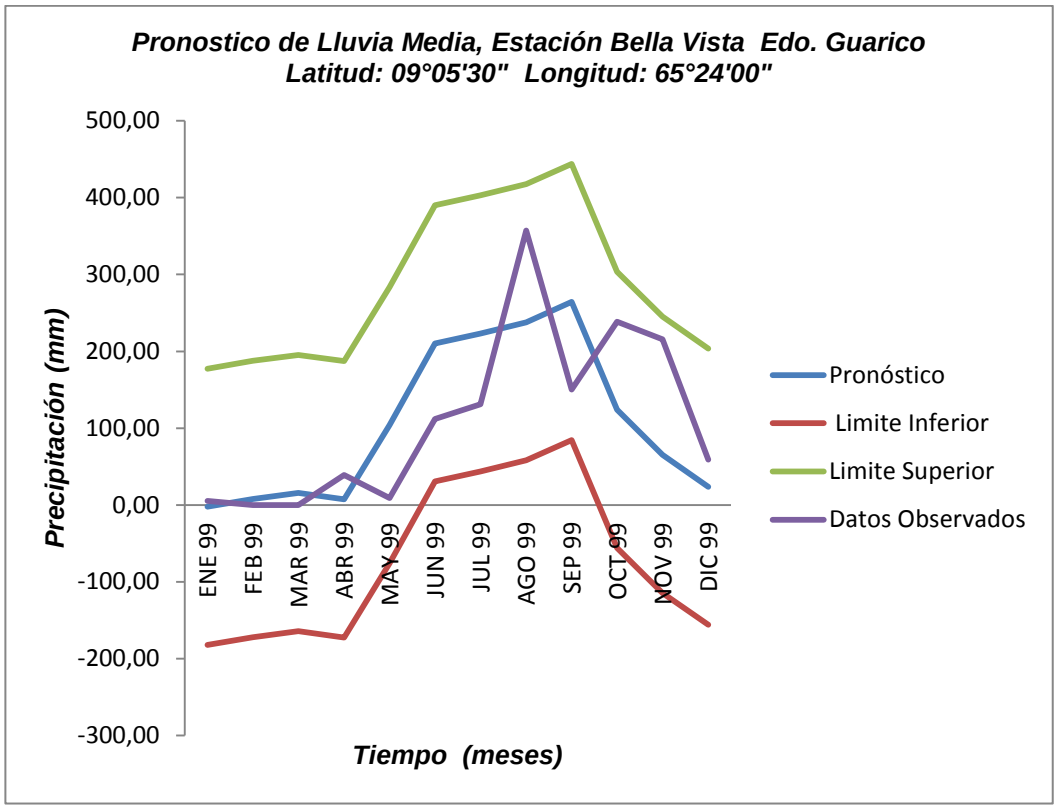


Figura 214. Pronostico de Lluvia Media, Estación Bella Vista Edo. Guárico Latitud: 09°05'30" Longitud: 65°24'00"

En la Figura 215 se muestran las autocorrelaciones estimadas entre los residuos a diferentes retrasos. El coeficiente de autocorrelación con retraso k mide la correlación entre los residuos al tiempo t y al tiempo t-k. También se muestran límites de probabilidad del 95.0% alrededor de 0. Si los límites de probabilidad a un retraso particular no contienen el coeficiente estimado, hay una correlación estadísticamente significativa a ese retraso al nivel de confianza del 95.0%. En este caso, uno de los 24 coeficientes de autocorrelación es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95.0% nivel de confianza, implicando que los residuos pueden no ser completamente aleatorios (ruido blanco). Aun cuando se encontró que uno de los residuos no es completamente aleatorio se considera que la

correlación es ligera para este retraso, por lo que se afirma que las observaciones consecutivas son independientes.

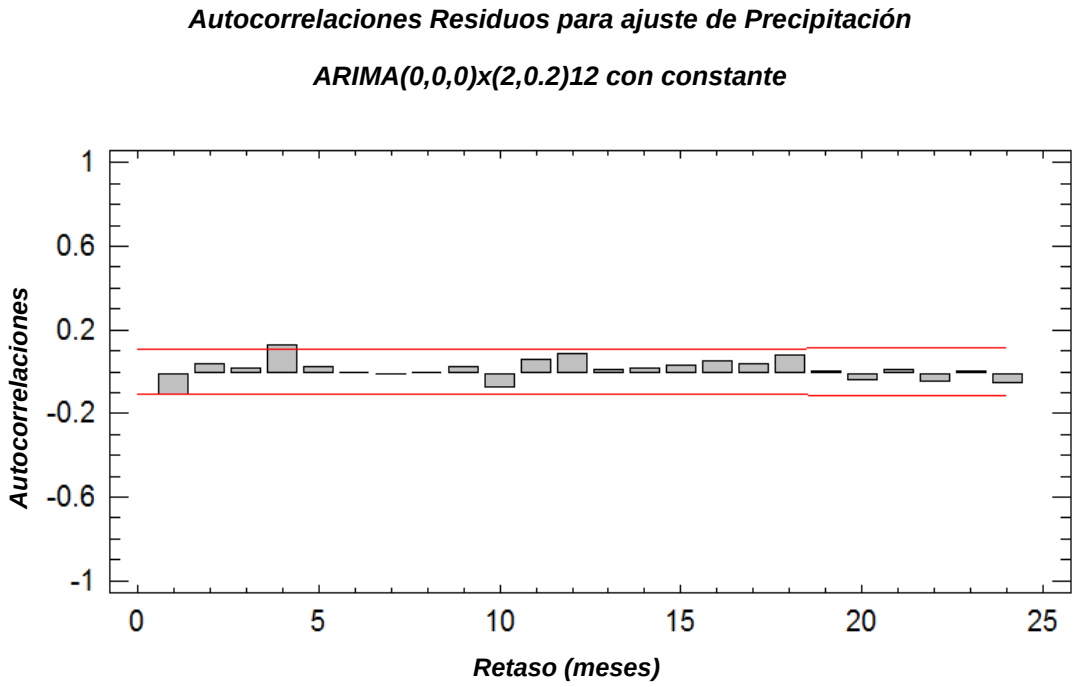


Figura 215. **Autocorrelaciones Residuos para ajuste de Precipitación ARIMA(0,0,0)x(2,0.2)12 con constante**

En la tabla 5 se muestran los modelos resultantes que se obtuvieron de las 29 estaciones, en la columna uno de la tabla 5 se enumeran una a una las estaciones, en la columna 2 se coloca el serial con el cual el INAMEH identifica a cada estación, en la columna 3 se coloco el nombre con el cual se identifica cada estación, en la columna 4 y 5 se muestran la coordenadas geográficas en la cual se ubica cada una de las estaciones, en la columna 6 se muestra el modelo que el programa arrojo como resultado, el que mejor se ajusta, en la columna 7 se muestran cada uno de los parámetros (P, D, Q, p, d, q y s) del modelo obtenido, en la columna 8, 9 , 10 y 11 se muestran los

resultado de las pruebas aplicadas a cada uno de los modelo, la raíz del error cuadrado medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el error medio (ME), Criterio de información de Akaike (AIC). En la tabla 6 Se muestran los modelos resultantes que se obtuvieron de las 29 estaciones y coeficiente de determinación de cada una de etas, en la columna uno de la tabla 6 se enumeran una a una las estaciones, en la columna 2 se coloca el serial con el cual el INAMEH identifica a cada estación, en la columna 3 se coloco el nombre con el cual se identifica cada estación, en la columna 4 y 5 se muestran la coordenadas geográficas en la cual se ubica cada una de las estaciones, en la columna 6 se muestra el modelo que el programa arrojo como resultado (el que mejor se ajusta), en la columna 7 se muestra el coeficiente de determinación. Las graficas de los ajustes del coeficiente de determinación, se muestran en el apéndice N

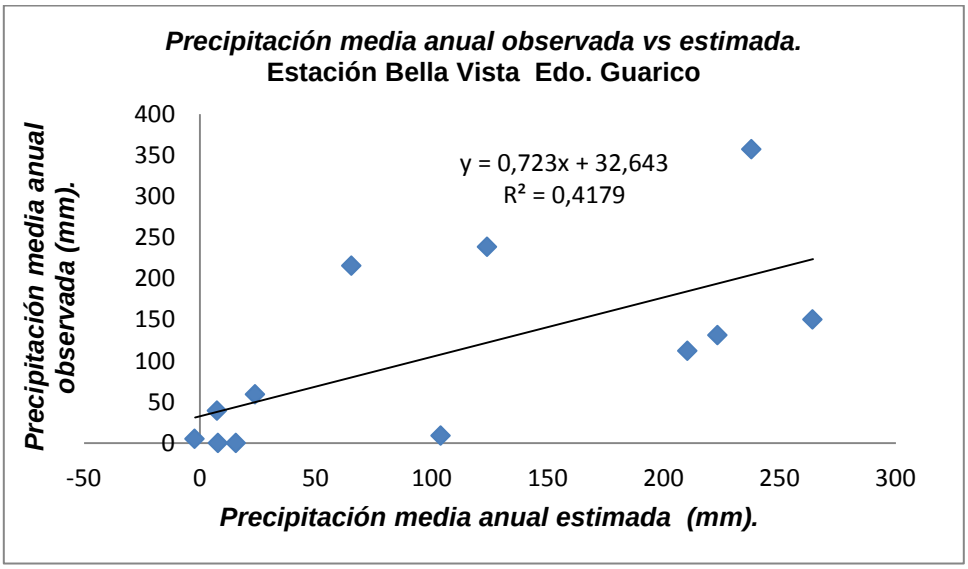


Figura 209. **Ajuste de Precipitación Observada y Estimada respecto al coeficiente de determinación (R^2)**

Tabla 5. Estadísticos de ajuste en la etapa de calibración para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui).

N°	*Serial*	*Nombre*	*Coordenadas*		*Modelo*	*Parámetros*	*Resultados de Pruebas Aplicadas*			
			Latitud	*Longitud*			*RMSE*	*MAE*	*ME*	*AIC*
1	2512	Bella vista	09°05'30"	65°24'00"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(2,0.2)12	90.973	53.808	3.272	9.051
2	3625	Santa Maria De Ipire	08°50'30	65°19'50"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,2)x(0,1,1)12	64.963	43.039	3.954	8.364
3	2757	Anaco	09°29'00"	64°29'00"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(2,0,0)x(1,1,2)12	54.640	34.436	1.736	8.020
4	1755	Aragua De Barcelona	09°27'55"	64°49'00"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(2,0,2)	79.294	46.948	-0.152	8.768
5	2722	El Carito	09°47'07"	64°47'07"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	65.440	41.772	5.164	8.372
6	2761	Guayabal	09°26'05"	64°43'15"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	85.042	43.253	3.992	8.891
7	2764	San Joaquín, serial: 2764	09°18'00	64°28'58"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(2,0,0)x(1,1,1)12	63.321	37.796	0.081	8.310
8	2647	Guaribe – Tenepe	09°45'41"	65°29'08"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	70.979	43.758	0.451	8.533
9	2602	Km 133	09°34'35"	65°38'10"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(2,0,1)x(2,1,1)12	72.715	45.150	1.162	8.599
10	2602	San Jose De Guaribe	09°51'52"	65°49'43"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	93.615	48.216	1.624	9.086
11	2630	Uveral	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	92.973	50.490	4.603	9.087
12	2605	Guanape	09°55'10"	65°30'07"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	70.119	41.608	2.340	8.508
13	2607	Valle Guanape	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,2)x(0,1,1)12	55.908	37.147	0.591	8.063
14	2674	El Palmar	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,1)x(0,1,2)12	99.259	52.235	4.491	9.217
15	3603	Mata Linda	08°54'50"	65°39'00"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,2)12	95.220	54.984	-0.022	9.129
16	2513	Presa Tamanaco	09°27'02"	66°03'50"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	51.718	34.784	0.774	7.902

Tabla 5. Cont. Estadísticos de ajuste en la etapa de calibración para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui).

N°	*Serial*	*Nombre*	*Coordenadas*		*Modelo*	*Parámetros*	*Resultados de Pruebas Aplicadas*			
			Latitud	*Longitud*			*RMSE*	*MAE*	*ME*	*AIC*
17	2499	Quebrada Honda	09°12'55"	65°34'05"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,1)x(2,1,2)12	68.705	43.983	2.532	8.490
18	2539	San Antonio Tamanaco	09°41'30"	66°02'32"	Suavizado exponencial simple	Alpha=0.0148.	89.212	47.570	-0.547	9.032
19	2601	Soublette	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	99.535	50.473	5.147	9.205
20	2671	Estación Tucupido,	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(2,0,1)x(1,0,2)12	112.588	69.410	-1.251	9.498
21	2589	Valle De La Pascua	09°13'00"	66°00'00"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	49.515	32.093	2.485	7.809
22	2608	Clarines	09°57'50"	65°09'50"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	52.062	32.839	2.043	7.917
23	2650	El Chaparro	09°09'03"	65°00'33"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	75.575	45.758	1.156	8.666
24	2508	El Dividivi	05°59'00"	65°05'25"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	107.703	65.417	-1.548	9.379
25	2648	Onoto	09°36'06"	65°11'49"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	64.198	39.870	2.657	8.340
26	3712	Pariaguan	08°50'43"	64°42'59"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	64.198	39.870	2.657	8.340
27	2614	Santa Clara	N.C.	N.C.	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	51.903	30.479	3.281	7.903
28	1680	Boca De Uchire	10°08'48"	65°25'40"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(0,1,2)12	52.682	33.417	2.760	7.941
29	1683	La Cerca	10°06'11"	65°12'49"	ARIMA(p,d,q)x(P,D;Q)s	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	35.732	21.786	2.351	7.161

Tabla 6. Estadísticos de ajuste en la etapa de pronóstico para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui).

Número	*Estación*	*Nombre*	*Coordenadas*		*Modelo*	*R2*
			Latitud	*Longitud*		
1	2512	Bella vista	09°05'30"	65°24'00"	ARIMA(0,0,0)x(2,0.2)12	0.4
2	3625	Santa Maria De Ipire	08°50'30	65°19'50"	ARIMA(0,0,2)x(0,1,1)12	0.5
3	2757	Anaco	09°29'00"	64°29'00"	ARIMA(2,0,0)x(1,1,2)12	0.4
4	1755	Aragua De Barcelona	09°27'55"	64°49'00"	ARIMA(2,0,2)	0.5
5	2722	El Carito	09°47'07"	64°47'07"	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	0.1
6	2761	Guayabal	09°26'05"	64°43'15"	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0.4
7	2764	San Joaquín, serial: 2764	09°18'00	64°28'58"	ARIMA(2,0,0)x(1,1,1)12	0.7
8	2647	Guaribe – Tenepe	09°45'41"	65°29'08"	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	0.6
9	2602	Km 133	09°34'35"	65°38'10"	ARIMA(2,0,1)x(2,1,1)12	0.3
10	2602	San Jose De Guaribe	09°51'52"	65°49'43"	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0
11	2630	Uveral			ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	0.6
12	2605	Guanape	09°55'10"	65°30'07"	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	0.8
13	2607	Valle Guanape	N.C.	N.C.	ARIMA(0,0,2)x(0,1,1)12	0.4
14	2674	El Palmar	N.C.	N.C.	ARIMA(0,0,1)x(0,1,2)12	0.3
15	3603	Mata Linda	08°54'50"	65°39'00"	ARIMA(0,0,0)x(0,1,2)12	0.5
16	2513	Presa Tamanaco	09°27'02"	66°03'50"	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0.8
17	2499	Quebrada Honda	09°12'55"	65°34'05"	ARIMA(1,0,1)x(2,1,2)12	0.7
18	2539	San Antonio Tamanaco	09°41'30"	66°02'32"	Alpha=0.0148.	0
19	2601	Soublette	N.C.	N.C.	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0.1

Tabla XX. Cont. Estadísticos de ajuste en la etapa de pronóstico para las estaciones pluviométricas de la cuenca del Rio Unare (Estados Guárico-Anzoátegui).

