



AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE MAESTRIA
INGENIERIA AMBIENTAL



VALIDACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN
DEL PROCESO LLUVIA- ESCORRENTIA EN LA
CUENCA DEL RIO UNARE
(GUARICO- ANZOATEGUI)

ING BETTYS FARIAS

VALENCIA Junio de 2015



VALIDACIÓN DE MODELOS DE
ESTIMACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-
ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL RIO
UNARE (GUARICO- ANZOATEGUI)



Autor: Ing. BETTYS FARIAS

Trabajo presentado ante el Área de
Estudios
De Postgrado de la Universidad de
Carabobo
para optar al Título de Magister en Ingeniería
Ambiental.

Valencia, Junio de 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien todo lo puede, que sin su presencia y su amor no logramos nuestros objetivos.

A la tutora de esta investigación Adriana Márquez que se convierte en ejemplo e inspiración de trabajo y tenacidad para todas las personas que tienen el placer de ser sus alumno, Gracias.

A mis alumnos Jackson y Carlos por su apoyo incondicional, así como a todos esos jóvenes a quienes les he dado clases y terminan convirtiéndose en ese impulso de nuestra vida diaria.

A la profesora Auxilia Mallia por su colaboración como profesora de Seminario.

Al Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Carabobo por el apoyo prestado, a la jefa del departamento profesora Maryelbis Jiménez, a Genny Malpica que siempre está allí cuando la necesitamos.

¡GRACIAS!

Bettys .E. Farías

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a la persona que ha sido el mejor ejemplo de esfuerzo, empeño y dedicación en mi vida mi madre, Alicia sin ti no hubiese logrado ni este objetivo ni ningún otro ¡Te amo!

Reinaldo como no dedicarte este esfuerzo? si me ha acompañado en todos los proyectos de mi vida, sobre todo en los dos más importantes de nuestras vidas.

Daniel y Reynaldo, a ustedes les dedico este trabajo y les agradezco por permitirme terminarlo aun cuando les he robado tantas horas del tiempo que por derecho les debía dedicar ¡los amo tanto!

Bettys Farías

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.3 Objetivos de la Investigación.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Limitaciones.....	9
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA	
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Bases Teóricas.....	13
2.2.1 La cuenca hidrológica.....	13
2.2.2 Modelos.....	13
2.2.3 Modelos Determinísticos.....	14
2.2.4 Calibración de los parámetros del modelo.....	15
2.2.5 Validación del modelo.....	16
2.2.6 Simulación del modelo.....	17
2.2.7 Modelo HEC-HMS.....	17
2.2.8 Sistemas de Información Geográfica.....	19

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1	Tipo de Investigación.....	21
3.2	Diseño de la Investigación.....	22
3.3	Técnicas de Recolección de Información.....	22
3.4	Etapas de la Investigación.....	23
3.4.1	Etapa de Diagnóstico.....	23
3.4.2	Recolección de Información.....	25
3.4.2.1	Cartas Topográficas.....	26
3.4.2.2	Imágenes Satelitales.....	27
3.4.2.3	Información Pluviométrica.....	28
3.4.2.4	Información Hidrométrica.....	30
3.4.2.5	Mapa de Uso de la Tierra y Tipos de Suelos.....	32
3.4.3	Procesamiento de Datos.....	33
3.4.3.1	Componente Hidrológico.....	33
3.4.3.2	Construcción del Modelo de Elevación Digital.....	34
3.4.3.3	Procesamiento del Terreno.....	37
3.4.3.4	Configuración del Modelo Hidrológico.....	39
3.4.3.5	Procesamiento de la cuenca.....	42
3.4.3.6	Determinación de Procesos Hidrológicos.....	45
3.4.3.7	Método del Soil Conservation Service, (SCS).....	47
3.4.3.8	Hidrograma de Snyder.....	50
3.4.3.9	Caudal Base Constante Mensual.....	52
3.4.3.10	Modelo de Transito de Muskingum.....	55
3.4.3.11	Determinación de Parámetros Hidrológicos... ..	55
3.4.3.12	Estimación de la Curva CN.....	57
3.4.3.13	Importación del Modelo de la Cuenca.....	59

3.4.3.14 Creación del Modelo Hidrológico.....	60
3.4.3.15 Creación del Modelo Metereológico.....	62
3.4.3.2 Componente Hidráulico.....	64
3.4.3.2.1 Levantamiento Topográfico y Batimétrico de la zona..	65
3.4.3.2.2 Ingreso de Datos al Sistema.....	66
3.4.4 Análisis de Resultados.....	70

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Describir las características del proceso lluvia-escorrentía utilizando los datos de la red de estaciones de monitoreo hidro-metereológicas de la cuenca del río Unare.....	75
4.2 Determinación de los parámetros de los modelos determinísticos basados en el proceso lluvia-escorrentía.....	81
4.3 Calibración de los modelos estudiados del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del río Unare.....	92
4.4 Validación del modelo lluvia-escorrentía.....	99
4.5 Evaluación de la influencia de las manchas de inundación sobre las áreas de riesgo potencial de inundación.....	125
CONCLUSIONES.....	131
RECOMENDACIONES.....	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	.134

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las Estaciones Pluviométricas.....	29
Tabla 2. Métodos para cálculos de subcuencas y canales.....	46
Tabla 3. Número de Curva CN de escorrentía.....	49
Tabla 4. Parámetros Morfométricos de la cuenca.....	82
Tabla 5. Características del río principal.....	82
Tabla 6. Características de los suelos de la cuenca.....	87
Tabla 7. Áreas intervenidas en la cuenca del río Unare	92
Tabla 8. Resultados de la aplicación de métodos de medición de errores.....	96
Tabla 9. Parámetros según el Hidrograma Unitario de Clark	97
Tabla 10. Parámetros según el Hidrograma Unitario de Clark... ..	98
Tabla 11 Parámetros según el Hidrograma Unitario de Snyder.....	98
Tabla 12. Resultados obtenidos para cada escenario simulado.....	106
Tabla 13. Porcentajes de riesgo según el índice poblacional.....	126
Tabla 14. Clasificación del riesgo según el uso de la tierra.....	127
Tabla 15. Porcentajes de riesgo para áreas ubicadas en la planicie de inundación.....	128

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Nacional de la cuenca.....	24
Figura 2. Ubicación de las cartas topográficas de la cuenca.....	27
Figura 3. Localización Satelital del río Unare.....	28
Figura 4. Ubicación de las estaciones pluviométricas.....	29
Figura 5. Ubicación de las estaciones de aforo.....	30
Figura 6. Zona de medición en puente Clarines.....	31
Figura 7. Zona de medición en puente Zaraza.....	31
Figura 8. Ubicación de sensores de nivel en los puntos de medición..	32
Figura 9. Metodología del componente hidráulico.....	34
Figura 10. Digitalización de curvas de nivel.....	35
Figura 11. Archivo de curvas de nivel en ArcMap.....	35
Figura 12. Resultado de la creación del raster.....	36
Figura 13. Resultado del llenado de sumideros.....	37
Figura 14. Conjunto de imágenes del procesamiento del terreno.....	39
Figura 15. Esquema del proyecto de la cuenca del río Unare.....	40
Figura 16. Imágenes obtenidas del procesamiento de la cuenca.....	41
Figura 17. Resultados del cálculo de la longitud de los ríos.....	42
Figura 18. Resultados del cálculo de la pendiente de los ríos.....	43
Figura 19. Resultado del cálculo de las pendientes de la cuenca.....	44
Figura 20. Resultado del cálculo del tributario más largo.....	44
Figura 21. Resultado de la elevación del centroíde de la cuenca.....	45
Figura 22. Resultado del centroide de la cuenca de Ipire.....	45
Figura 23. Hidrograma unitario de Snyder.....	52
Figura 24. Laminación del hidrograma.....	53
Figura 25. Tiempos característicos de respuesta de una cuenca.....	56

Figura 26. Subcuencas del río Unare.....	68
Figura 27. Polígono del número de curva.....	59
Figura 28. Simulación del proyecto importado desde HEC-GeoHMS...	59
Figura 29. Creación de pluviómetros.....	61
Figura 30. Editor de fecha y hora de descarga.....	61
Figura 31. Hidrograma de descarga.....	62
Figura 32. Asignación del modelo de cuenca a simular.....	63
Figura 33. Esquema de la modelación hidrológica de la cuenca.....	64
Figura 34. Metodología del componente Hidráulico.....	65
Figura 35. Selección de las líneas de corte de las secciones.....	66
Figura 36. Archivo de importación de PreRas.....	66
Figura 37. Valores de coeficientes de Manning.....	67
Figura 38. Valores de coeficientes de contracción y expansión.....	68
Figura 39. Sección transversal del río.....	69
Figura 40. Selección del modelo de corrida.....	69
Figura 41. Tin de las superficies de agua creadas.....	71
Figura 42. Delimitación de planicies de inundación.....	71
Figura 43. Hietograma de la precipitación de 05 de Agosto 2012.....	77
Figura 44. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.....	78
Figura 45. Hidrograma de bloques alternos para Tr 10 anos.....	79
Figura 46. Caudales medios estación Clarines.....	80
Figura 47. Caudales medios estación Zaraza.....	80
Figura 48. Aforo estación Clarines.....	81
Figura 49. Mapa de tipos de vegetación en la cuenca.....	85
Figura 50. Vista panorámica de la cobertura de la cuenca.....	86
Figura 51. Vista panorámica de la cobertura de la cuenca.....	86
Figura 52. Mapa de tipos de suelos en la cuenca.....	88
Figura 53. Vista panorámica de los suelos de la cuenca.....	89

Figura 54. Vista panorámica de los suelos de la cuenca.....	89
Figura 55. Ubicación de los centros poblados en la cuenca.....	90
Figura 56. Vista panorámica de Puerto Piritu.....	91
Figura 57. Porcentajes de superficie de las subcuencas.....	91
Figura 58. Resume de los escenarios planteados.....	94
Figura 59. Representacion del coeficiente de determinación.....	96
Figura 60. Delimitación de las subcuencas.....	100
Figura 61. Resultados del primer escenario de validación.....	102
Figura 62. Resultados del segundo escenario de validación.....	103
Figura 63. Resultados del tercer escenario de validación.....	104
Figura 64. Resultados del cuarto escenario de validación.....	105
Figura 65. Hidrograma de Caudales medios.....	106
Figura 66. Curva de gastos estación Clarines.....	107
Figura 67. Nota de prensa sobre el río Unare.....	108
Figura 68. Diferentes vistas del cauce del río Unare.....	109
Figura 69. Resultados del primer escenario de simulación.....	114
Figura 70. Resultados del segundo escenario de simulación.....	115
Figura 71. Resultados del tercer escenario de simulación.....	116
Figura 72. Resultados del cuarto escenario de simulación.....	117
Figura 73. Resultados del quinto escenario de simulación.....	118
Figura 74. Resultados de sexto escenario de simulación.....	119
Figura 75. Resultado del séptimo escenario de simulación.....	120
Figura 76. Vista de planta de las secciones transversales del río Guere.....	122
Figura 77. Sección transversal del río Guere.....	122
Figura 78. Vista de planta de las secciones transversales del río Unare.....	123
Figura 79. Sección transversal del río Unare.....	123

Figura 80. Zonificación de planicies de inundación para $T_r= 2$ años....	124
Figura 81. Zonificación de planicies de inundación para $T_r= 50$ años...	125
Figura 82. Mapas de zonas de riesgo de la cuenca.....	127
Figura 83. Ubicación de Clarines.....	128
Figura 84. Ubicación de Onoto.....	129
Figura 85. Ubicación de Zaraza.....	129



AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE MAESTRIA
INGENIERIA AMBIENTAL



VALIDACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN
DEL PROCESO LLUVIA- ESCORRENTIA EN LA
CUENCA DEL RIO UNARE
(GUARICO- ANZOATEGUI)

Autor: Ing. Bettys Farías de Marquez.
Tutor: Dra: Adriana Marquez.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación, fue la de validar el modelo del proceso lluvia-escorrentía, adaptada a la cuenca del río Unare, ubicada en la porción nororiental y noroccidental de los estados Guárico y Anzoátegui.

El procesamiento de los datos obtenidos se realizó con el sistema de modelaje hidrológico HEC-HMS, y con los diferentes paquetes que posee el software.

Es un tipo de estudio es correlacional con un diseño no experimental.

Esta investigación tiene como técnicas de recolección de datos la observación científica indirecta, como instrumentos o medios para obtener la información se dispuso de cartografía tanto en físico como digitalizada, además de bibliografía, e información hidrometeorológica suministrada por INAMEH, con los datos correspondientes a lluvias desde los años 2010-2013.

Esta información fue procesada con las aplicaciones del Arcgis 10.1 y las extensiones HEC-GeoHMS, HEC-RAS, para realizar la simulación del proceso lluvia-escorrentía

Y determinar zonas de planicies de inundación para tormentas de diseño para periodos de retorno de dos años y cincuenta años, arrojando como resultado una validación del modelo muy adaptado al comportamiento del proceso a simular en la cuenca y con un riesgo de 42% para un periodo de 50 años.

Palabras claves: Cuenca, simulación hidráulica, escorrentía



AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE MAESTRIA
INGENIERIA AMBIENTAL



VALIDACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN
DEL PROCESO LLUVIA- ESCORRENTIA EN LA
CUENCA DEL RIO UNARE
(GUARICO- ANZOATEGUI)

Autor: Ing. Bettys Farías de Marquez.

Tutor: Dra: Adriana Marquez.

ABSTRACT

The objective of this research, was the validation of the the model of the process lluvia-escorrentia, adapted to the Unare River basin, located in the North-Eastern and North-Western portion of the States of Guarico and Anzoategui.

Data processing was carried out with the hydrological model HEC-HMS system, and different packages that has the software.

It is a type of correlational study with a non-experimental design. This research has as data collection techniques indirect scientific observation, as instruments or means for the information we dispose of both in digitized and physical maps, as well as bibliography and information hidrometereologica supplied by INAMEH, with data for rainfall since the years 2010-2013.

This information was processed with the HEC-GeoHMS, HEC-RAS, extensions and Arcgis 10.1 applications to perform the simulation of the lluvia-escorrentia process and determine areas of flood plains storm of design for return periods of 50 years and 2 years, throwing a model validation very adapted to the behavior of the process to be simulated in the basin and a risk of 42% for a period of 50 years as a result.

Key words: watershed, hydraulic simulation, runoff

INTRODUCCION

Entre las aplicaciones frecuentes en el manejo de los recursos hídricos está la elaboración de los mapas de inundación a partir de registros puntuales de precipitación.

Como parte de este trabajo se presenta la metodología para realizar la validación de modelos matemáticos que se puedan adaptar al comportamiento de la relación lluvia-escorrentía, así como la generación de mapas de inundación y determinación de zonas de amenazas de inundaciones en la cuenca del Río Unare ubicada en los estados Guárico y Anzoátegui, utilizando las herramientas de modelación hidrológica HEC.

Esta investigación consta de cinco capítulos, en el primero se hace el planteamiento del problema que motivo esta investigación, sus objetivos, justificación y las limitaciones de la misma. Continuando con el capítulo dos donde se presentan los antecedentes utilizados y que hicieron algún aporte al desarrollo de este trabajo, así como las bases teóricas que sustentan esta investigación, seguidamente el capítulo tres expone la metodología aplicada basada principalmente en el uso del software HEC y sus distintas extensiones, la determinación de las características físicas de la cuenca se hizo con la extensión HEC-GeoHMS, las crecientes de diseño con HEC-HMS, las planicies de inundación con HEC-RAS y por último se usó HEC-GeoRAS para la delimitación de zonas inundables, en el capítulo cuatro se presentan el análisis de los resultados obtenidos con la metodología aplicada, y el quinto y último capítulo contiene las conclusiones obtenidas de la investigación y las recomendaciones.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACION

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 1994), Venezuela está presentando un estado de vulnerabilidad ante el riesgo por desastres naturales de gran magnitud como inundaciones y deslizamientos que evidencian la fragilidad ambiental que existe en nuestro país. La magnitud y frecuencia de estos fenómenos naturales, parecieran incrementarse cada vez más. La gravedad de los daños ocasionados por fenómenos naturales como inundaciones, deslizamientos, entre otros en grandes centros urbanos se incrementa con el aumento y densificación de la población en sitios mal seleccionados para su localización, en zonas amenazadas por fenómenos de inestabilidad o por la cercanía a las cuencas.