Número	*Estación*	*Nombre*	*Coordenadas*		*Modelo*	R^2
			Latitud	*Longitud*		
21	2589	Valle De La Pascua	09°13'00"	66°00'00"	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0.6
22	2608	Clarines	09°57'50"	65°09'50"	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	0.5
23	2650	El Chaparro	09°09'03"	65°00'33"	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	0.2
24	2508	El Dividivi	05°59'00"	65°05'25"	ARIMA(1,0,1)x(0,1,1)12	0.8
25	2648	Onoto	09°36'06"	65°11'49"	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	0.6
26	3712	Pariaguan	08°50'43"	64°42'59"	ARIMA(1,0,0)x(2,1,1)12	0.1
27	2614	Santa Clara	N.C.	N.C.	ARIMA(0,0,0)x(0,1,1)12	0.7
28	1680	Boca De Uchire	10°08'48"	65°25'40"	ARIMA(1,0,0)x(0,1,2)12	0.1
29	1683	La Cerca	10°06'11"	65°12'49"	ARIMA(1,0,0)x(0,1,1)12	0.2

4.1.1.2 Eventos de lluvia aislados observados.

A continuación se a modo de ejemplo los Hietogramas de las estacione: Pariaguán, El Carito y Boca de Uchire, resultado de procesar los datos suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) mediante estancaciones meteorológicas a lo largo de la cuenca del Río Unare, en estos se observan la precipitación (milímetros) en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisa se refleja el tiempo (minutos) en intervalos de 5 minutos. En la parte superior se detalla la ubicación, la fecha de la precipitación y la hora del inicio. La información del resto de las estaciones se encuentra en el Apendice L

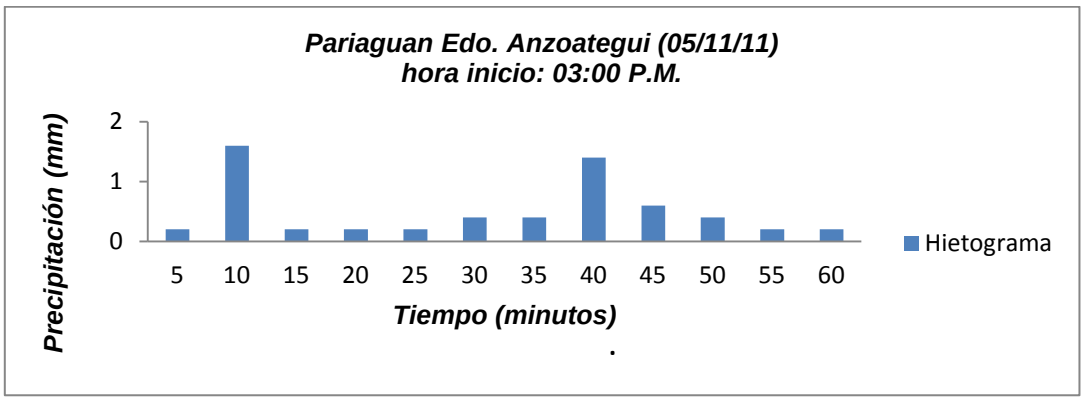


Figura 216. **Hietograma, Pariaguan Edo. Anzoátegui (05/11/11) hora inicio: 03:00 P.M.**

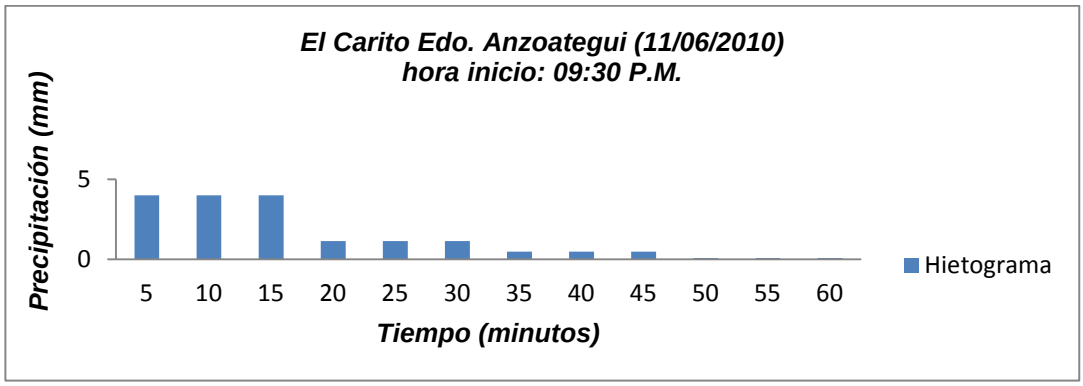


Figura 217. **Hietograma, El Carito Edo. Anzoátegui (11/06/2010) hora inicio: 09:30 P.M.**

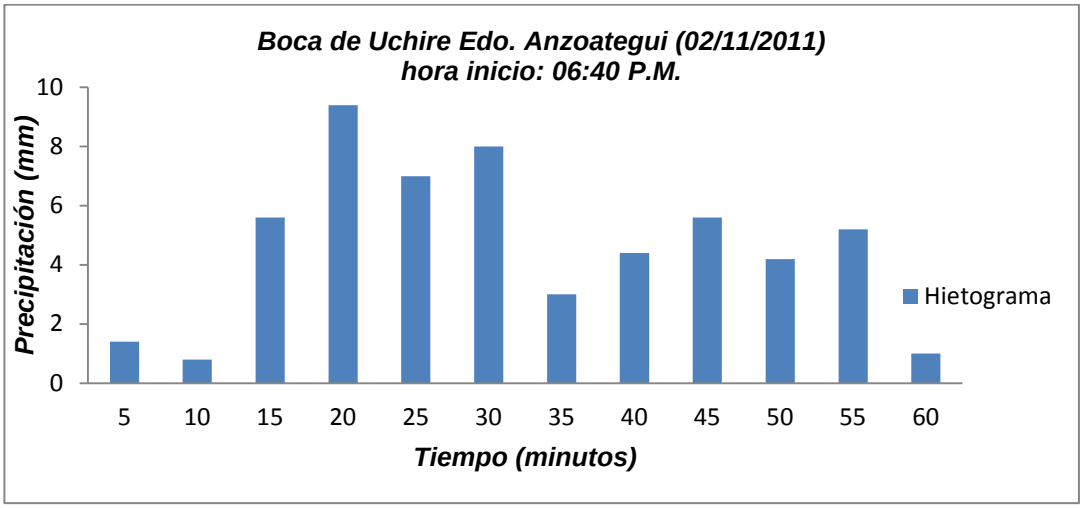


Figura 218. **Hietograma, Boca de Uchire Edo. Anzoátegui (02/11/2011) hora inicio: 06:40 P.M.**

4.1.1.3 Descripción de eventos de lluvia aislados sintéticos

A continuación se muestran los Hietogramas Sintéticos, elaborados para Periodos de retorno de 2, 10, 25, 50 y 100 años, los mismos se realizaron sobre la base de registros pluviográficos de estaciones en la cuenca del Río Unare, Rojas(2012) encontró los modelos con los cuales se

realizaron dichos hidrogramas para lluvias de duraciones de una hora (1), dos (2) horas y 3 horas, en estos se observan la precipitación (milímetros) en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisa se refleja el tiempo (minutos) en intervalos de 5 minutos. En la parte superior se detalla el periodo de retorno en años y la ubicación.

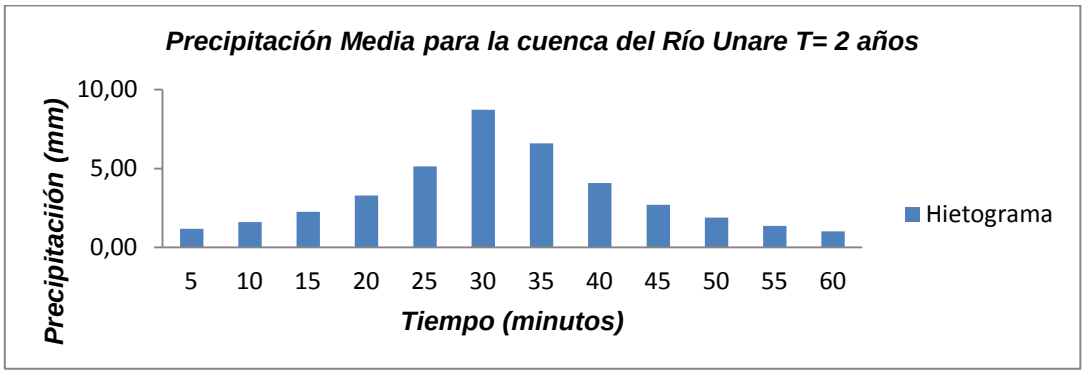


Figura 219. **Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 2 años duración una hora.**

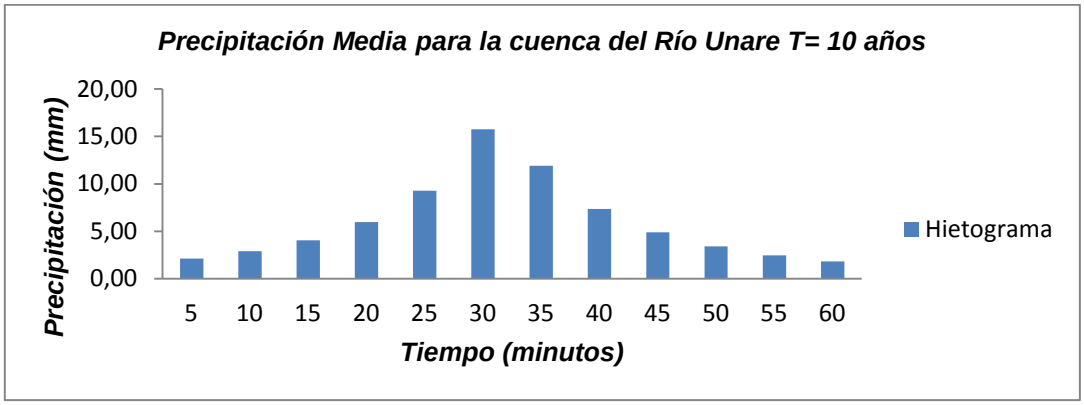


Figura 220. **Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 10 años duración una hora.**

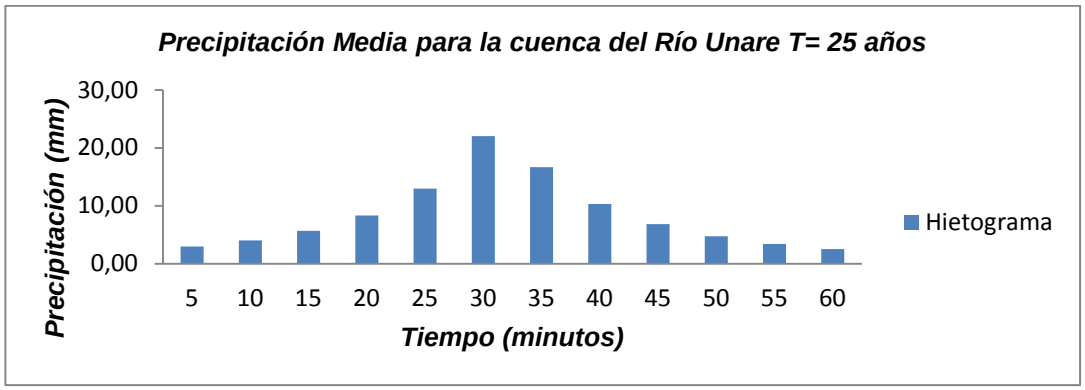


Figura 221. **Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 25 años duración una hora.**

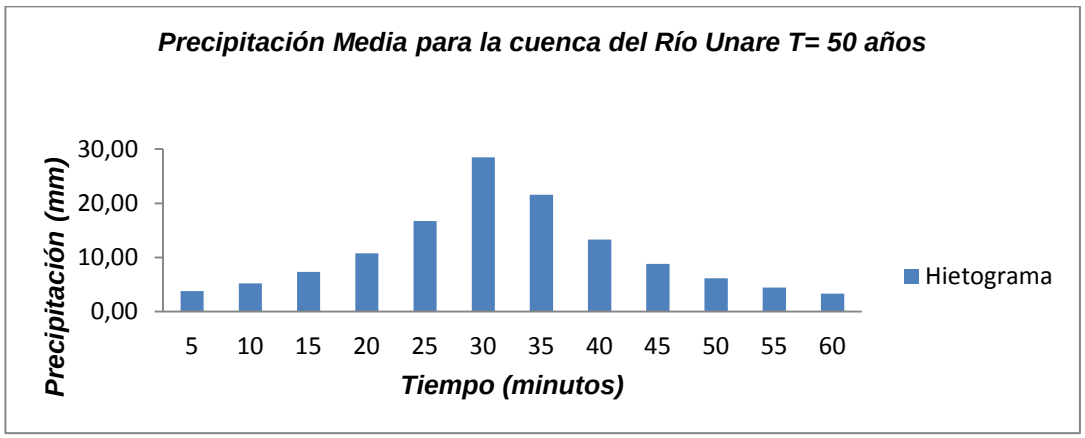


Figura 222. **Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 50 años duración una hora.**

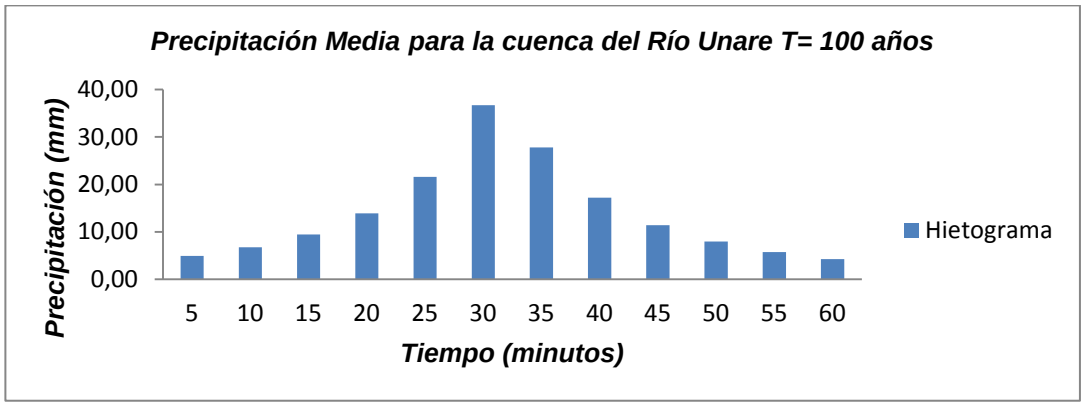


Figura 223. **Hietograma Sintético cuenca del Río Unare periodo de retorno 100 años duración una hora.**

4.1.2 Escorrentía

Las características de la escorrentía se describen mediante los siguientes resultados:

4.1.2.1 Descripción de hidrogramas observados

A continuación se muestran los Hidrogramas resultado de procesar los datos suministrados por el Centro de Investigaciones Hidrológicas Y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) mediante 2 estancaciones ubicadas una en Clarines estado Anzoátegui y La Otra en Zaraza estado Guárico, en dichas figuras se observan el caudal (m3/s) en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisa se refleja el tiempo (Días). En la parte superior se detalla la ubicación, y la parte inferior el mes. En el apéndice M se muestran el resto de los hidrogramas de las estaciones en estudio.