Las inundaciones constituyen uno de los riesgos más frecuentes de desastres a los que años tras años se ve enfrentada la población que habita cerca de la cuenca del Rio Unare .Las inundaciones pueden ser ocasionadas por lluvias persistentes sobre una misma zona durante cierto tiempo, por lluvias muy fuertes aunque sea por poco tiempo, o por rompimiento de una presa.

Los impactos ambientales generados por las inundaciones son: **Modificación del relieve**, el desbordamiento del cauce de los ríos modifica el relieve, el drenaje y el sustrato, cambia el movimiento de las aguas en su trayectoria, su calidad y cantidad. **Alteración de los flujos de agua superficial y de las aguas subterráneas**, se ven afectados por los caudales distintos al régimen natural de los ríos en condiciones normales. **Generación y arrastre de sedimentos**, el desbordamiento del cauce de los ríos moviliza grandes cantidades de sedimentos que se depositan en sus lechos, alterando su estructura y dinámica hidrológica, aumentando los procesos de erosión. **Contaminación de las aguas y suelos**, hay un aumento considerable de las cargas orgánicas en el agua de los ríos al producirse una crecida, así como una alteración de la calidad de las aguas y de los suelos. **Disminución de la biodiversidad**, se genera un impacto sobre las formas de vida de los ambientes locales y de las aguas abajo de las zonas afectadas, lo cual a su vez altera los ritmos ecológicos, como las cadenas alimenticias y los controles biológicos naturales. **Pérdida del valor agrícola de las tierras**, producen una devastación de grandes extensiones de terreno que ocasiona la pérdida de la capacidad agrícola de las tierras.

Todos estos impactos están afectando la cuenca del Río Unare producto de las inundaciones que se presentan cada año motivado a las persistentes precipitaciones que ocurren en la zona, donde en promedio llueve de manera intensa durante 3 a 4 horas, y su población está sufriendo los impactos directos de las pérdidas de vidas humanas, pérdidas de ganado, pérdidas de instalaciones industriales, pérdidas del sector de servicios y producción además de problemas graves de salud y salubridad.

El modelo de una cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca, este modelo se desarrolla agregando y conectando elementos hidrológicos. El estudio de los modelos matemáticos de pronóstico de lluvia-escorrentía permite obtener información sobre el comportamiento del proceso de escurrimiento de los efluentes de una cuenca, con la información obtenida se pueden aportar soluciones a los problemas que se generan por la presencia de estos fenómenos naturales que causan daños en las cuencas hidrográficas las cuales se deterioran interrumpiendo el ciclo hidrológico.

Para el estudio de estos modelos matemáticos de infiltración escurrimiento, transito de crecientes se analizaran datos de precipitación y caudal de las diferentes estaciones de monitoreo ubicadas en la cuenca del Rio Unare que permitirán analizar el comportamiento de los modelos para simular los escenarios de lluvia- escorrentía que facilitaran la identificación de las áreas de riesgo de inundación y con ello la validación de los modelos de estimación del proceso lluvia- escorrentía en la cuenca del Rio Unare.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible adaptar un modelo matemático existente del pronóstico lluvia escorrentía para evaluar el comportamiento de la cuenca del Rio Unare?

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Basado en el planteamiento del problema mediante este estudio se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo General

Comprobar la validez de los modelos determinísticos de estimación del proceso lluvia - escorrentía adaptada a la cuenca del río Unare ubicado en los estados Guárico y Anzoátegui.

Objetivos Específicos:

1. Describir las características del proceso lluvia-escorrentía utilizando los datos de la red de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas ubicadas en la cuenca.
2. Determinar los parámetros de los modelos determinísticos basados en el proceso lluvia-escorrentía.
3. Simular los escenarios del proceso lluvia-escorrentía adaptándolos a la cuenca del Río Unare mediante las aplicaciones de las herramientas HEC.
4. Validar los modelos estudiados del proceso lluvia-escorrentía adaptada a la cuenca del río Unare.
5. Evaluar la influencia de las manchas de inundación sobre los tramos y áreas de riesgo potencial significativo de inundación.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los estudios de los modelos matemáticos de pronósticos de lluvia-escorrentías; son muy importantes porque se utilizan para obtener el comportamiento del proceso de escurrimiento de los afluentes pertenecientes a una cuenca, con el objetivo de regularizar el uso del agua, y darle solución

a los problemas ambientales generados por fenómenos naturales, así como a problemas de ingeniería y los problemas socio-económicos.

La responsabilidad que implica la planificación, diseño, y construcción de obras civiles tales como: complejos habitacionales, complejos vacacionales, vías de comunicación, entre otros, en zonas susceptibles a eventos de crecida, recae directamente en la confiabilidad de los parámetros e instrumentos que se utilizan para medir la cantidad de lluvia que cae en cierta zona.

Desde el punto de vista ambiental las inundaciones, son consideradas como una de las catástrofes naturales que causa mayor número de víctimas en el mundo, provocan el desbordamiento de los ríos que cubren de forma temporal la superficie de las tierras que se ubican en sus márgenes.

Mediante esta investigación se podrían determinar las áreas de riesgo propensas de inundaciones, se elaborarían mapas de peligrosidad de inundación, la clasificación del uso de la tierra cercanas a las cuencas, sistemas de información y seguimiento meteorológico, planes de alerta temprana hidrológica.

Desde el punto de vista económico las inundaciones generan pérdidas de propiedades, instalaciones industriales, perdidas en el sector agropecuario, entre otras, para la comunidad donde se producen, ya que estas constituyen uno de los riesgos más frecuentes de desastres a los que año tras año se ven enfrentadas las comunidades, que se asientan en las planicies inundables y allí es común encontrar construcciones y cultivos de

todas las especies. Mediante esta investigación la información se puede usar para evaluar los impactos de las inundaciones, en la preparación de proyectos de inversión, en la gestión y en el desarrollo sostenible de las cuencas hidrográficas.

Desde el punto de vista institucional esta investigación significara un aporte importante para instituciones como el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, para Defensa Civil y para la comunidad en general que puedan contar con información suficiente y actualizada que les permita crear una gestión de riesgo de inundación, y tomar precauciones a tiempo, debido a las grandes inundaciones y desastres ocurridas en la cuenca del rio Unare.

Adicional a lo anteriormente expuesto esta investigación va a contribuir a ampliar la base de datos para estudiantes y profesores que deseen construir modelos matemáticos para el pronóstico de lluvia-escorrentía, constituyéndose en una referencia para futuras investigaciones.

LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación se implementaran modelos basados en procesos físicos para simular la escorrentía superficial que resulta de una lluvia, mediante una representación de una cuenca como un sistema de componentes interconectados.

La limitación para la ejecución de la investigación fue la cantidad de datos disponibles de las diferentes estaciones pluviométricas ya que solo se dispone de datos a partir del año 2010 en adelante.

Los datos abarcaron épocas de sequías y de lluvias entre los años 2010 y 2014 debido a que a partir de este año, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) ha instalado medidores automáticos que permiten obtener datos cada cinco minutos.

CAPITULO II

MARCO DE REFERENCIA

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presenta un resumen de algunos trabajos e investigaciones realizadas en Venezuela y en otros países, utilizando modelos HEC-HMS, que por su contenido o por su metodología se convirtieron en bases de referencia para el desarrollo de esta investigación.

El propósito de la estimación del impacto de las crecidas es determinar la relación entre el daño y las características de la crecida. Existen muchos modelos para la evaluación de este fenómeno que revisaremos en esta investigación.

Correa (2010), realizó una investigación sobre la estimación de la producción hídrica mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del Rio Unare. El objetivo de esta investigación fue estimar la producción hídrica de la cuenca del Rio Unare mediante la aplicación de un modelo hidrológico. Con esta investigación se pudo determinar la oferta hídrica de esta cuenca para satisfacer el abastecimiento de los habitantes del Municipio Bruzual del Estado Guárico.

Márquez (2011), zonificó manchas de inundación en un área de la cuenca del rio Unare, mediante el uso de la herramienta HEC-RAS. Se

utilizaron datos hidro-meteorológicos de la cuenca para determinar la zonificación de las manchas de inundación. El trabajo concluyó que se pueden obtener pronósticos satisfactorios de las lluvias mensuales debido a que con 12 meses de datos promedios de lluvia se puede generar un patrón que describe la lluvia en esta cuenca.

Márquez (2012), quien trabajó en un estudio de intensidad, duración y frecuencia de lluvias (IDF) en la cuenca del río Unare y el embalse Pao-Cachinche. La autora estableció modelos para las curvas IDF y parametrizó las ecuaciones de las curvas para cada estación. Concluyendo que el ajuste del modelo IDF con los valores era satisfactorio para el estudio del embalse.

Díaz y Fuentes (2013), la investigación trató sobre la implementación de un Sistema de Información Geográfica en el Municipio Naguanagua, utilizando las diferentes facilidades y herramientas que ofrece el software ArcGIS, enfocado hacia la parte de servicios públicos correspondiente a sistemas de acueductos, drenajes y cloacas. De igual manera se abordaron aspectos de interés como la distribución parcelaria, la red vial, cuerpos de agua, bocas de visita tanto de drenaje, como cloacas, entre otros. La principal finalidad de la investigación consistió en demostrar que la puesta en marcha de un sistema de información geográfica en el municipio deriva en un manejo rápido y organizado de la información catastral, dando prueba de la factibilidad, eficacia precisión y funcionabilidad del software.

García y otros, (2010) compararon y evaluaron tres aproximaciones en la estimación del balance hídrico regional distribuido en cuencas sin datos de aforo. El modelamiento espacial de las variables hidro-meteorológicas se realizó en el sistema HEC información geográfica Arc View 3.2 y el modelamiento del escurrimiento con el sistema HEC versión 3.1.0. La cuenca

escogida fue la del lago Cuitzeo en Michoacán, México. Concluyeron que el modelo HEC representa una alternativa para el modelamiento de la cuenca ya que demanda pocos insumos (Evapotranspiración, precipitación, evapotranspiración potencial), datos con los que contaban para esa investigación.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (2008), estudiaron el desazolve del arroyo Iquinuapa, ubicado en la localidad de Iquinuapa, Municipio de Jalpa De Méndez, Edo Tabasco, México”, para prevenir riesgos de inundación a corto, mediano y largo plazo en la zona del arroyo para un tiempo de vida útil de 20 años. Para la determinación de los niveles de agua en el cauce del arroyo se utilizó el programa HEC-RAS, con este programa se procesó la simulación del comportamiento del flujo en el cauce del arroyo para un determinado caudal. Logrando su objetivo la demarcación de las áreas inundables y definición del uso adecuado de las áreas circundantes.

BASES TEÓRICAS

La cuenca hidrográfica

Según CEPAL (1994), en el informe sobre la gestión del agua y las cuencas en América Latina define una cuenca hidrográfica como un territorio que es delimitado por la propia naturaleza, esencialmente por los límites de las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce. La cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes poseen

condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características peculiares.

Por su parte Llamas (1993), señala que una cuenca es un espacio geográfico que recibe aportes hídricos, esencialmente de las precipitaciones, y que los excedentes que presenta en agua y sólidos transportados por la corriente, toman lugar en una sola desembocadura.

Modelos

Como lo afirma Bunge (1985), la investigación científica arranca a partir de la percepción de que el acervo de conocimientos disponibles es insuficiente para resolver determinados problemas. A lo largo de la tarea de investigación es necesario, a menudo, tener que realizar simplificaciones de los problemas que se intentan resolver, para poder reducirlos a una serie limitada de variables que puedan ser manejables. En las áreas de conocimiento relacionadas con el medio ambiente, al ser tan amplio y variable la cantidad de factores que determinan el comportamiento de cada sistema, este proceso de selección de las variables a las que es más sensible el sistema y la eliminación del resto es una tarea imprescindible. Por ello, la forma más común de abordar estos problemas en el medio ambiente es utilizando modelos.

Un modelo de un sistema puede ser definido como una conceptualización del mismo que preserve las características esenciales para el fin que nos ocupa, sin necesidad de conservarlas todas (Andreu, 1993). Es decir, un modelo es una representación simplificada de la realidad (un

sistema complejo) que puede ser manipulado para analizar la misma (Estrela, 1996).

La hidrología superficial (ciencia encargada del estudio de las aguas superficiales) requiere de modelos para representar el funcionamiento de los sistemas hidrológicos complejos.

Modelos determinísticos

Si un modelo no contiene ningún componente probabilístico (por ejemplo aleatoriedad), es llamado determinístico. En este tipo de modelos el resultado es determinado una vez que el conjunto de entradas cuantitativas y las relaciones con el modelo han sido especificados.

Sin embargo en muchas ocasiones en hidrología no se pueden conocer con exactitud todos los componentes del sistema y sus interrelaciones, aunque si una buena parte de ellos. Un ejemplo de esto son los modelos de lluvia-escorrentía. Entre ellos la variable de entrada es la lluvia, la variable de salida es el caudal, y ambos están relacionados por una serie de ecuaciones que representan con mayor o menor fidelidad, los procesos que ocurren en la cuenca como evapotranspiración, escorrentía, infiltración.....Pero aunque estos fenómenos se conocen relativamente bien, no así las relaciones funcionales entre ellos (Llamas, 1993).

El procedimiento a seguir para una modelación de un sistema hidrológico debe tomar en cuenta los siguientes parámetros generales: definición del problema a modelar, elección del tipo de modelo, calibración de los

parámetros del modelo, validación de los parámetros, y simulación del modelo calibrado para la solución del problema planteado.

Calibración de los parámetros del modelo

Antes de la aplicación de una simulación del comportamiento hídrico, el modelo a aplicar debe ser ajustado a las condiciones meteorológicas, hidráulicas y morfológicas particulares de la zona a estudiar. Este procedimiento necesario para realizar el proceso de ajuste donde uno o más parámetros que caracterizan el comportamiento del sistema, cambian sus valores es conocido como la calibración.

Según (Schwar, 2001) el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas observadas del sistema y las respuestas simuladas por el modelo utilizado.

En tanto Llamas (1993), indica que la calibración es la etapa en la cual se calculan o se estiman los parámetros del modelo, con criterios deductivos o con ayuda de observaciones anteriores, considerando las demandas y las respuestas.

Por último Thyer (1999), se refiere a la calibración de modelos conceptuales precipitación-escorrentía, indicando que la calibración consiste en estimar un grupo probable y único de parámetros, que calculen la escorrentía de la forma más precisa dada la información observada.

Los valores de los parámetros de los modelos son raramente conocidos en su totalidad, y en ocasiones son desconocidos por completo.

Es necesario entonces proceder a su calibración. Esto significa elegir la combinación para la cual la correlación entre los valores de las variables de la salida generadas por el modelo y las medidas en el sistema real es coincidentes.

Validación del modelo

La validación consiste en comprobar el adecuado funcionamiento del modelo con una serie de mediciones reales no utilizadas en el proceso de calibración.

Para Kelton y Law (1991), la validación consiste en determinar si el modelo conceptual de simulación (en comparación con el programa de computadora), es una representación exacta del sistema que está bajo estudio.

Por su parte Bedient y Huber (2002), dicen que la validación es el acto documentado de probar si cualquier procedimiento, proceso, equipo, material, actividad o sistema, conlleva realmente al resultado esperado o definido.

Y por último Llamas (1993), dice que la calidad d un modelo se mide por los resultados de su validación. Esta consiste en comparar la respuesta teórica obtenida mediante el modelo de simulación, con esta misma respuesta obtenida por observaciones directas, este resultado obtenido es lo que se llama calidad de predicción

Simulación del modelo

Una vez realizados los pasos de calibración y validación del modelo está listo para dar los resultados deseados.

Simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático cobra sentido cuando la información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos. Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de transformación lluvia-escorrentía, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial y mejorando la cartografía temática sobre zonas inundables y zonas con riesgo de inundación (Triviño 2004).

Modelo HEC-HMS

El sistema de modelaje hidrológico desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica de los Estados Unidos (HEC-HMS) está diseñado para simular el proceso de lluvia-escorrentía de cuencas y puede utilizarse en un amplio rango de regiones geográficas.

Este sistema HEC-HMS pertenece a una familia de paquetes del HEC. Los paquetes que forman parte de esta familia y se utilizarán en esta investigación son los siguientes:

- HEC-RAS (Hidrologic Engineering Center River Analysis System), paquete que permite la modelación del flujo, caudal y temperatura del río.

- HEC-GEO RAS (permite la preparación de datos geospaciales con Arc Gis para importarlos directamente en el HEC-RAS).
- HEC-GEO HMS (permite obtener datos desde Arc View e importarlos desde el HEC-HMS).
- HEC-RES SIM (Hydrologic Engineering Center Reservoir System Simulations), paquete que permite simular reservorios.