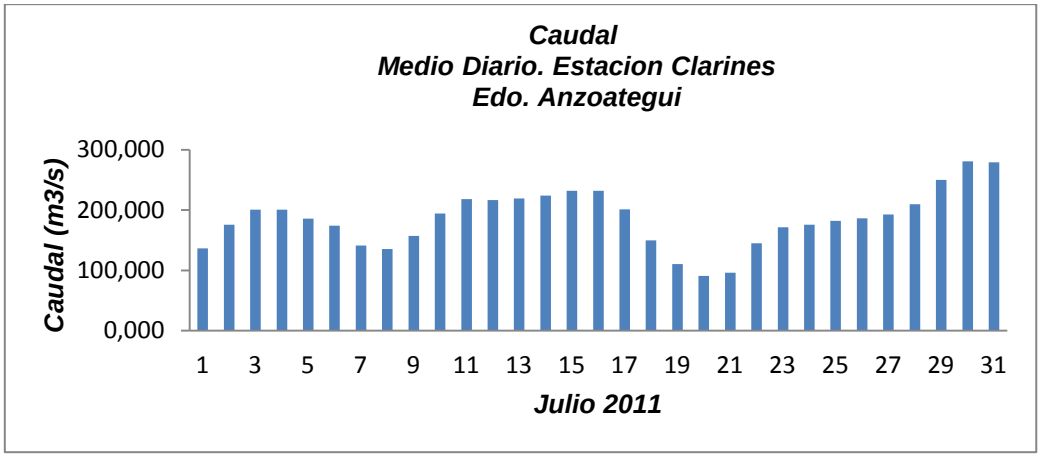


Figura 224. **Hidrograma. Estación Clarines Edo. Anzoátegui, Julio 2011**

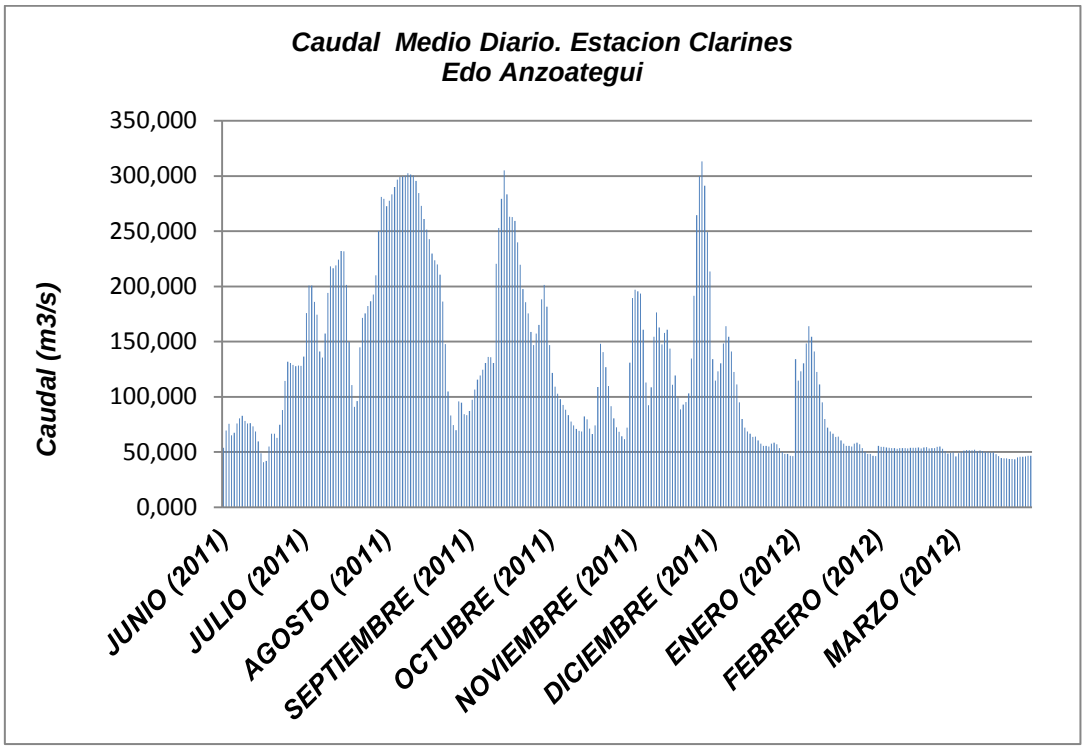


Figura 225. **Hidrograma. Estación Clarines Edo. Anzoátegui, Junio- Marzo 2012**

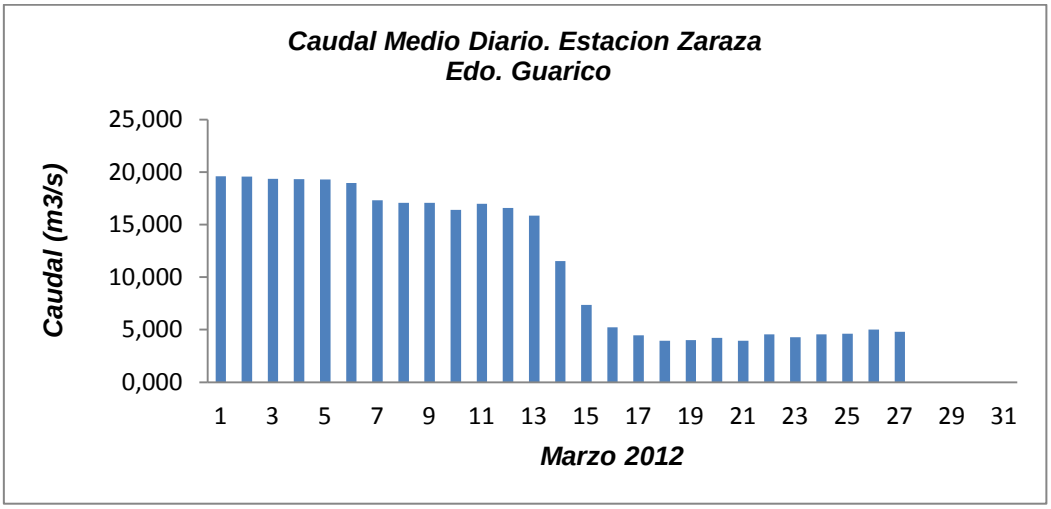


Figura 226. **Hidrograma. Estación Zaraza Edo. Guárico, Marzo 2012**

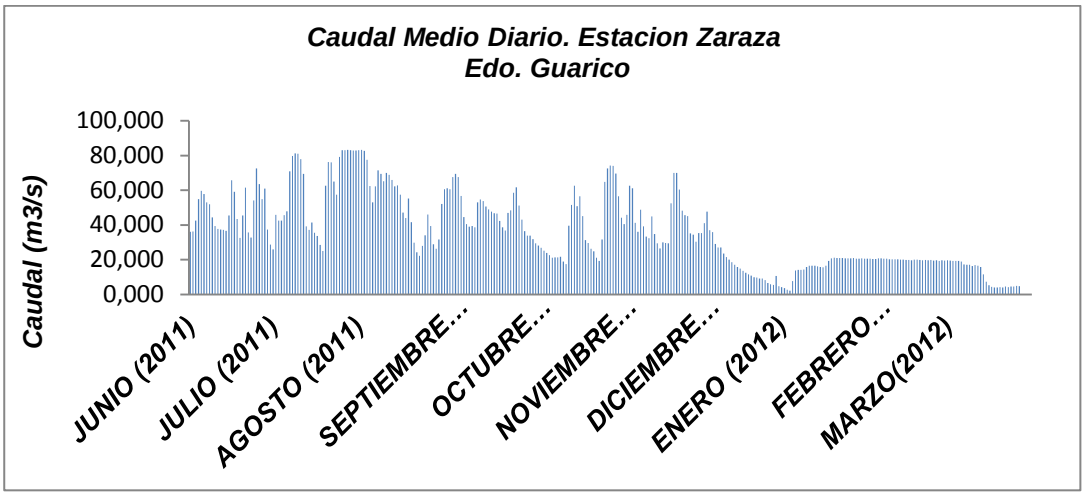


Figura 227: **Hidrograma. Estación Zaraza Edo. Guárico, Junio- Marzo 2012**

4.2 CALIBRAR MODELOS DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA ADAPTADOS A LA CUENCA DEL RIO UNARE

El proceso de calibración considera las siguientes variables: una variable de entrada representada por la lluvia, una variable de salida, representada por un hidrograma de creciente observado en la cuenca, la selección de una subcuenca de variables de lluvia-escorrentía conocidas y una serie de modelos de lluvia escorrentía basados en procesos físicos que se describen en esta sección.

4.2.1 Variable de entrada

La variable de entrada la representa el pluviograma de una lluvia total de 4.44mm, de una hora de duración, ocurrida el 15 de Octubre del 2011 de 3:00pm a 4:00pm, en la estación Zaraza del Edo. Guárico. (Ver Figura 228)

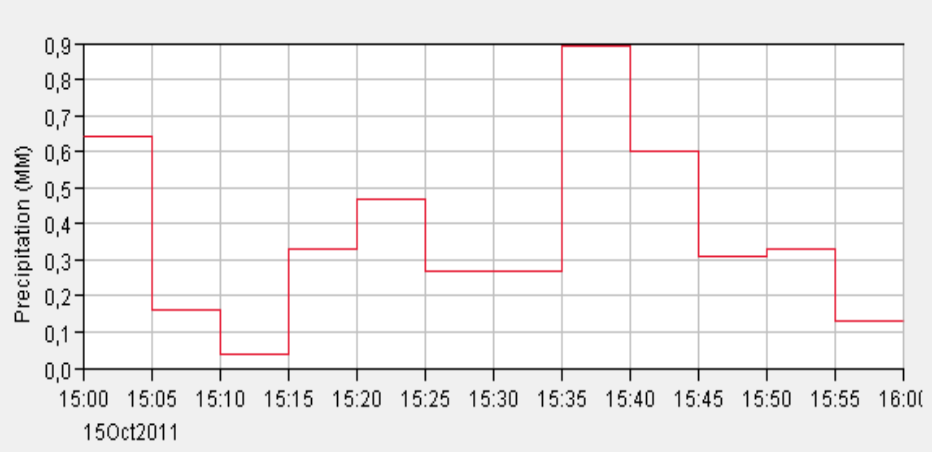


Figura 228. **Lluvia total de 4.44 mm de 1h de duración en la Subcuenca del río Ipire Edo. Anzoategui**

4.2.2 Variable de salida

La variable de salida esta representada por el hidrograma de creciente observado en la cuenca del río Ipire, desde el dia 15 al 24 de Octubre del año 2011. (Ver Figura 229)

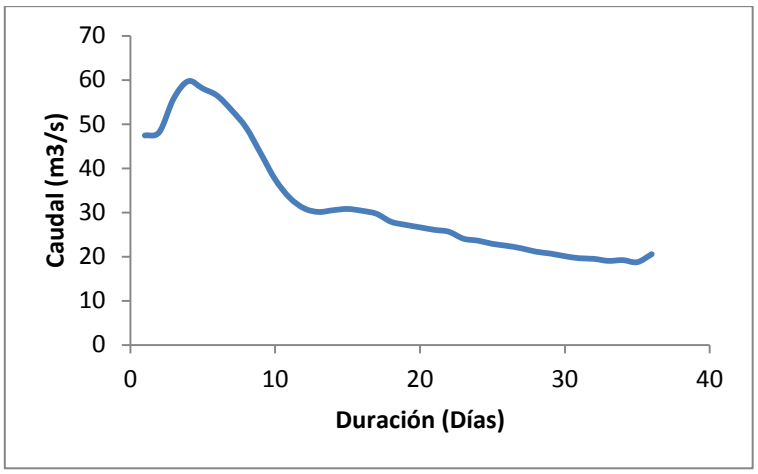


Figura 229. **Hidrograma de creciente observado en la cuenca del río Ipire.**

4.3 CUENCA SELECCIONADA

Para efectos de la calibración se selecciona la cuenca del río Ipire, por poseer datos de las variables de entrada como son la lluvia y datos de las variables de salida que es el caudal observado. Esta cuenca se divide en Subcuencas nombradas en sentido ascendente desde la salida hasta las cabeceras, de la siguiente manera: W4120, W4130, W4140, W4150, W4160, W4170, W4180, W4190, W4200. Y sus ríos: R4030, R4040, R4050, R4080, R4070, R4060, R4100, R4110, R4090, respectivamente. Así la cuenca W4120 y el río R4030 son los que se posicionan justamente en la descarga de la cuenca. (Ver Figura 230)

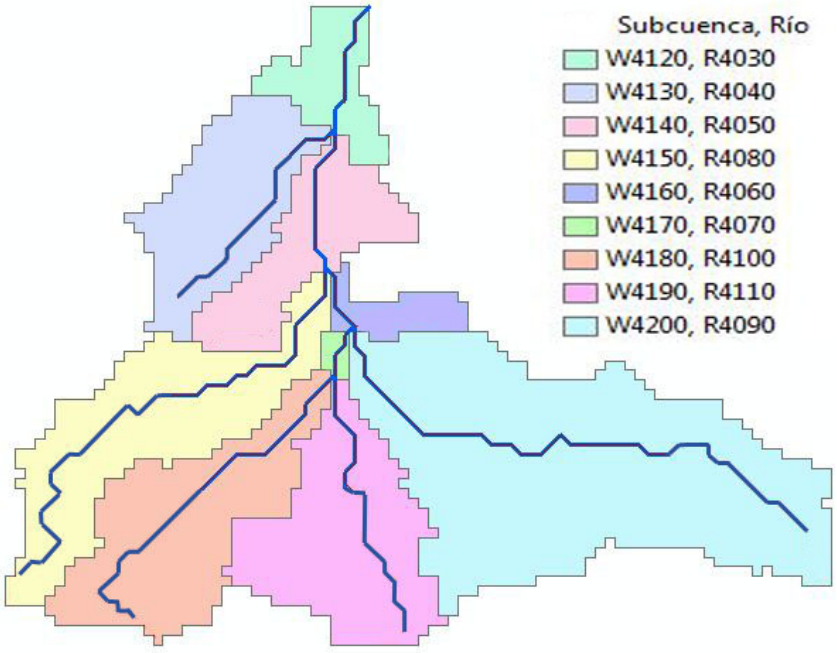


Figura 230. **Mapa de Subdivisión de la Cuenca del río Ipire.**

Los resultados de la calibración de modelos lluvia-escorrentía incluyen tres modelos basados en procesos hidrológicos:

4.3.1 Modelo Basado en Procesos Físicos 1 (MBPF1)

Este modelo incluye los siguientes componentes:

- ***Modelo de Pérdidas:*** Servicio de Conservación de Suelos
- ***Modelo de Transformación Lluvia-Escorrentía:*** Servicio de Conservación de Suelos
- ***Modelo de Tránsito:*** Muskingum
- ***Modelo de Recesión de Flujo:*** Caudal Constante Mensual

En la tabla 7 Se observa los parámetros y resultados del modelo ***MBPF1*** donde se observa los siguientes valores:

Para la Subcuenca W4120 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 14.34 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones

se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4130 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 87.85mm, número de curva (CN) igual a 66.55 y una impermeabilidad de 30.28%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 45.34 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4040 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 11.16 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4140 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 91.99mm, número de curva (CN) igual a 62.74 y una impermeabilidad de 33.59%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 43.56 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4050 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.58 horas, después de

sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4150 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 93.87mm, número de curva (CN) igual a 60.84 y una impermeabilidad de 35.09%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 89.02 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4080 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 37.66 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4160 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 99.58mm, número de curva (CN) igual a 55.92 y una impermeabilidad de 39.67%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 41.85 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4060 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 6.27 horas, después de

sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4170 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 100mm, número de curva (CN) igual a 55.53 y una impermeabilidad de 40.00%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 14.70 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4070 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 4.88 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4180 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 99.83mm, número de curva (CN) igual a 55.61 y una impermeabilidad de 39.87%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 61.47 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4100 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 4.57 horas, después de

sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4190 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 99.83mm, número de curva (CN) igual a 55.61 y una impermeabilidad de 39.87%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 61.47 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4110 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 4.57 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4200 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 91.51mm, número de curva (CN) igual a 66.57 y una impermeabilidad de 28.90%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía, se obtiene un Tiempo de Retardo (T_R) de 69.89 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4110 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 11.19 horas, después

de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Tabla 7. Parámetros para aplicación del MBPF1

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación	Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	$T_{Retardo}$ (h)	Q_{base} (m^3/s)	Río	K (h)	X
W4120	20.00	78.24	24.14	14.34	3.00	R4030	3.23	0.50
W4130	87.85	66.55	30.28	45.34	3.00	R4040	11.16	0.50
W4140	91.99	62.74	33.59	43.56	3.00	R4050	3.58	0.50
W4150	93.87	60.84	35.09	89.02	3.00	R4080	37.66	0.50
W4160	99.58	55.92	39.67	41.85	3.00	R4060	6.27	0.50
W4170	100.00	55.53	40.00	14.70	3.00	R4070	4.88	0.50
W4180	99.83	55.61	39.87	61.47	3.00	R4100	4.57	0.50
W4190	100.00	55.53	40.05	57.09	3.00	R4110	29.23	0.50
W4200	91.51	66.57	28.90	69.89	3.00	R4090	11.19	0.50

La Figura 231. representa para la salida de la cuenca del río Ipire, el caudal observado (línea negra con puntos), con un pico en la descarga $Q_{PicoObs}$= 59.70m^3/s y un caudal total observado $Q_{TotalObs}$= 24140.16x10^3 m^3, superando el caudal calculado (línea azul continua) el cual es el resultado de combinar el caudal generado por la cuenca (línea azul punteada) y por la escorrentía del río (línea azul segmentada), que tiene un caudal pico $Q_{PicoCalc}$= 43.5m^3/s y una descarga total de $Q_{TotalCalc}$.= 24647.9x10^3m^3

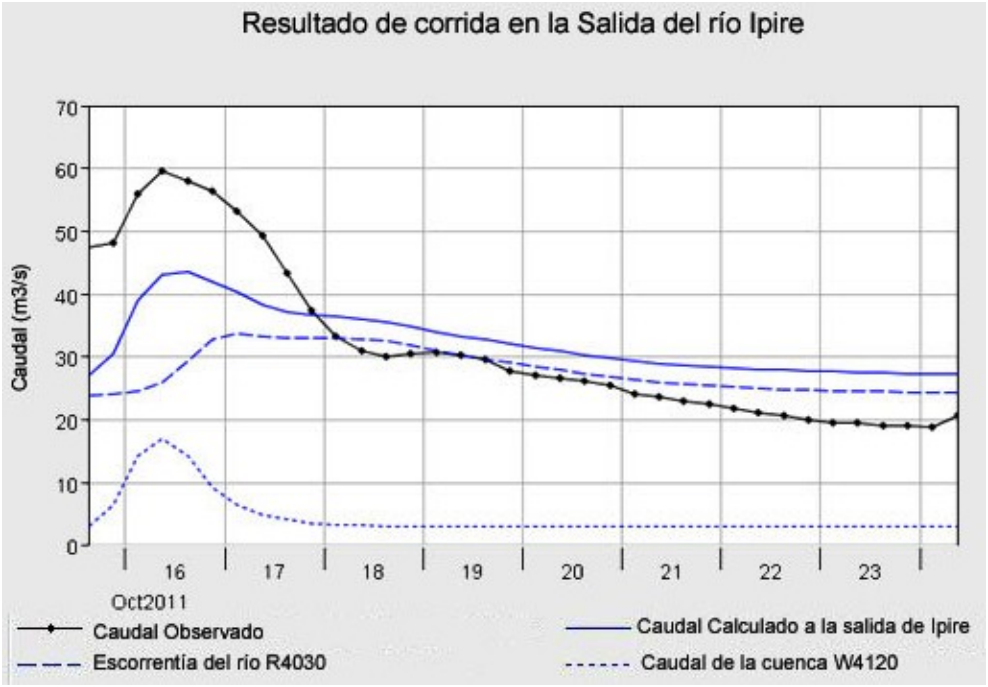


Figura 231. **Resultados de la calibración del modelo MBPF1. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire, con el modelo de Servicio de Conservación de Suelos (SCS)**

4.3.2 Modelo Basado en Procesos Físicos 2 (MBPF2)

Este modelo incluye los siguientes componentes:

- ***Modelo de Pérdidas:*** Servicio de Conservación de Suelos
- ***Modelo de Transformación Lluvia-Escorrentía:*** Modelo de Hidrograma Unitario de Clark
- ***Modelo de Tránsito:*** Muskingum

En la tabla 8 Se observa los parámetros y resultados del modelo ***MBPF2*** donde se observa los siguientes valores:

Para la Subcuenca W4120 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 7.37 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 4.42 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4130 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 15.48 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 9.29 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual

a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4140 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 11.97 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 7.18 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4150 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 19.20 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 11.52 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas

dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4160 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 6.37 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 3.82 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4170 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 2.74 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 1.64 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma

27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4180 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 15.60 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 9.36 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4190 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se

obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 15.59 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 9.36 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4200 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Clark, se obtiene un Tiempo de Concentración (T_C) igual a 28.23 horas y un Coeficiente de Almacenamiento (R) de 16.94 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Tabla 8. Parámetros para aplicación del MBPF2

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación		Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	T_C (h)	R(h)	Q_{base} (m^3/s)	Río	K (h)	X
W4120	20.00	78.24	24.14	7.37	4.42	3.00	R4030	3.23	0.50
W4130	87.85	66.55	30.28	15.48	9.29	3.00	R4040	11.16	0.50
W4140	91.99	62.74	33.59	11.97	7.18	3.00	R4050	3.58	0.50
W4150	93.87	60.84	35.09	19.20	11.52	3.00	R4080	37.66	0.50
W4160	99.58	55.92	39.67	6.37	3.82	3.00	R4060	6.27	0.50
W4170	100.00	55.53	40.00	2.74	1.64	3.00	R4070	4.88	0.50
W4180	99.83	55.61	39.87	15.60	9.36	3.00	R4100	4.57	0.50
W4190	100.00	55.53	40.05	15.59	9.36	3.00	R4110	29.23	0.50
W4200	91.51	66.57	28.90	28.23	16.94	3.00	R4090	11.19	0.50

La Figura 232 representa para la salida de la cuenca del río Ipire, el caudal observado (línea negra con puntos), el cual tiene un pico en la descarga Observado ($Q_{PicoObs}$) de 59.70m^3/s y un Volúmen de descarga ($Q_{TotalObs}$) de 24140.16x10^3 m^3. La combinación del caudal generado por la cuenca (línea azul punteada) y la escorrentía del río (línea azul segmentada) da como resultado el caudal calculado por HEC-HMS (línea azul continua), el cual posee un caudal pico ($Q_{PicoCalc}$) de 64.3m^3/s y un volumen de descarga ($Q_{TotalCalc}$) de 24980.8x10^3 m^3.

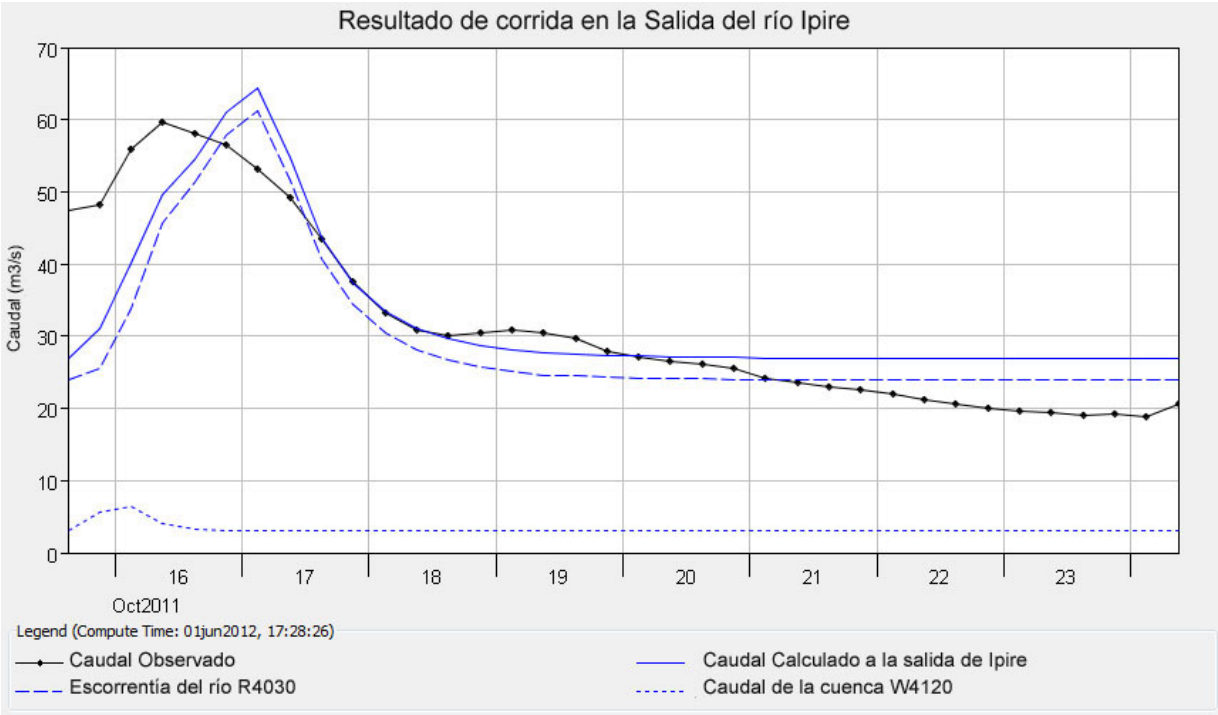


Figura 232. **Resultados de la calibración del modelo MBPF2. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire.**

4.3.3 Modelo Basado en Procesos Físicos 3 (MBPF3)

Este modelo incluye los siguientes componentes:

- ***Modelo de Pérdidas:*** Servicio de Conservación de Suelos
- ***Modelo de Transformación Lluvia-Escorrentía:*** Modelo de Hidrograma Unitario de Snyder
- ***Modelo de Tránsito:*** Muskingum

En la tabla 9 Se observa los parámetros y resultados del modelo ***MBPF3*** donde se observa los siguientes valores:

Para la Subcuenca W4120 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 7.60 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4130 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 10 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s

para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4140 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 33.50 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4150 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 12 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como

caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4160 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 7.10 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4170 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se

obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 19.70 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4180 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 15.30 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4190 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y

una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 22.30 horas y un Coeficiente al Pico de 0.80 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Para la Subcuenca W4200 el modelo de pérdidas esta dado por un valor de abstracción inicial de 20mm, número de curva (CN) igual a 78.24 y una impermeabilidad de 24.14%. En cuanto al modelo de transformación de lluvia a escorrentía calculado mediante el Hidrograma Unitario de Snyder, se obtiene un Tiempo de Retardo ($T_{Retardo}$) igual a 13.90 horas y un Coeficiente al Pico de 0.64 horas. El modelo de Recesión de Flujo toma 27mm como caudal base uniforme para toda la cuenca de Ipire, dicho número se repartió equitativamente entre las nueve subcuencas dando como resultado 3 m^3/s para cada una. El tránsito de crecientes para el río R4030 según Muskingum da como resultado un Tiempo de Retardo (K) igual a 3.23 horas, después de sucesivas iteraciones se escogió el valor de 0.5 para la constante X con el propósito de lograr un mejor ajuste.

Tabla 9. Parámetros para aplicación del MBPF3

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación		Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	$T_{Retardo}$ (h)	Coeficiente al Pico (h)	Q_{base} (m^3/s)	Río	K (Horas)	X
W4120	20.00	78.24	24.14	7.60	0.80	3.00	R4030	3.23	0.50
W4130	87.85	66.55	30.28	10.00	0.80	3.00	R4040	11.16	0.50
W4140	91.99	62.74	33.59	33.50	0.80	3.00	R4050	3.58	0.50
W4150	93.87	60.84	35.09	12.00	0.80	3.00	R4080	37.66	0.50
W4160	99.58	55.92	39.67	7.10	0.80	3.00	R4060	6.27	0.50
W4170	100.00	55.53	40.00	19.70	0.80	3.00	R4070	4.88	0.50
W4180	99.83	55.61	39.87	15.30	0.80	3.00	R4100	4.57	0.50
W4190	100.00	55.53	40.05	22.30	0.80	3.00	R4110	29.23	0.50
W4200	91.51	66.57	28.90	13.90	0.64	3.00	R4090	11.19	0.50

La Figura 233 representa para la salida de la cuenca del río Ipire, el caudal observado (línea negra con puntos), el cual tiene un pico en la descarga Observado ($Q_{PicoObs}$) de $59.70 m^3/s$ y un Volúmen de descarga ($Q_{TotalObs}$) de $24140.16x10^3$ m^3. La combinación del caudal generado por la cuenca (línea azul punteada) y la escorrentía del río (línea azul segmentada) da como resultado el caudal calculado por HEC-HMS (línea azul continua), el cual posee un caudal pico ($Q_{PicoCalc}$) de $63.1 m^3/s$ y un volumen de descarga ($Q_{TotalCalc}$) de $24694.3x10^3$ m^3.

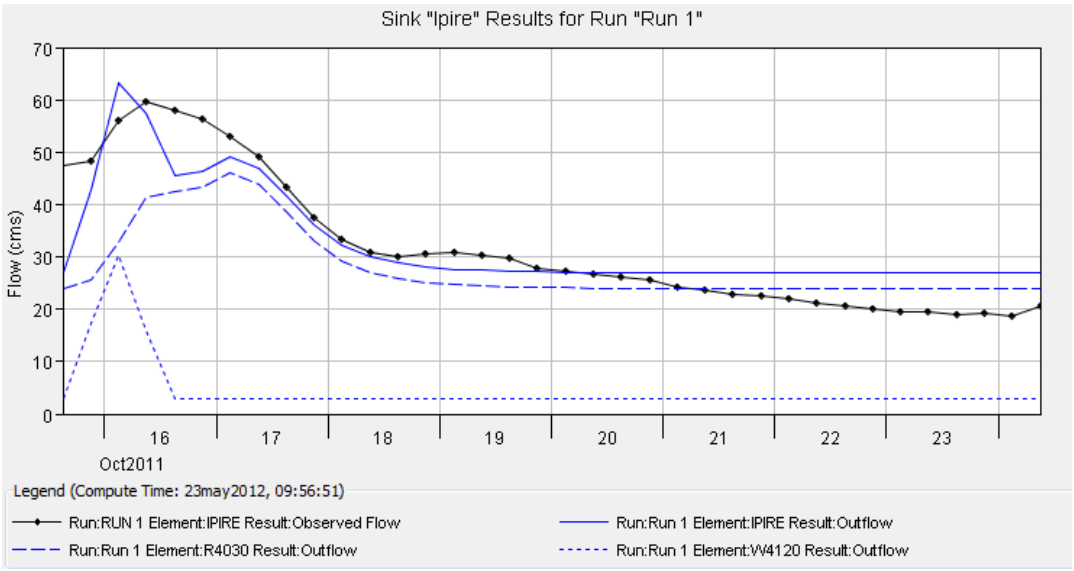


Figura 233. **Resultados de la calibración del modelo MBPF3. Valores observados Vs. Estimado, a la salida de la cuenca Ipire.**

En la Tabla 10 se presenta un resumen donde se muestra el resultado de las corridas de cada modelo de estudio, se tiene que el Caudal máximo de salida Observado es de 59.7 m3/s y el proceso lluvia-escorrentía basado en el modelo de Servicio de Conservación de Suelos (SCS) calcula un caudal máximo a la salida de 43.5 m3/s, dando un error promedio de 7.76 m3/s, en cuanto a los volúmenes totales a la salida, el volumen en campo tiene un valor de 24140.16x103 m3 y el calculado con el modelo SCS es de 24647.9x103 m3 dando como resultado a una diferencia entre volúmenes de descarga observado y calculado de 507.7m3.