El modelo HEC-HMS está diseñado para simular los procesos de precipitación- escurrimiento de cuencas, puede aplicarse en una amplia gama de áreas geográficas para la solución de los posibles problemas como el suministro de agua, hidrología de inundación y escorrentía de cuencas. El hidrograma producido por el programa se utiliza directamente o con otro software para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, previsión, impacto de futuras urbanizaciones, diseños de vertederos de embalses, reducción de daños de inundación, regulación de la llanura aluvial y operación de sistemas de flujo.

El programa es un sistema de modelado generalizado capaz de representar diferentes cuencas, separando el ciclo hidrológico en trozos manejables y construyendo límites alrededor de la cuenca de interés, entonces cualquier flujo de masa o de energía en el ciclo puede representarse con un modelo matemático, hay varias opciones de modelos para representar cada flujo. El programa cuenta con un entorno de trabajo completamente integrado como una base de datos, utilidades de entradas de datos, herramientas de reportes de resultados, una interfaz gráfica de usuario permite el movimiento entre las diferentes partes del programa.

Entre las principales aplicaciones del modelo HEC-HMS tenemos:

- Reducción de daños por inundación.
- Regulación de planicies de inundación.
- Drenaje urbano.
- Predicción de caudales.
- Impacto de futuras urbanizaciones.
- Diseños de aliviaderos en reservorio

Llamas (1993) describe que los datos de entrada o inputs que requiere el programa HEC-HMS están referidos principalmente al cálculo de la precipitación, a la tasa de pérdida, al hidrograma unitario, al caudal base y a algunos métodos de tránsito de avenidas. Por otra parte, las salidas u outputs que entrega éste, están definidos por hidrogramas de crecidas en forma de tablas o gráficos, volúmenes y gastos de caudales máximos para distintas duraciones de lluvia y comparaciones de hidrogramas simulados con observados.

Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Desde un punto de vista global un SIG puede ser considerado como un conjunto organizado de hardware, software, datos y técnicas eficientemente diseñadas para la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, visualización y análisis de información geográficamente referenciada (NCGIA, 1990).

La aplicación de los sistemas de información geográfica son de gran importancia en la Hidrología en la construcción de modelos hidrológicos

primero por su nivel de aceptación por contar con un gran número de funciones que le confieren una elevada operatividad .Entre las más productivas destacan las funciones de introducción de datos y análisis espacial .En lo que se refiere a la modelación de los componentes espaciales estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos.

Los SIG están capacitados para interpretar las condiciones geográficas de la cuenca y traducirlas a objetos con propiedades geométricas y atributos. Una vez que estas variables hidrológicas son convertidas en capas de información georreferenciada, sus funciones de análisis espacial nos permite realizar operaciones de álgebra de mapas para obtener datos tan relevantes como las pendientes topográficas, o los coeficientes de escorrentía. Algunos de estos datos se obtienen a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir, **de una representación digital fehaciente de la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1998)**, siendo los SIG el instrumento utilizado para crearlos.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el tipo de investigación a desarrollar y se presentan secuencialmente las etapas y actividades ejecutadas para lograr cada uno de los objetivos propuestos para comprobar la validación de los modelos de estimación determinísticos del proceso lluvia-escorrentía adaptada a la cuenca del río Unare.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es **correlacional**: estos estudios miden dos o más variables que se pretende ver si están o no relacionadas. La utilidad y el propósito principal de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar una variable conociendo el comportamiento de otra variable relacionada. (Hernández y otros, 1996). En esta investigación se relacionan las variables lluvia- escorrentía, se pretende ver cómo están vinculados estos fenómenos entre sí (correlacional), y además se busca encontrar las causas que provocan ciertos fenómenos, la explicación por que ocurren, y en qué condiciones se dan estos.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo a la estrategia de la investigación se puede clasificar como una investigación **no experimental**, se observaran los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos. (Hernández y otros, 1996). En este orden de ideas los fenómenos observados en esta investigación fueron: precipitación, caudal, escorrentía.

TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACION

Para la recolección de la información es indispensable contar con una técnica de recolección de datos, que representan las distintas formas o maneras de obtener información, mientras que los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Toda medición o instrumento de recolección de datos debe tener dos requisitos esenciales: confiabilidad y validez.

La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo objeto, produce iguales resultados, la validez se refiere al grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir. (Hernández y otros, 1996).

En esta investigación se plantea como objetivo general la validación de modelos lluvia- escorrentía adaptada a la cuenca del Rio Unare, para ello es necesario disponer del mapa topográfico de la cuenca en estudio a una escala de 1:25000. El Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar

(IVGSB) dispone de toda la información referente a la planimetría topográfica de todo el país.

Este trabajo de investigación tiene como técnicas de recolección de datos la observación científica indirecta, que ocurre cuando el investigador conoce del hecho mediante observaciones realizadas anteriormente por otras personas, y la observación estructurada que se realiza con la ayuda de elementos técnicos apropiados, (en esta investigación se utilizaron planos topográficos) y como instrumentos o medios para obtener la información se dispuso de cartografía tanto en físico como digitalizada, además de bibliografía, e información hidrometeorológica suministrada por INAMEH con los datos correspondientes a lluvia desde los años 2010 al 2014 y caudales para los años 2010 – 2013.

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló en cuatro etapas:

- 1.- Diagnóstico.
- 2.- Recolección de información
- 3.- Procesamiento de datos.
- 4.- Análisis de resultados.

1^{ra} Etapa Diagnóstico

En esta etapa se seleccionó el área donde se efectuó la investigación:

La cuenca del Río Unare está localizada en la porción nororiental y noroccidental de los estados Guárico y Anzoátegui respectivamente. Está

ubicada en la depresión de Unare entre los 8°44'07"- 10°05'31" de latitud norte (ancho= 158,75 km) y los 66°12'37"- 64°09'29" de longitud oeste (largo= 227,50 km) con una superficie de 22751km², abarca 22 municipios de los cuales 14 pertenecen al estado Anzoátegui y 8 al estado Guárico. En la Figura 1 se muestra la ubicación nacional de la cuenca del río Unare.



Figura 1 Ubicación Nacional de la cuenca del río Unare.

La región Unare Píritu comprende la cuenca del Río Unare, las lagunas de Unare y Píritu y las cuencas de los ríos tributarios de esas lagunas, el Río Unare desemboca en el Mar Caribe, y también desagua en las lagunas antes mencionadas las cuales intercambian agua con el mar a través de sus bocas.

Según CENAMB (Centro de Estudios Integrales del Ambiente de la Universidad Central de Venezuela), en su cuaderno 5 año 2001, en esta región predomina la siguiente clasificación bosque seco tropical, relieves de colinas bajas y recursos hídricos (embalses y lagunas artificiales) con potencial para realizar actividades turísticas y de acuicultura; existen además áreas donde se realizan actividades de explotación de hidrocarburos, practicas agropecuarias y forestales.

2^{da} Etapa Recolección de la Información

Objetivo 1: Describir las características del proceso lluvia-escorrentía utilizando los datos de la red de estaciones de monitoreo hidro-meteorológico de la cuenca.

En esta investigación se describen los modelos de estimación de caudales, cómo se generan los flujos y cómo varían en el transcurso del tiempo y a lo largo del recorrido por sus cauces.

Para estos cálculos se necesitan datos básicos previos los que se refieren a las precipitaciones, que exigen la definición de variables extremas en función del período de recurrencia.

El complejo suelo-vegetación y la morfología de la cuenca son características de importancia relevante para la simulación del proceso lluvia-escorrentía.

En el proceso hidrológico se requiere conocer las características del proceso lluvia-escorrentía y adaptarlo a los datos que se tienen de las estaciones hidro-meteorológicas de las cuencas, en líneas generales estas características del proceso incluye las siguientes etapas:

La precipitación cae sobre la cuenca con una distribución temporal y una intensidad determinada, esta al entrar en contacto con el complejo suelo-vegetación sufre pérdidas por retención e infiltración, quedando sobre la superficie y en libertad de movimiento una cantidad a la que llamaremos lluvia neta o escorrentía, la cual transita por los cauces originando los caudales de crecida, cuya distribución temporal dependerá de las características morfológicas de la cuenca.