Para el proceso lluvia-escorrentía basado en el modelo de Hidrograma de Clark se calcula un caudal máximo a la salida de 64.3m3/s, dando un error promedio de 5.19 m3/s, en cuanto a los volúmenes totales a la salida, el volumen en campo tiene un valor de 24140.16 x103 m3 y el calculado con el modelo de Clark es de 24980.8x103 m3 dando como resultado a una diferencia entre volúmenes de descarga de 840.7m3.

Para el proceso lluvia-escorrentía basado en el modelo de Hidrograma de Snyder calcula un caudal máximo a la salida de 63.1m3/s, dando un error promedio de 4.73 m3/s, en cuanto a los volúmenes totales a la salida, el volumen en campo tiene un valor de 24140.16 x103 m3 y el calculado con el modelo de Snyder es de 24694.3x103 m3 dando como resultado a una diferencia entre volúmenes de descarga de 554.2 m3.

Tabla 10. Resultado de Caudal Máximo y Volumen de los Modelos lluvia-escorrentía.

Modelo	Caudal Máximo			Volumen		
	Q_{obs} (m^3/s)	Q_{calc} (m^3/s)	Error Ajuste (m^3/s)	$Vol_{Obs}x10^3$ (m^3)	V_{Calc} $x10^3$ (m^3)	Error Ajustex10^3 (m^3)
SCS	59.7	43.5	7.76	24140.16	24647.9	507.7
Clark	59.7	64.3	5.19	24140.16	24980.8	840.7
Snyder	59.7	63.1	4.73	24140.16	24694.3	554.2

La Figura 234 muestra la tendencia de Caudal Observado y el Caudal Estimado para el modelo de Servicio de Conservación de suelos SCS, la línea de tendencia tiene una pendiente de 2.2017 y el Coeficiente de Determinación (R^2) tiene un valor de 0.7136

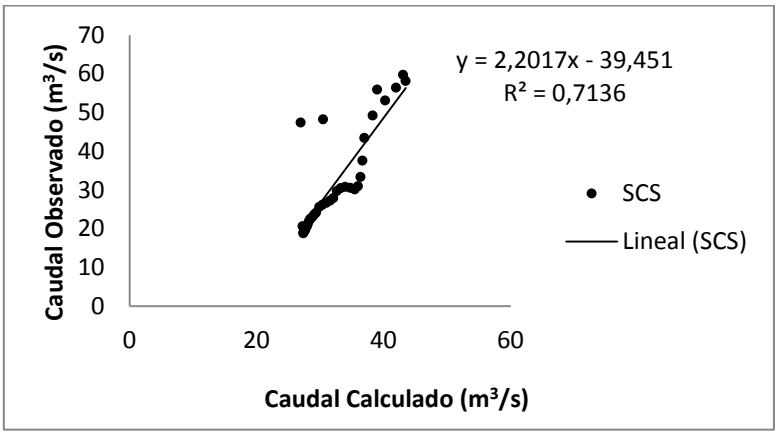


Figura 234. **Ajuste de modelo de SCS a los caudales observados en la etapa de calibración.**

La Figura 235 muestra la tendencia de Caudal Observado y el Caudal Estimado para el modelo de Hidrograma Unitario de Clark, la línea de tendencia tiene una pendiente de 1.0182 y el Coeficiente de Determinación (R^2) tiene un valor de 0.6972.

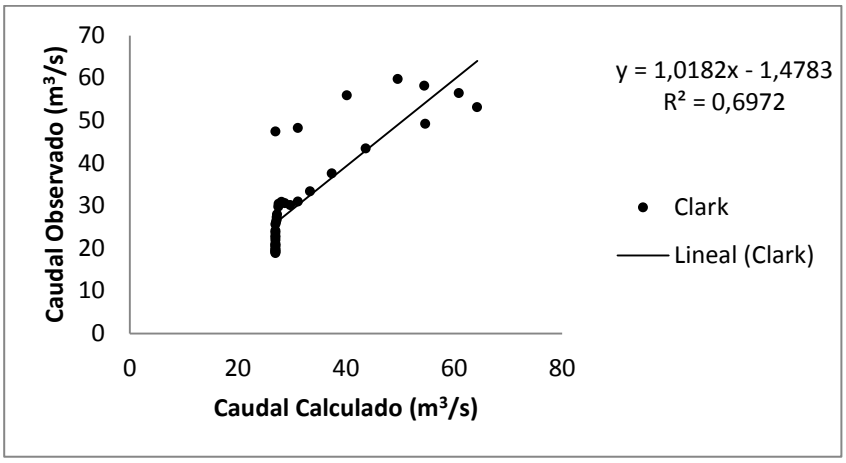


***Figura 235*. Ajuste de modelo de Clark a los caudales observados en la etapa de calibración.**

La Figura 430 muestra la tendencia de Caudal Observado y el Caudal Estimado para el modelo de Hidrograma Unitario de Snyder, la línea de tendencia tiene una pendiente de 1.1878 y el Coeficiente de Determinación (R^2) tiene un valor de 0.7888.

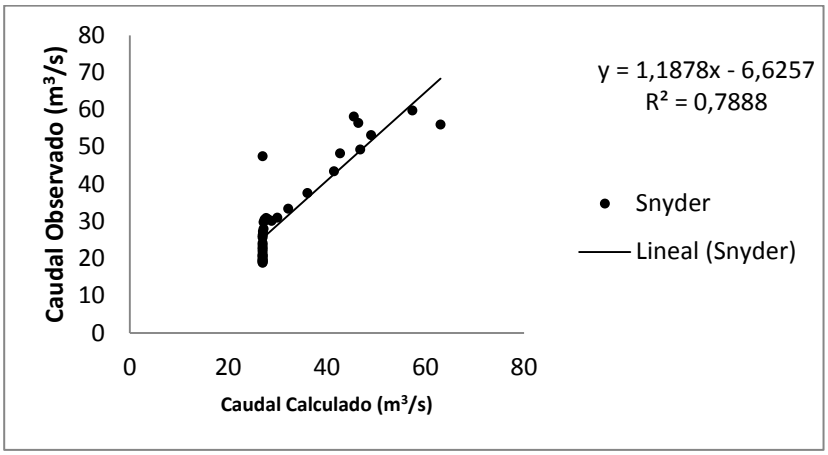


***Figura 236*. Ajuste de modelo de Snyder a los caudales observados en la etapa de calibración.**

Para efectos de la calibración se escoge el modelo de Hidrograma Unitario de Snyder por ser el que posee valores de Caudales Calculados más aproximados a los Caudales Observados en campo debido a que su Coeficiente de Determinación es el más cercano a la unidad dando un mejor ajuste de Caudal Pico para la salida de la cuenca. Sin embargo los otros modelos también arrojan resultados satisfactorios pues sus valores de R^2 son mayores a 0.70. Según Guevara 2004.

4.4 SIMULAR EL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL RÍO UNARE

Para la simular el proceso de lluvia escorrentía para la cuenca del río Unare, se seleccionaron un grupo de lluvias asociada a Periodos de Retorno T= 2 años, T= 10 años, T= 25 años, T= 50 años y T= 100 años, de probabilidad de excedencia para cada Periodo de Retorno de P= 0.5, P=0.1, P= 0.04, P= 0.02 y P= 0.01 respectivamente.

La serie de Figuras a continuación muestran las lluvias seleccionadas para cada Periodo de Retorno.

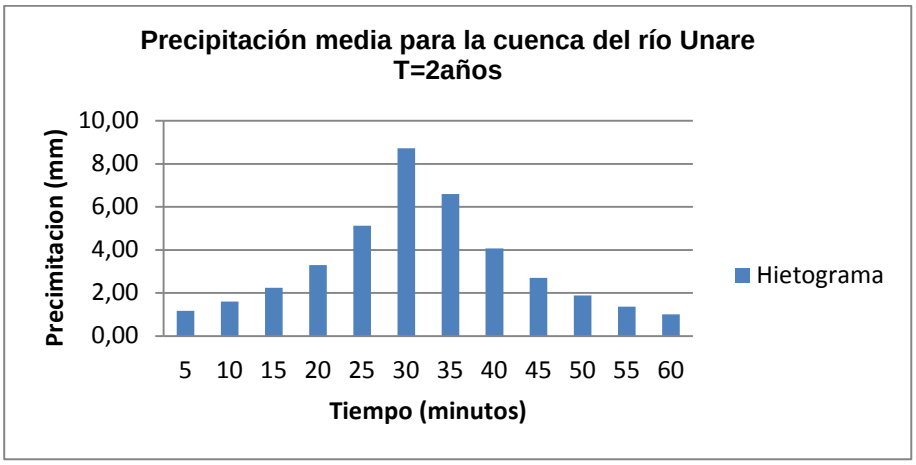


***Figura 237*. Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 2 años**

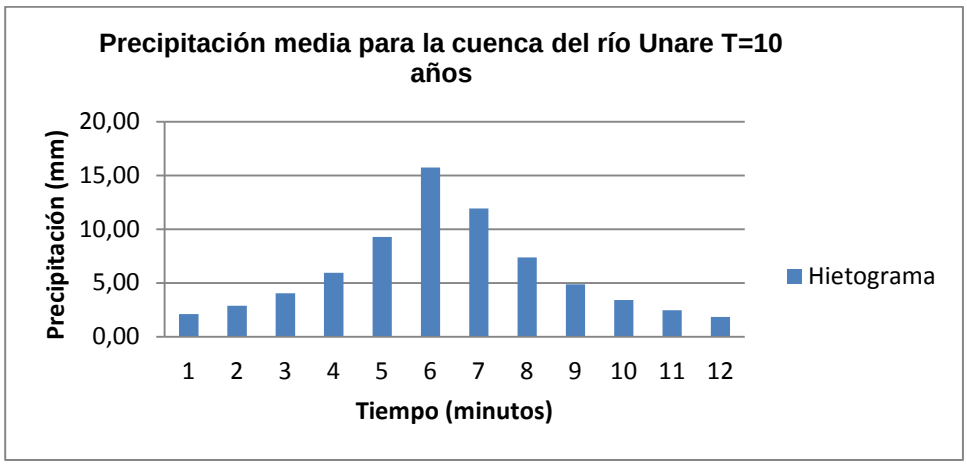


***Figura 238*. Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 10 años**

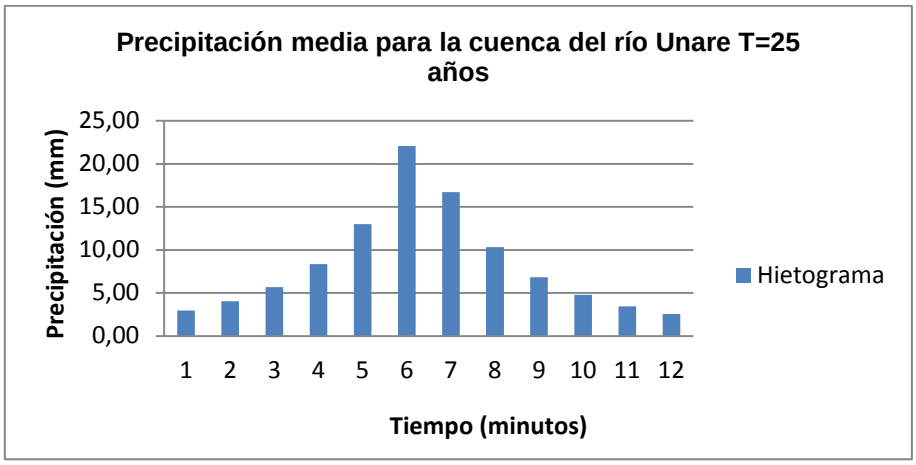


***Figura 239*. Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 25 años**

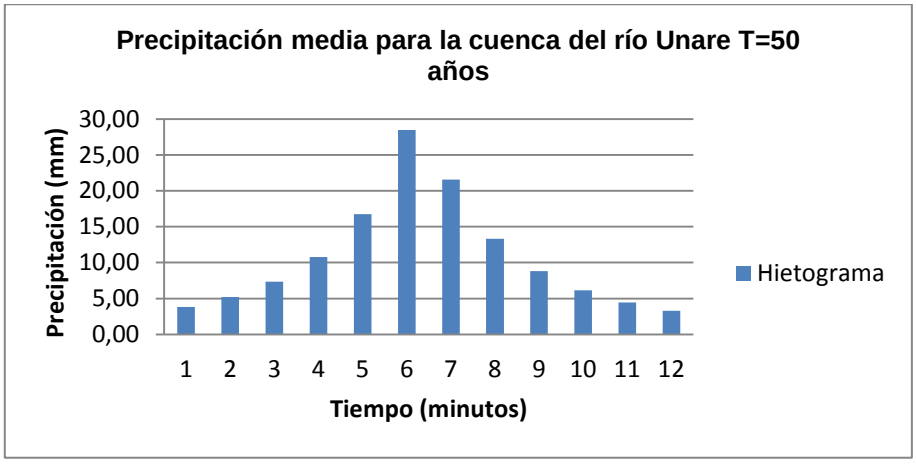


***Figura 240*. Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 50 años**

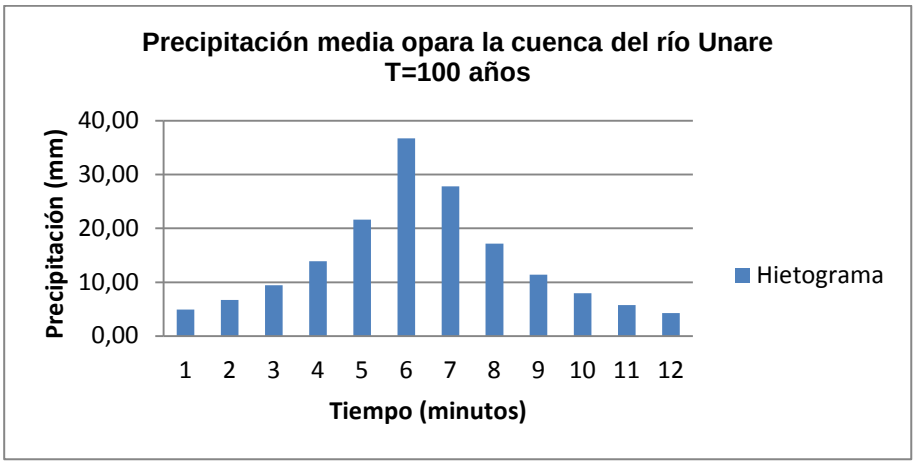


Figura 241. **Precipitación media para la cuenca del río Unare de Periodo de Retorno de 100 años**

4.4.1 Modelo Seleccionado

Para efectos de la simulación se utilizó el modelo escogido en la sección anterior (Hidrograma Unitario de Snyder) para estimación de la escorrentía para los diferentes Periodos de Retorno. Este modelo fue aplicado a la cuenca de los ríos Guanape, Guaribe, Güere, Ipire y Tamanaco. En la Tabla 11 Se presentan los valores de Caudal Pico obtenidos para cada Periodo de Retorno en estudio.

En la cuenca del río Guanape el Caudal Pico es: para 2 años de Periodo de Retorno, 18.5 m^3/s; 10 años de Periodo de retorno, 20.1 m^3/s; 25 años de Periodo de Retorno 20.2 m^3/s; 50 años de Periodo de Retorno, 20.6 m^3/s y para 100 años de Periodo de Retorno es de 21 m^3/s.

En la cuenca del río Guaribe el Caudal Pico es: para 2 años de Periodo de Retorno, 30.6 m^3/s; 10 años de Periodo de retorno, 31 m^3/s; 25 años de Periodo de Retorno 36.2 m^3/s; 50 años de Periodo de Retorno, 38.8 m^3/s y para 100 años de Periodo de Retorno es de 42.1 m^3/s.

En la cuenca del río Güere el Caudal Pico es: para 2 años de Periodo de Retorno, 89 m^3/s; 10 años de Periodo de retorno, 89 m^3/s; 25 años de Periodo de Retorno 89 m^3/s; 50 años de Periodo de Retorno, 89.1 m^3/s y para 100 años de Periodo de Retorno es de 89.3 m^3/s.

En la cuenca del río Ipire el Caudal Pico es: para 2 años de Periodo de Retorno, 28.3 m^3/s; 10 años de Periodo de retorno, 29.7 m^3/s; 25 años de Periodo de Retorno 31.2 m^3/s; 50 años de Periodo de Retorno, 33 m^3/s y para 100 años de Periodo de Retorno es de 34.6 m^3/s.

En la cuenca del río Tamanaco el Caudal Pico es: para 2 años de Periodo de Retorno, 92.3 m^3/s; 10 años de Periodo de retorno, 92.6 m^3/s; 25 años de Periodo de Retorno 92.7 m^3/s; 50 años de Periodo de Retorno, 92.8 m^3/s y para 100 años de Periodo de Retorno es de 92.9 m^3/s.

Tabla 11. Caudal Pico de Las Cuencas de los ríos Guanape, Guaribe, Güere, Ipire y Tamanaco, que Pertenecen a la cuenca del Río Unare.

Cuenca	Caudal pico (m^3/s)				
	T=2años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100años
Guanape	18.5	20.1	20.2	20.6	21
Guaribe	30.6	31	36.2	38.8	42.1
Güere	89	89	89	89.1	89.3
Ipire	28.3	29.7	31.2	33	34.6
Tamanaco	92.3	92.6	92.7	92.8	92.9

4.4.2 Zonificación de planicies Inundables

El caudal pico que se ha indicado en la tabla 9 fue transformado en láminas de escorrentía aplicando la ecuación de balance de energía mediante el programa HEC-RAS y obteniendo la silueta de inundación con el programa HEC-GeoRAS, los resultados de la inundación sobre cada subcuenca del río Unare se indica en las Figuras que se muestran a continuación las cuales poseen el comportamiento topográfico de fondo, el cauce del río y la zona inundable representada con un degrades de colores que indican las profundidades alcanzadas por el río, a mayor profundidad el tono del color es más oscuro.

La figura 242 muestra el mapa de planicie inundable de la cuenca del río Guanape para un Periodo de Retorno de 2 años, se observa que la zona inundable posee profundidades mayores en la medida que se acerque al

cauce del río, mientras que la profundidad disminuye a medida que se acerca a la desembocadura donde llega a alcanzar profundidades máximas de 6cm.

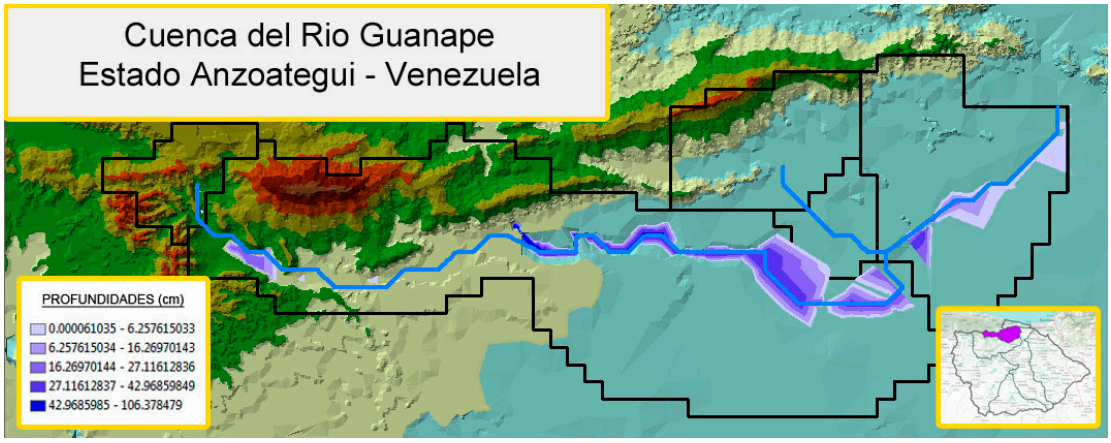


Figura 242. **Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Guanape para T=2años**

La figura 243 muestra el mapa de planicie inundable de la cuenca del río Guaribe para un Periodo de Retorno de 2 años, las zonas donde se observan las tonalidades más oscuras son aquellas que se encuentran en la cabecera, indicando profundidades máximas de 230cm, la tonalidad va disminuyendo a medida que las manchas de inundación son más cercanas a la desembocadura, donde se observan profundidades máximas de 17cm.

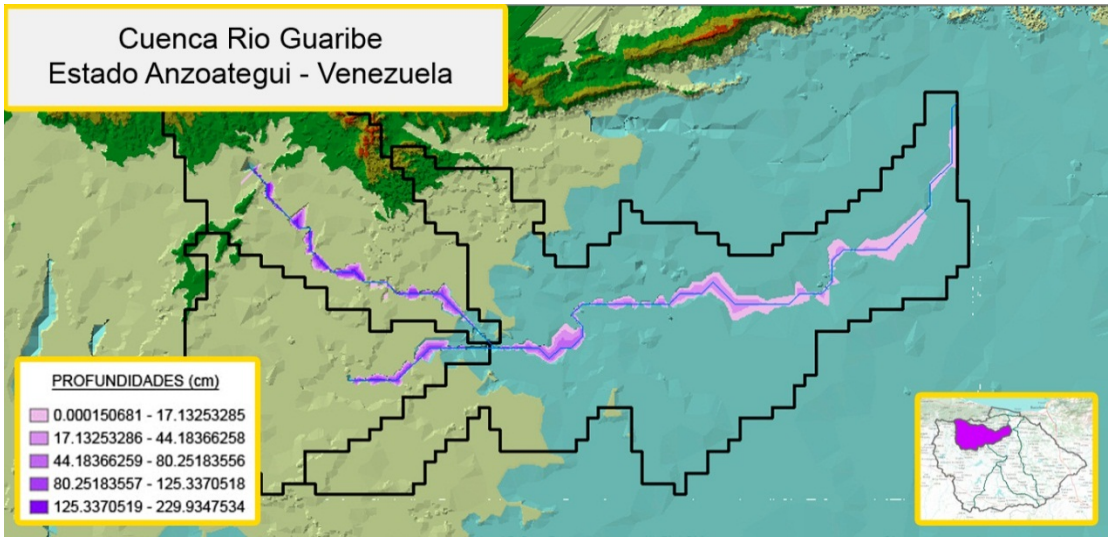


Figura 243. **Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Guaribe para T=2años**

La figura 244 muestra el mapa de planicie inundable de la cuenca del río Güere para un Periodo de Retorno de 2 años, se observa que son pocas las zonas inundadas y que las profundidades máximas que llega a alcanzar es de 25 cm.

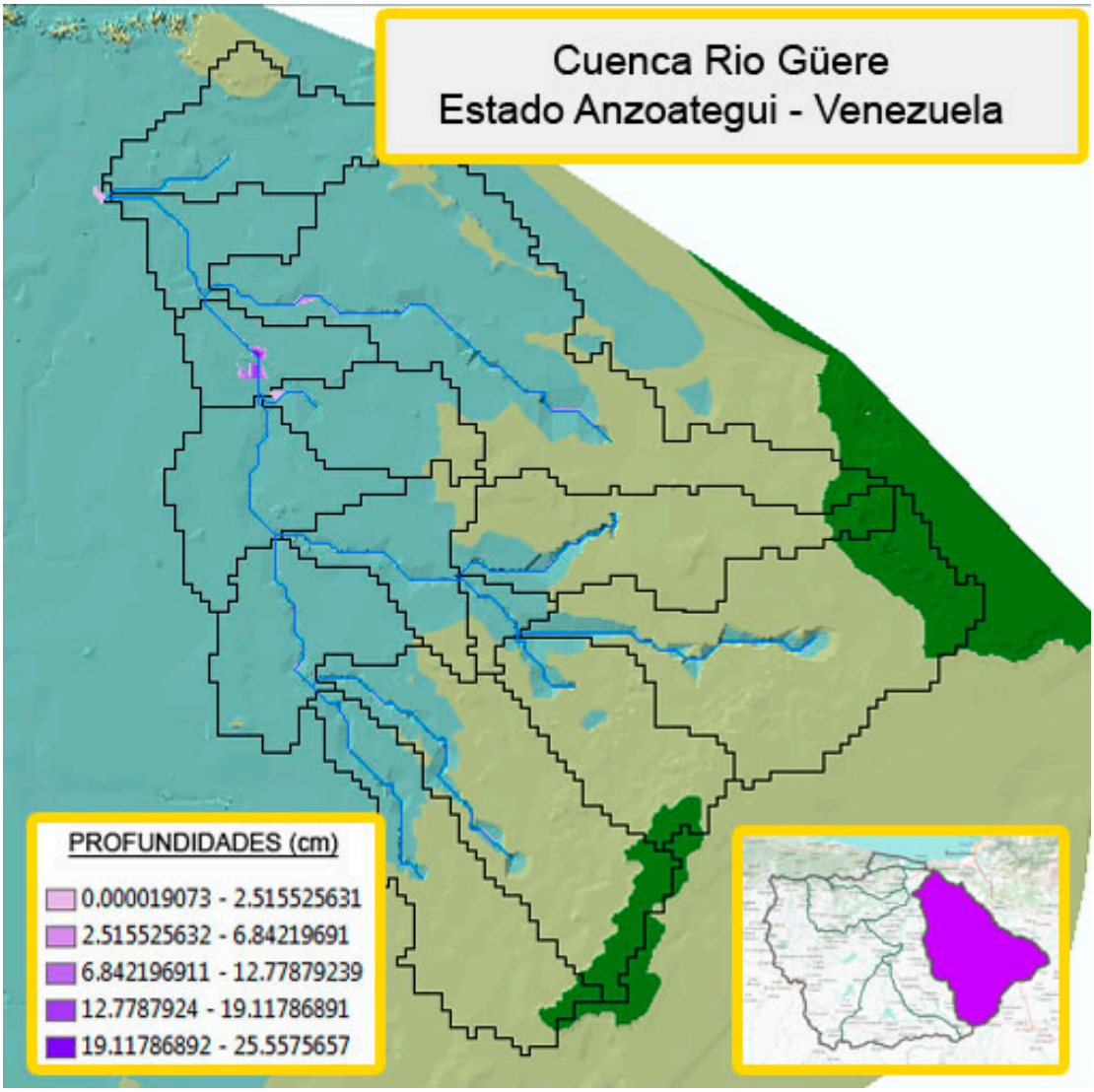


Figura 244. **Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Güere para T=2años**

La figura 245 muestra el mapa de planicie inundable de la cuenca del río Ipire para un Periodo de Retorno de 2 años, se observa que la inundación producida tiende a ser más profunda con valores no mayores a los 50cm. En la cabecera presentando velocidades mayores en donde el río tiende a

socavar, mientras que se acerca a la desembocadura no se observan áreas de inundación.

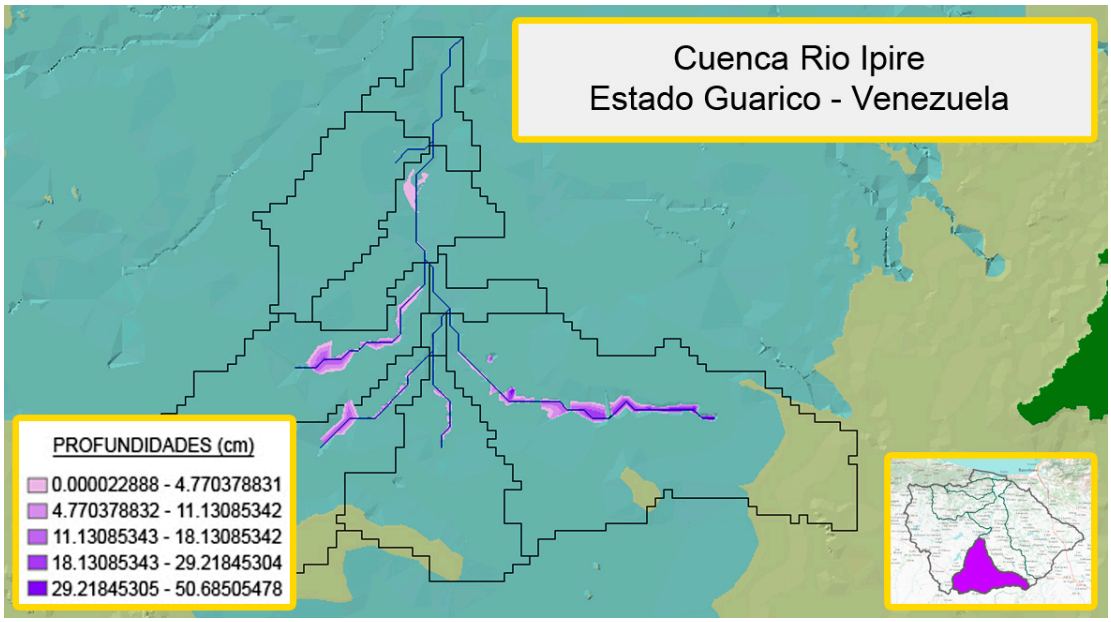


Figura 245. **Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Ipire para T=2años**

La figura 246 muestra el mapa de planicie inundable de la cuenca del río Tamanaco para un Periodo de Retorno de 2 años, este río posee una profundidad máxima de inundación de 121cm en las cabeceras del río en la medida que se acerque al cauce, mientras que esas profundidad disminuye a medida que se acerca a la desembocadura, donde se observan alturas de inundación máximas de 11 cm aproximadamente.

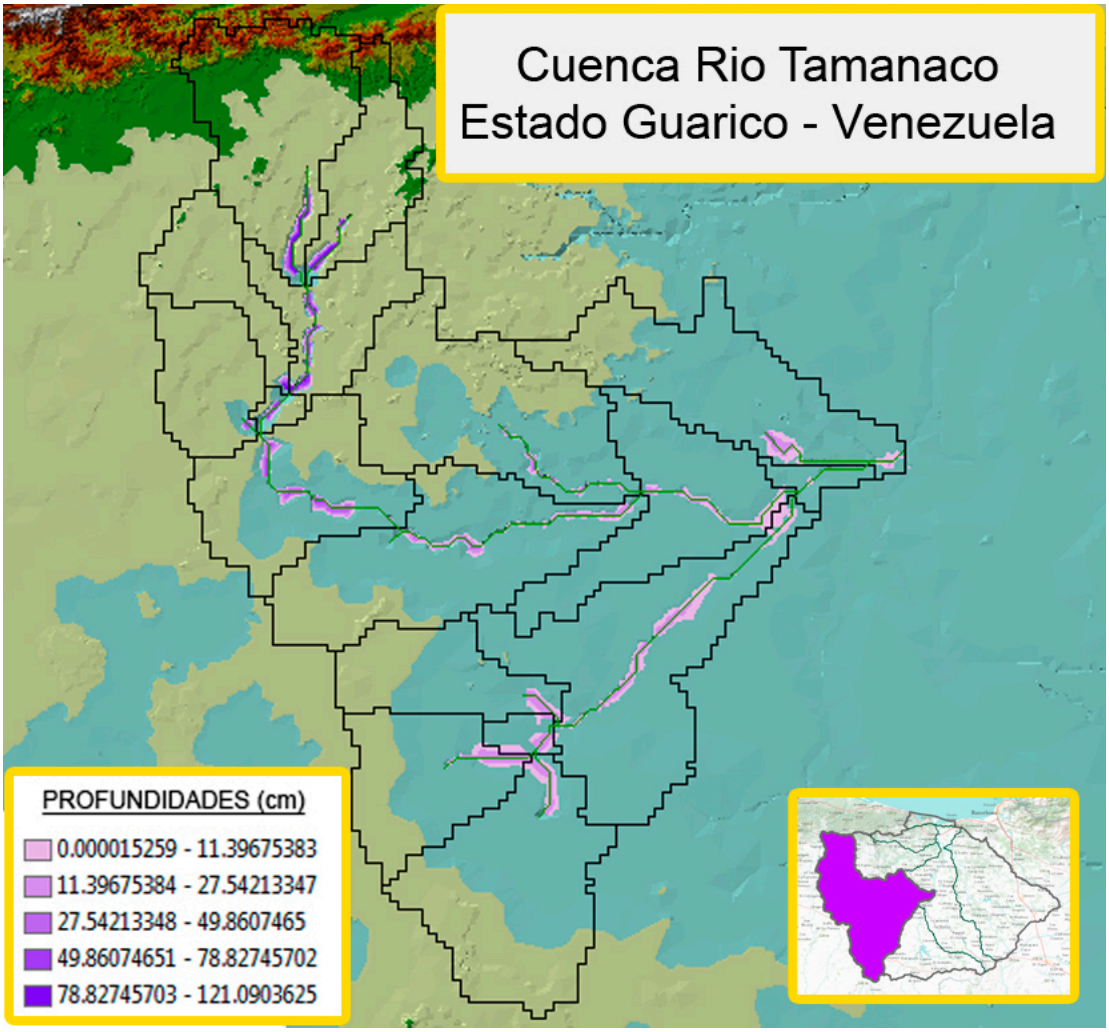


Figura 246. **Mapa de planicies inundables de la Cuenca del río Tamanaco para T=2años**

4.5 COMPARAR MODELOS DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA ADAPTADOS A LA CUENCA DEL RÍO UNARE

Para comparar modelos del proceso lluvia-escorrentía se emplean los modelos de la calibración, en este caso se utiliza lluvias correspondientes a los periodos de Retorno: T= 2 años, T=10 años, T=25 años, T=50 años y T=100 año. En la Tabla 64 se muestran los valores de Caudal pico calculado para cada una de las subcuencas que forman el río Unare.