Así pues los datos que se necesitan para conocer, valorar y poder llegar a los valores de caudal en la sección de salida de la cuenca son: la precipitación, complejo suelo-vegetación y la morfología de la cuenca.

La información básica recolectada para esta etapa incluye trabajos de investigación realizados por varios autores, trabajos de campo, visitas al sitio de estudio, información técnica suministrada por organismos públicos.

Esta información se puede clasificar de la siguiente forma:

Cartas Topográficas.

El desarrollo de esta investigación requiere de información de la planimetría y altimetría del terreno información que se obtiene mediante las cartas topográficas, se usaron las cartas topográficas oficiales suministradas por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IVGSB) en una escala 1: 25000, separadas cada 20 metros, estas se ordenaron según sus coordenadas geográficas como se muestra en la Figura 2.

Información Pluviométrica

A través del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) se obtuvieron los datos de lluvias diarias cada 5 minutos correspondientes a los periodos 2010-2014 en las estaciones pluviométricas ubicadas en esta zona del país, con esta información se determinaron las lluvias máximas utilizadas para las simulaciones con la aplicación HEC-HMS.

En la Figura 4 se muestra la ubicación de las estaciones dentro del área de la cuenca del río Unare.



Figura 4 Ubicación de las estaciones pluviométricas en la cuenca del río Unare.

Las informaciones correspondientes a las características de las estaciones ubicadas dentro del área de la cuenca del río Unare se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1 Características de las Estaciones Pluviométricas

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	SERIAL	TIPO
<i>B. de Uchire</i>	10 08' 48"	65 25'00"	AN01680P1	Pluviométrica
<i>Clarines</i>	09 57'50"	65 09'50"	AN02608AP1	Pluviométrica
<i>Carito</i>	09 47'07"	64 47'07"	AN02722AP1	Pluviométrica
<i>A.Barcelona</i>	09 27'5"	64 49'00"	AN01755AP1	Pluviométrica
<i>Pariaguan</i>	08 50'43"	64 42'59"	AN03712AP1	Pluviométrica

Fuente: Elaboración Propia

Información Hidrométrica

También el INAMEH suministró la información de los caudales máximos instantáneos medidos en las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca y se utilizaron para validar la información generada por los programas HEC-HMS.

Se utilizaron datos suministrados por el Centro de Investigaciones Hidrológicas Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) correspondientes a mediciones de escorrentía realizadas en dos secciones transversales del río utilizando un correntómetro de copas marca Gurley 626, con el cual se obtiene la velocidad del cauce, en las secciones seleccionadas.

Las secciones aforadas del río se muestran en la Figura 5 correspondientes a puente Clarines y puente Zaraza.



Figura 5 Ubicación de las estaciones de aforo. Nota: Google Earth. (2015)

En la Figura 6 puede observarse el momento de la colocación del correntómetro al cauce del río, y se visualiza el puente ubicado en Clarines donde se hizo el aforo.



Figura 6 Zona de medición ubicada en puente Clarines

En la Figura 7 se puede observar el otro punto de aforo ubicado en otro puente encima del río Unare es puente Zaraza.



Figura 7 Zona de medición ubicada en puente Zaraza.

Adicional a la información correspondiente a los aforos de las secciones transversales del río, también se contaba con los datos de altura que alcanzaba el agua medidos por un sensor de nivel colocados en los puentes y que permitía el monitoreo instantáneo del nivel del agua, en la Figura 8 se observa el sitio de ubicación de los sensores de nivel, cuyas mediciones se utilizaron para construir una curva de caudal vs altura, conocida como curva de gastos.



Figura 8 Ubicación de los sensores de nivel en los puentes Zaraza y Clarines.

Mapa de Uso de la Tierra y Tipo de Suelos

La información correspondiente al uso de la tierra y tipo de suelo fue obtenida del manual “Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001”, en este documento se describe la metodología para definir las regiones, sub-regiones y áreas naturales del país y fue obtenido a través del Ministerio Del Poder Popular Para El Ambiente y Los Recursos Naturales Renovables (MPPARN), con esta información se determinó el número de curva CN parámetro necesario para la simulación en HEC-HMS.

3^{ra} Etapa Procesamiento de Datos:

Objetivo 2: Determinación de los parámetros de los modelos determinísticos basados en proceso lluvia-escorrentía

En esta etapa se procesaron los datos obtenidos utilizando el sistema de modelaje hidrológico (HEC-HMS) y luego se simuló el proceso lluvia-escorrentía de la cuenca, utilizando los diferentes paquetes que posee este software.

Se hizo mediante la calibración de los modelos y la obtención de parámetros o variables incluidas en el proceso como la magnitud de la lluvia ocurrida, y la escorrentía representada por el caudal asociada a la precipitación.

Con los resultados obtenidos de la calibración se simularon los procesos de lluvia-escorrentía mediante las herramientas HEC obteniéndose gráficos

e información que permite la elaboración de mapas de planicies de inundación de la cuenca en estudio.

La metodología comprende dos etapas básicas, la primera corresponde al componente hidrológico y la segunda al componente hidráulico.

1. Componente Hidrológico

Para la realización del estudio hidrológico se siguieron los pasos identificados en la Figura 9 que se describen a continuación.

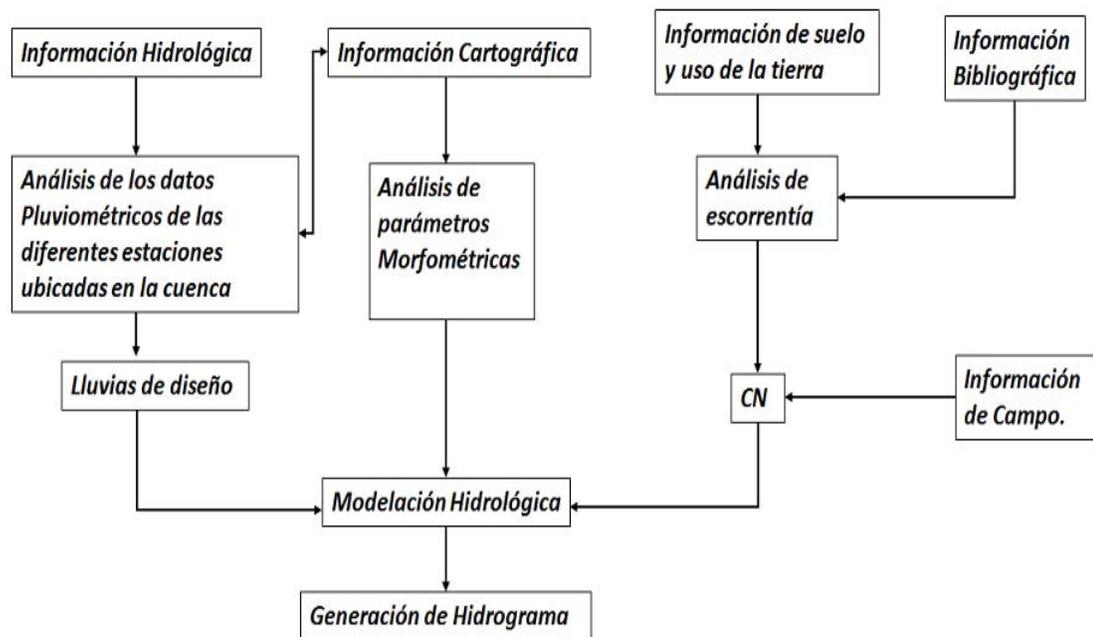


Figura 9 Metodología componente hidrológico.

El movimiento del agua dentro de la cuenca es una función compleja y condicionada por las características fisiográficas de esta. El área, el tipo y

uso del suelo, la posición y orientación, la forma, la pendiente, la elevación y la red de drenaje son las principales características fisiográficas de una cuenca y son las características físicas del territorio asociadas a los procesos de transferencia y almacenamiento del ciclo hidrológico.

Construcción del modelo digital de elevaciones del terreno.

Antes de comenzar el trabajo con la extensión HEC-GEO-HMS se necesita un modelo digital de elevaciones (MDE) ya que este tiene información suficiente para definir las propiedades de la red de drenaje superficial y de la cuenca hidrológica.

Este proceso de crear el modelo de elevación del terreno en formato Grid, se realizó mediante la digitalización de las cartas topográficas en escala 1:25000 suministradas por el Instituto Geográfico Simón Bolívar, con el uso del software ArcGis- ArcMap 10.