Se observa que en la Cuenca del río Guanape el modelo de SCS estima caudales pico para la salida de: para T=2años, 10.80 m3/s; para T=10 años, 10.90 m3/s; para T=25 años, 11.00 m3/s; para T=50 años, 11.10m3/s y finalmente para T=100 años, 11.20 m3/s. El modelo de Clark estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 12.30 m3/s; para T=10 años, 13.80 m3/s; para T=25 años, 15.10 m3/s; para T=50 años, 16.40m3/s y finalmente para T=100 años, 18.00 m3/s. El modelo de Snyder estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 18.50 m3/s; para T=10 años, 20.10 m3/s; para T=25 años, 20.20 m3/s; para T=50 años, 20.60m3/s y finalmente para T=100 años, 21.00 m3/s.

Se observa que en la Cuenca del río Guaribe el modelo de SCS estima caudales pico para la salida de: para T=2años, 26.70 m3/s; para T=10 años, 27.80 m3/s; para T=25 años, 27.90 m3/s; para T=50 años, 28.10m3/s y finalmente para T=100 años, 28.20 m3/s. El modelo de Clark estima valores

de caudal pico en la salida de: T=2años, 28.90 m3/s; para T=10 años, 30.40 m3/s; para T=25 años, 31.50 m3/s; para T=50 años, 32.70m3/s y finalmente para T=100 años, 34.20 m3/s. El modelo de Snyder estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 30.70 m3/s; para T=10 años, 31.00 m3/s; para T=25 años, 36.20 m3/s; para T=50 años, 38.80m3/s y finalmente para T=100 años, 42.10 m3/s.

Se observa que en la Cuenca del río Güere el modelo de SCS estima caudales pico para la salida de: para T=2años, 89.10 m3/s; para T=10 años, 89.20 m3/s; para T=25 años, 89.30 m3/s; para T=50 años, 89.40m3/s y finalmente para T=100 años, 89.50 m3/s. El modelo de Clark estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 158.80 m3/s; para T=10 años, 207.6 m3/s; para T=25 años, 255.1 m3/s; para T=50 años, 303.40m3/s y finalmente para T=100 años, 365.60 m3/s. El modelo de Snyder estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 89.30 m3/s; para T=10 años, 89.40 m3/s; para T=25 años, 89.50 m3/s; para T=50 años, 89.70 m3/s y finalmente para T=100 años, 90.00 m3/s.

Se observa que en la Cuenca del río Ipire el modelo de SCS estima caudales pico para la salida de: para T=2años, 43.50 m3/s; para T=10 años, 59.20 m3/s; para T=25 años, 75.50 m3/s; para T=50 años, 94.30 m3/s y finalmente para T=100 años, 121.00 m3/s. El modelo de Clark estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 64.30 m3/s; para T=10 años, 94.10 m3/s; para T=25 años, 121.00 m3/s; para T=50 años, 148.00 m3/s y

finalmente para T=100 años, 183.50 m3/s. El modelo de Snyder estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 28.30 m3/s; para T=10 años, 29.70 m3/s; para T=25 años, 31.20 m3/s; para T=50 años, 33.00 m3/s y finalmente para T=100 años, 34.60 m3/s.

Se observa que en la Cuenca del río Tamanaco el modelo de SCS estima caudales pico para la salida de: para T=2años, 91.90 m3/s; para T=10 años, 91.90 m3/s; para T=25 años, 91.90 m3/s; para T=50 años, 91.90 m3/s y finalmente para T=100 años, 92.00 m3/s. El modelo de Clark estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 92.30 m3/s; para T=10 años, 92.70 m3/s; para T=25 años, 93.00 m3/s; para T=50 años, 93.30 m3/s y finalmente para T=100 años, 93.70 m3/s. El modelo de Snyder estima valores de caudal pico en la salida de: T=2años, 92.30 m3/s; para T=10 años, 92.60 m3/s; para T=25 años, 92.70 m3/s; para T=50 años, 92.80 m3/s y finalmente para T=100 años, 92.90 m3/s.

Tabla 12. Valores de Caudal Pico Calculado para cada modelo de proceso de transformación de lluvia-escorrentía, para Periodos de Retorno de 2 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años.

Cuenca	Modelo	Caudal Pico Calculado (m3/s)				
		T= 2 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T=100años
Guanape	SCS	10.80	10.90	11.00	11.10	11.20
	Clark	12.30	13.80	15.10	16.40	18.00
	Snyder	18.50	20.10	20.20	20.60	21.00
Guaribe	SCS	27.60	27.80	27.90	28.10	28.20
	Clark	28.90	30.40	31.50	32.70	34.20
	Snyder	30.60	31.00	36.20	38.80	42.10
Güere	SCS	89.10	89.20	89.30	89.40	89.50
	Clark	158.80	207.60	255.10	303.40	365.60
	Snyder	89.30	89.40	89.50	89.70	90.00
Ipire	SCS	43.50	59.20	75.50	94.30	121.00
	Clark	64.30	94.10	121.00	148.00	183.50
	Snyder	28.30	29.70	31.20	33.00	34.60
Tamanaco	SCS	91.90	91.90	91.90	91.90	92.00
	Clark	92.30	92.70	93.00	93.30	93.70
	Snyder	92.30	92.60	92.70	92.80	92.90

A continuación se muestra la media para cada columna de datos de cada subcuenca. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

En la Figura 247 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto al periodo de retorno para la subcuenca Guanape, se observa que

los valores se solapan lo que indica que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95%.

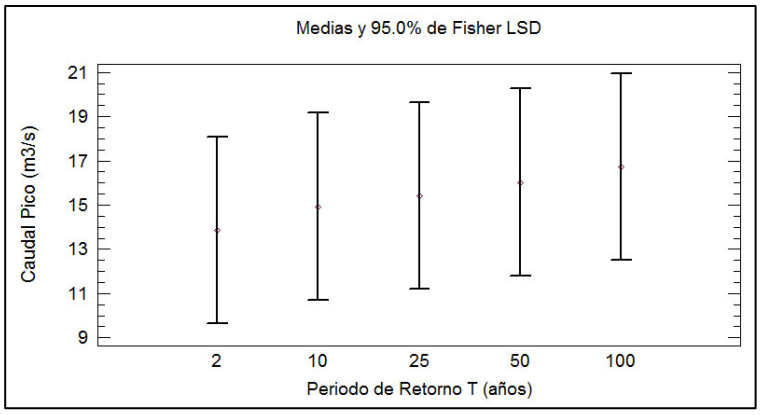


***Figura 247*. Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Guanape**

En la Figura 248 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto a cada modelo para la subcuenca Guanape, se observa que los valores son diferentes, siendo el modelo de snyder el que estima valores de caudal pico más altos.

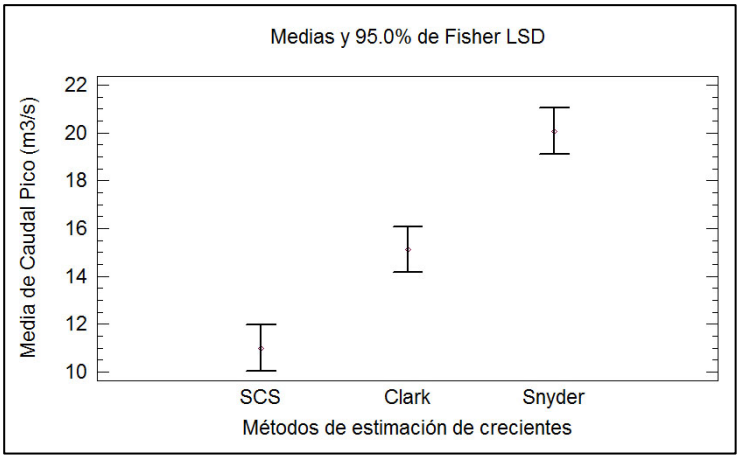


***Figura 248.* Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Guanape.**

En la Figura 249 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto al periodo de retorno para la subcuenca Guaribe, se observa que los valores se solapan lo que indica que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95%.

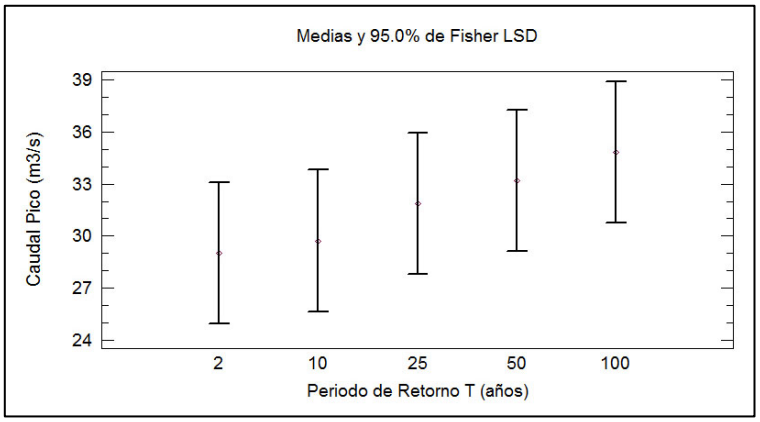


Figura 249. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Guaribe.**

En la Figura 250 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto a cada modelo para la subcuenca Guaribe, se observa que los valores se solapan indicando que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95% en las estimaciones con los diferentes modelos, siendo el modelo de snyder el que estima valores de caudal pico más altos.

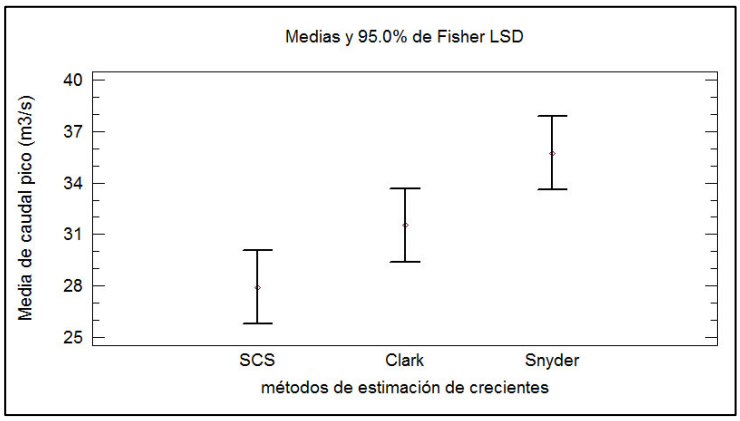


Figura 250. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Guaribe.**

En la Figura 251 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto al periodo de retorno para la subcuenca Güere, se observa que los valores se solapan lo que indica que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95%.

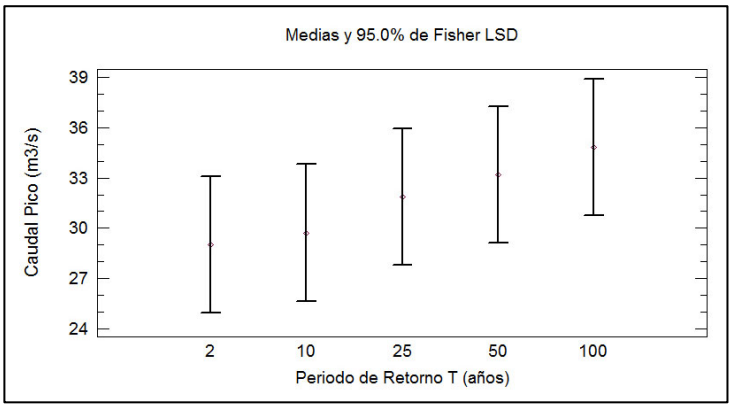


Figura 251. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Güere.**

En la Figura 252 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto a cada modelo para la subcuenca Güere, se observa que los valores se solapan indicando que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95% en las estimaciones con los diferentes modelos, siendo el modelo de snyder el que estima valores de caudal pico más altos.

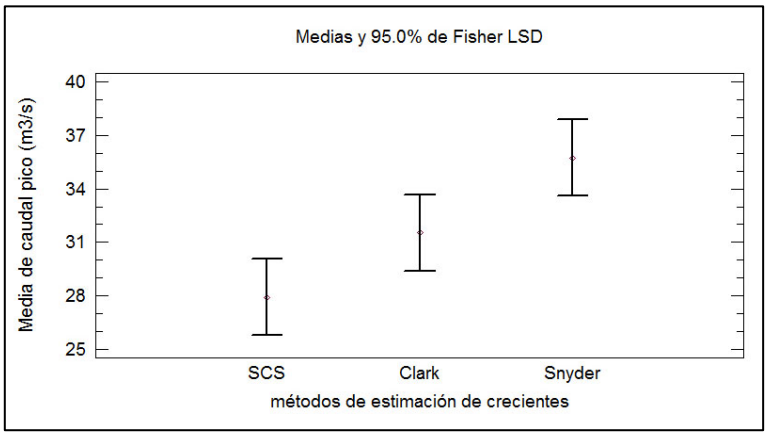


***Figura 252*. Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Güere.**

En la Figura 253 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto al periodo de retorno para la subcuenca Ipire, se observa que los valores se solapan lo que indica que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95%.

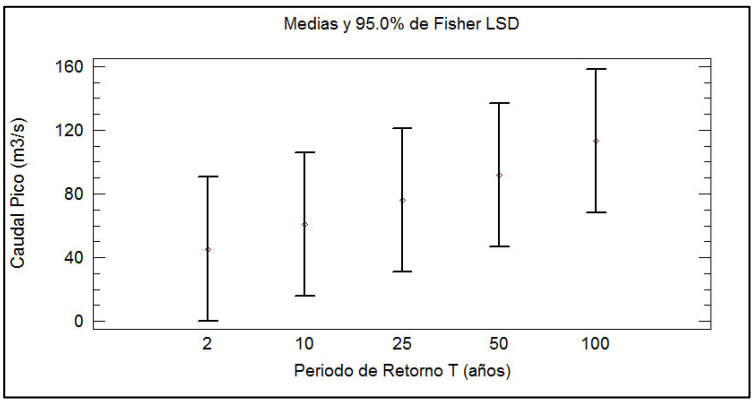


Figura 253. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Ipire**

En la Figura 448 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto a cada modelo para la subcuenca Ipire, se observa que los valores estimados con el modelo SCS y Clark se solapan indicando que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95% en las estimaciones con los diferentes modelos, siendo el modelo de Clark el que estima valores de caudal pico más altos con respecto a SCS y Snyder.