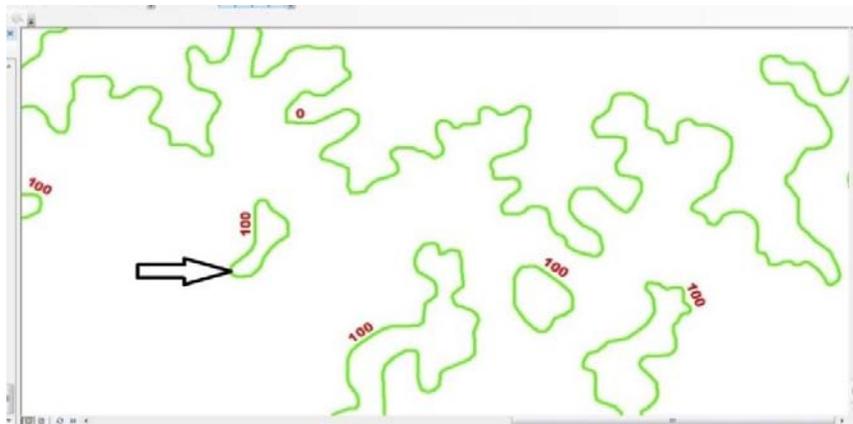


Figura 10 Digitalización de curvas de nivel.

Una vez digitalizadas las curvas de nivel se crea un nuevo proyecto en Arc-Gis 10, y se añade el shapefile creado para la digitalización de la

cartografía que representa las curvas de nivel que conforman la topografía de la cuenca del Río Unare.

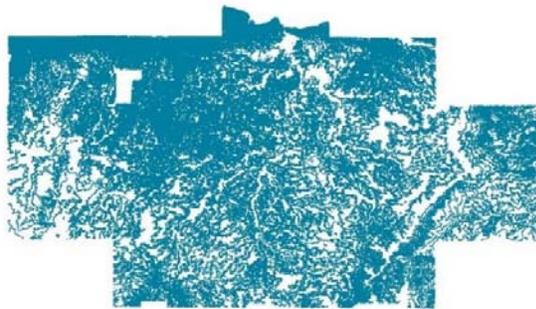


Figura 11 Archivo de curvas de nivel cargadas en ArcMap.

A partir de este shapefile se utiliza un método de interpolación TIN (Triangulación de Redes Irregulares) para interpolar y obtener información entre las variables. Este TIN creado a partir de las curvas de nivel se referencia espacialmente con la canoa UTM 20, se convierte en un archivo raster y se observa en la Figura 12.

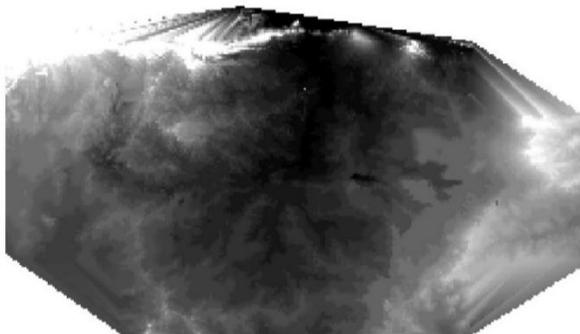


Figura12 Resultado de la creación del RASTER.

Con el uso de la extensión HEC-GEO-HMS se puede extraer información automática y delinear líneas de flujo y subcuencas a partir del DEM, muchas

veces es necesario modificar el modelo digital de elevación original, frecuentemente se requiere esta modificación en zonas llanas, en las cuales la preparación del DEM es mucho más complicada que en zonas de pendiente. Este procedimiento consiste en imponer la red de drenaje al DEM, de manera que cuando se realice el análisis de flujo, se le fuerce a seguir por allí hasta el punto de salida (Pedraza, 2005). El DEM sin depresiones se crea relleno de las depresiones, es decir, aumentando la cota de las celdas que estén rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta manera el agua podrá fluir de una celda a otra sin “estancarse” (Nania, 2007).

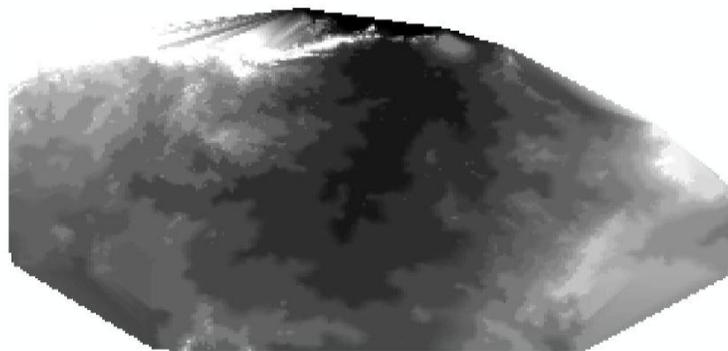


Figura 13 Resultado del llenado de Sumideros.

Procesamiento del Terreno

A continuación se debe hacer un procesamiento del terreno (“Terrain Preprocessing”) donde se obtienen 8 conjuntos de datos que describen los patrones de drenaje de la cuenca y permiten la delineación de las subcuencas y la red de drenaje.

Flow direction: Define la dirección de la mayor pendiente.

Flow Accumulation: Determina el número de celdas que drenan a cada celda.

Stream Definition: Clasifica todas las celdas con flujo procedente de un número de celdas mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje.

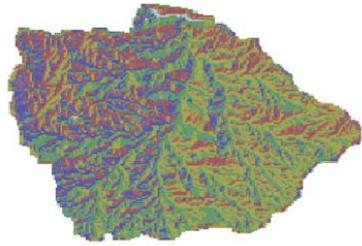
Stream Segmentation: Divide los cauces en segmentos.

Watershed Delineation: Define una cuenca para cada segmento de cauce.

Watershed Polygons: Convierte las subcuencas de formato grid a formato vector.

Watershed Aggregation: Une las subcuencas que descargan a cada confluencia de cauces.

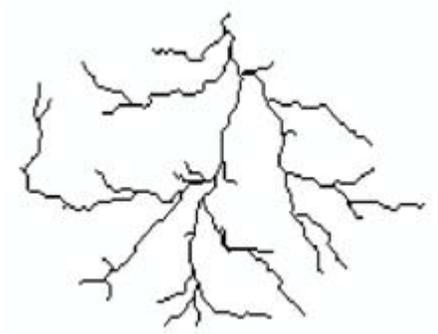
En la Figura 14 se observan las imágenes obtenidas con el procesamiento del terreno.



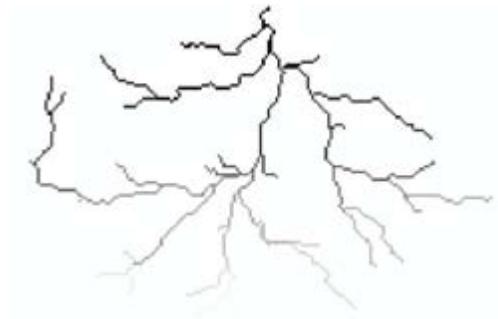
A) Dirección de Flujo



B) Acumulación de Flujo



C) Definición de las corrientes corrientes



D) Segmentación de las corrientes



E) Delimitación de las subcuencas



F) Procesamiento de polígonos

Figura 14 Conjunto de datos obtenidos en el procesamiento del terreno.

Configuración del Modelo Hidrológico.

Partiendo del menú “HMS Project Setup” se extrae la información necesaria de la base de datos y se crea un proyecto HMS. Se trata de la especificación de puntos de control a la salida de la cuenca, los cuales definen los tributarios de la misma. El proyecto generado muestra la cuenca completa del Río Unare.

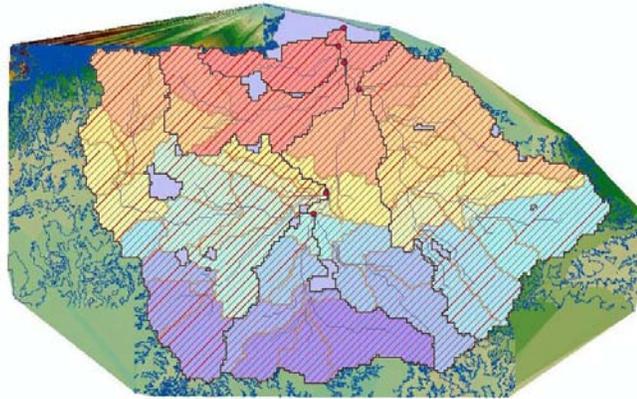


Figura 15 Esquema del proyecto de la cuenca del río Unare HMS.