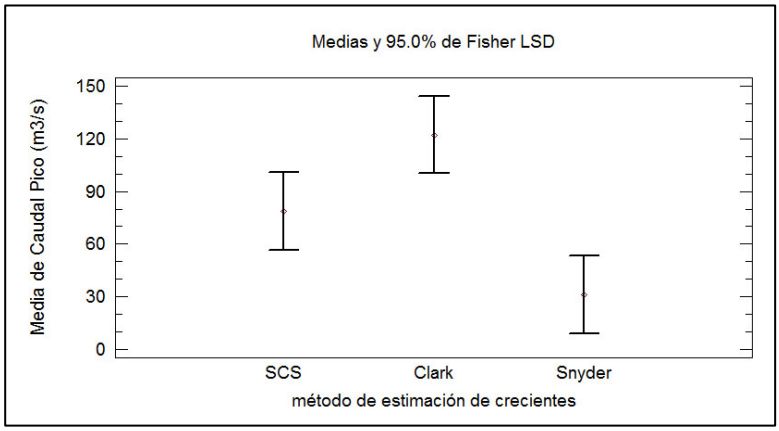


Figura 254. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Ipire.**

En la Figura 255 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto al periodo de retorno para la subcuenca Tamanaco, se observa que los valores se solapan lo que indica que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95%.

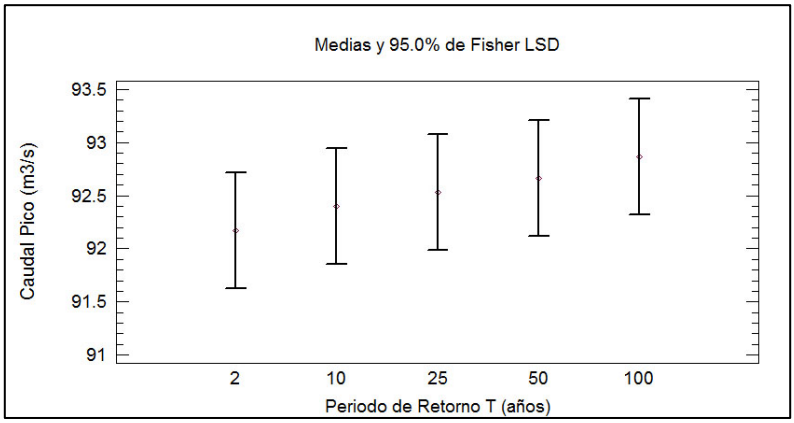


Figura 255. **Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los periodos de retorno T, para la subcuenca Tamanaco.**

En la Figura 256 se muestra la variación de la media de caudal pico respecto a cada modelo para la subcuenca Tamanaco, se observa que los valores estimados con el modelo de Clark y SCS se solapan indicando que no hay variación significativa a un nivel de confianza del 95% en las estimaciones con los diferentes modelos, siendo el modelo de Clark el que estima valores de caudal pico más altos con respecto a SCS y Snyder.

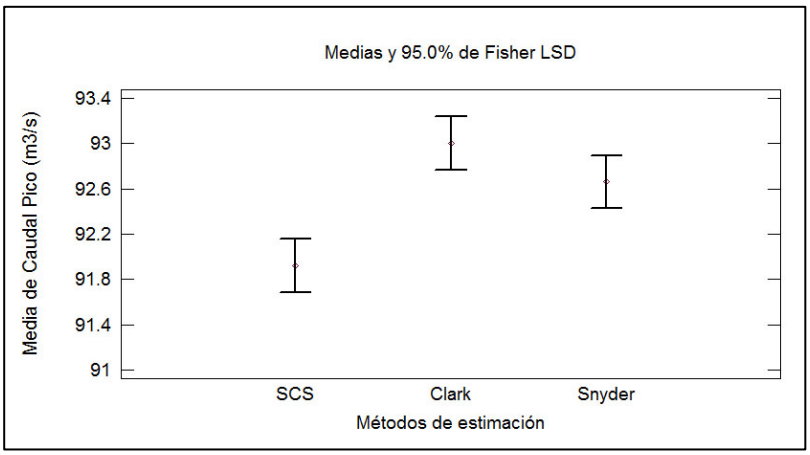


***Figura 256*. Media y 95.0% de Fisher LSD del caudal pico con respecto a los modelos en estudio SCS, Clark y Snyder, para la subcuenca Tamanaco.**

4.6 VALIDAR MODELOS DEL PROCESO LLUVIA-ESCORRENTÍA ADAPTADOS A LA CUENCA DEL RÍO UNARE

En el proceso de validación de los modelos de lluvia-escorrentía se comparan los tres métodos estudiados como son el Servicio de Conservación de suelos (SCS), hidrogrma Unitario de Clark e Hidrogrma Unitario de Snyder. Se utilizará como referencia la cuenca del río Ipire para hacer la validación, por poseer valores de caudales a la salida de la cuenca medidos en campo. En el proceso se utiliza la lluvia de 2 años de periodo de retorno, perteneciente a la estación ubicada en Aragua de Barcelona.

A continuación se presentan los resultados de los caudales observados que se comparan con los valores de caudales estimados por

cada modelo de lluvia-escorrentía en estudio, a la salida de la cuenca del río Ipire.

En la Figura 451 se observan los valores de caudal observado en el eje de las abscisas y los valores de caudal estimado con el modelo SCS en el eje de las ordenadas, la recta N°1 la N°2 son de pendiente positiva y poseen un coeficiente de determinación de 0.4333 y 0.1248 respectivamente, lo que indica que los valores estimados para la recta N°1 son más parecidos a los observados.

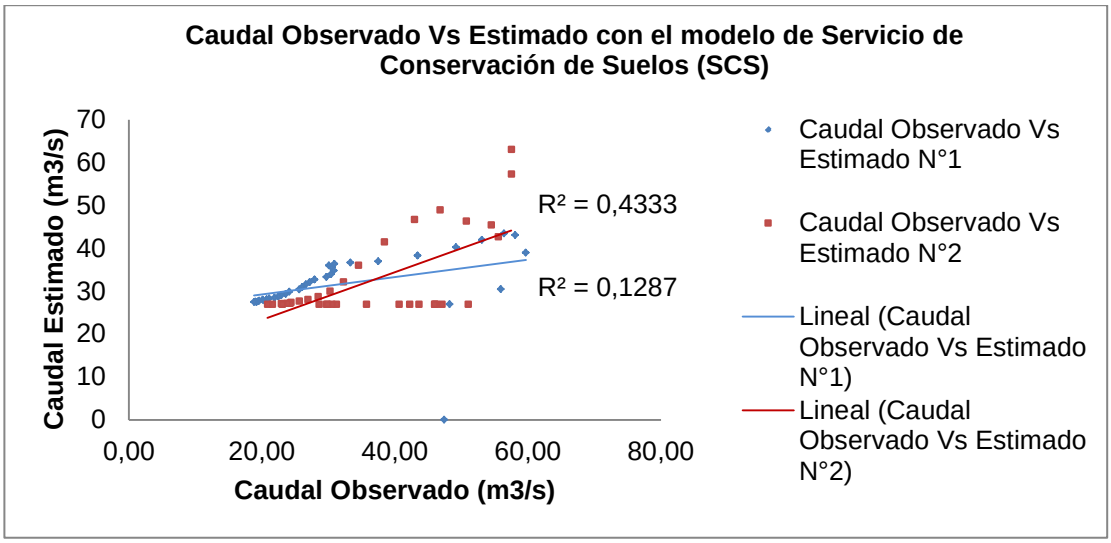


***Figura 257*. Caudal Observado y Caudal Estimado con SCS, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire.**

En la Figura 258 se observan los valores de caudal observado en el eje de las abscisas y los valores de caudal estimado con el modelo de Clark,

la recta N°1 la N°2 son de pendiente positiva y más pronunciada que las evidenciadas con el modelo SCS y poseen un coeficiente de determinación de 0.6972y 0.2742 respectivamente, lo que indica que los valores estimados para la recta N°1 son más parecidos a los observados y que el modelo de Clark arroja mejores resultados que los calculados con el modelo SCS.

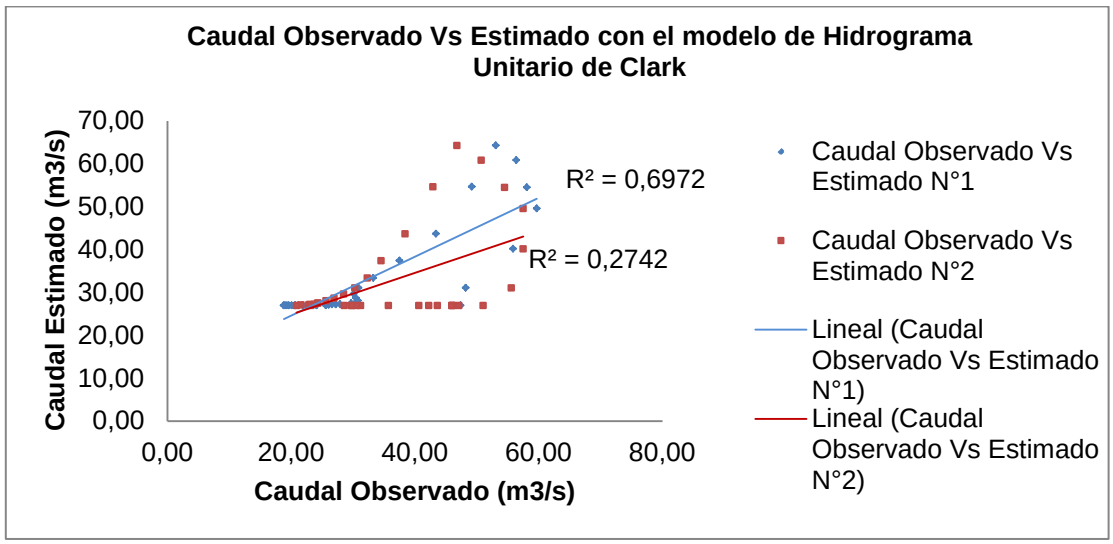


Figura 258. **Caudal Observado y Caudal Estimado con Clark, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire.**

En la Figura 259 se observan los valores de caudal observado en el eje de las abscisas y los valores de caudal estimado con el modelo de Snyder, la recta N°1 la N°2 son de pendiente positiva y más pronunciada que las evidenciadas con los dos modelos anteriores y poseen un coeficiente de

determinación de 0.7888 y 0.4333 respectivamente, lo que indica que los valores estimados para la recta N°1 son más parecidos a los observados y que el modelo de Snyder es el más apropiado para realizar la estimación del proceso lluvia escorrentía en la cuenca del río unare.

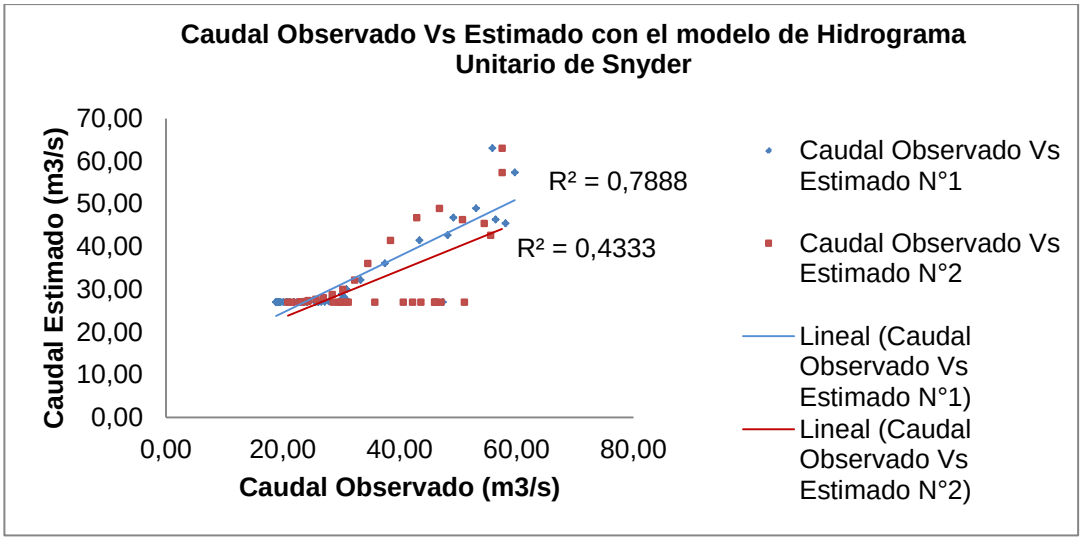


Figura 259. **Caudal Observado y Caudal Estimado con Snyder, para una lluvia de T=2años a la salida de la cuenca del río Ipire.**

BIBLIOGRAFÍA

Bolinaga, J., 1996. “Proyectos de Ingeniería Hidráulica”. Volumen II. Fundación Polar. Caracas- Venezuela

Caldera Oralyn, (2005). “Régimen de lluvias y “sabiduría de la naturaleza”. Vitalis. Venezuela

Chow Ven Te., (1994). “Hidráulica de Canales Abiertos”. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. Santafe de Bogota.

Chow Ven Te., Maidment D. “Hidrología Aplicada”. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. Santafe de Bogota, 2000.

Guevara, E., (2003). “Un Modelo de Área-Altura-Duración (AAD) de tormentas de Venezuela”. Revista INGENIERIA UC. Vol. 10, Nº 1. Valencia-Venezuela.

Guevara, E., Cartaya, H., (2003). “Hidrología, Una Introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada”. Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela.

Ley de Aguas. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Nº 38.595 de fecha 02 de enero de 2007.

Normas sobre la regulación y el control del aprovechamiento de los recursos hídricos y de las cuencas hidrográficas. (1996). DECRETO Nº 1400. Gaceta Oficial de la República de Venezuela Nº 36.013

Ley Forestal de Suelos y Aguas (1966). Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 1.004 Extraordinario. Caracas-Venezuela

Proyecto VEN/79/001 (1983). “Sistemas Ambientales Venezolanos. Metodología para la definición de regiones, subregiones y áreas naturales”. Departamento de reproducción gráfica DGPOA. Caracas-Venezuela

Sulbarán Berenice, (2005). “CALENTAMIENTO GLOBAL Y CAMBIO CLIMÁTICO”. Vitalis. Venezuela

US Army Corps of Engineers, (2010) “Geospatial Hydrologic Modeling Extension. HEC- GEOHMS version 5.1”. User’s Manual.

US Army Corps of Engineers, (2011) “HEC-GeoRAS version 4.3.93. GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS”. User’s Manual

US Army Corps of Engineers, (2010) “River Analysis System. HEC-RAS version 4.1”. Applications Guide.

US Army Corps of Engineers, (2010) “River Analysis System. HEC-RAS version 4.1”. Hydraulic Reference Manual.

US Army Corps of Engineers, (2010) “River Analysis System. HEC-RAS version 4.1”. User’s Manual

US Army Corps of Engineers, (2010) “Hydrologic Modeling System. HEC-HMS version 3.5”. User’s Manual

US Army Corps of Engineers, (2010) “Hydrologic Modeling System. HEC-HMS version 3.5”. Hydraulic Reference Manual

US Army Corps of Engineers, (2010) “Hydrologic Modeling System. HEC-HMS version 3.5”. Applications Guide.

Márquez Adriana, (2009). “Procedimiento para proyecto de representación de las características físicas de suelo en ARCGIS”. Guía de uso.

Castro Jesús, (2010). “USO DE AUTODESK RASTER DESIGN 2010 PARA VECTORIZAR”. Traducción de Manual Usuario de Raster Design 2010