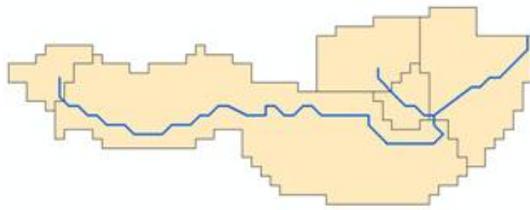
Una vez obtenida la red hídrica se procedió a efectuar una división hidrográfica, específicamente en subcuencas, correspondientes a los ríos tributarios más importantes de la cuenca en estudio, las cuales se identifican como subcuenca Ipire, subcuenca Guere, subcuenca Guanape, subcuenca Guaribe, y subcuenca Tamanaco.



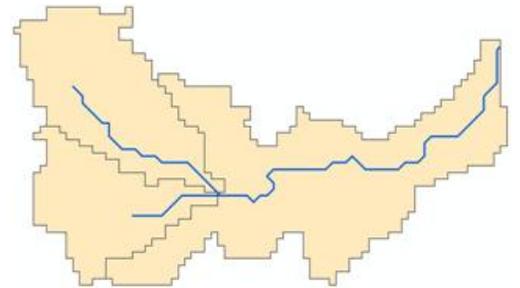
A) Subcuenca Ipire.



B) Subcuenca Guere.



C) Subcuenca Guanape.
Guaribe.



D) Subcuenca



E) Subcuenca Tamanaco.

Figura 16 Conjunto de datos obtenidos del procesamiento de la cuenca

Procesamiento de la Cuenca.

En esta etapa el programa determina las características físicas de la cuenca dentro del menú “Basin Proccesing” que permite unir y subdividir subcuencas, así como delinear nuevas subcuencas.

Las características físicas que se determinan con este menú son: longitud del cauce (River Lenght), pendiente de los cauces (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), ruta de flujo centroidal (Centroidal Flow Path).

El procesamiento de la cuenca genera tablas que pueden observarse a continuación.

RivLen	arcid	grid_code	from node	to node	Shape Length	HydroID	NextDownID	DrainID	Slo	ElevUP
15386.571458	1	1	1	2	15386.571458	403	-1	412	0.0026	40
6105.693898	2	2	3	1	6105.693898	404	403	413	0	40
16812.632678	3	3	4	1	16812.632678	405	403	414	0.002379	80
7988.632678	4	5	5	4	7988.632678	406	405	416	0	80
6428.755119	5	6	6	5	6428.755119	407	406	417	0	80
26912.642915	6	4	7	4	26912.642915	408	405	415	0.000014	80.36338
45095.908271	7	9	8	5	45095.908271	409	406	420	0.000887	120
20790.714373	8	7	9	6	20790.714373	410	407	418	0.001924	120
14055.132678	9	8	10	6	14055.132678	411	407	419	0	80

Figura 17 Resultado del cálculo de la longitud de los ríos.

También el programa determina la diferencia de elevación entre los tramos de ríos aguas arriba y aguas abajo determinando con ese cálculo las pendientes de los mismos como se puede observar en la siguiente Figura 18.

RivLen	Slp	ElevUP	ElevDS	Ch
15386.571458	0.0026	40	0	<Nu
6105.693898	0	40	40	<Nu
16812.632678	0.002379	80	40	<Nu
7988.632678	0	80	80	<Nu
6428.755119	0	80	80	<Nu
26912.642915	0.000014	80.36338	80	<Nu
45095.908271	0.000887	120	80	<Nu
20790.714373	0.001924	120	80	<Nu
14055.132678	0	80	80	<Nu

Figura 18 Resultado del cálculo de las pendientes de los ríos.

La pendiente de la cuenca se obtiene mediante la función *basin slope* dato que se requiere para determinar el tiempo de concentración.

BasinSlope	Pcttmp	InitAbst	BasinCN
0.560186	24.139786	75	74.97683
0.229949	30.276382	87.845474	62.345905
0.325868	33.588039	91.985046	58.248596
0.242041	35.093666	93.867081	56.194923
0.242041	39.664806	99.581009	50.896961
0.242041	40	100	50.477734
0.403141	39.865318	99.83165	50.564884
0.383534	40.047283	100	50.477734
0.345652	28.899277	91.510834	62.376747

Figura 19 Resultado del cálculo de las pendientes de la cuenca.

La longitud de los ríos tributarios también puede ser calculada por el programa en la Figura 20 podemos ver la tabla que se obtiene como resultado de esta paso.

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

Figura 20 Resultado del cálculo de la longitud del tributario más largo

Con el método de centro de gravedad de la cuenca y la herramienta *basin centroid* se ubica el centroide de la cuenca generándose el resultado mostrado en la Figura 21 y en la Figura 22 se muestra la ubicación de los centroides en cada subcuenca.

OBJECTID *	Shape *	DrainID	Elevation	Elevation HMS
1	Point	412	40	40
2	Point	413	80	80
3	Point	414	74.618256	74.618256
4	Point	415	120	120
5	Point	416	80	80
6	Point	417	80	80
7	Point	418	120	120
8	Point	419	120	120
9	Point	420	120	120

Figura 21 Resultado de la elevación del centroide de la subcuenca.

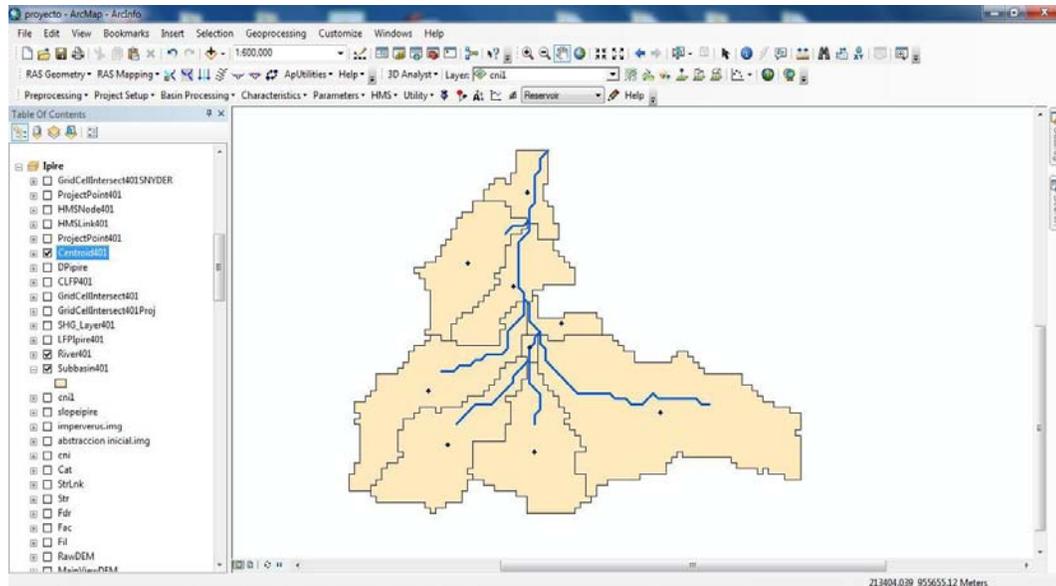


Figura 22 Resultado de centroide de la subcuenca Ipire.

Determinación de procesos hidrológicos.

A partir del menú Hydrologic Parameters se pueden elegir entre los métodos disponibles de modelación los que se van a usar en la creación del proyecto en HMS. En este programa los elementos y procesos asociados se muestran en la siguiente tabla 2 correspondiente a los métodos para cálculos en subcuencas y canales.

Tabla 2 Métodos para cálculos de subcuencas y canales.

Elemento	Tipo de Calculo	Método
Subcuenca	Perdidas	Déficit y razón constante (DC)
		Exponencial
		Green y Ampt
		DC por grilla
		SCS CN por grilla
		SMA por grilla
		Inicial y razón constante
		Número de curva (CN) del Soil Conservation Service
		Smith Paralange
		Conteo de Humedad del suelo (SMA)
		Esguerrimiento en la cuenca
	Onda cinemática	
	Clark modificado	
	Hidrograma unitario del Soil Conservation Service	
	Hidrograma unitario de Snyder	
	Curva S especificada por el usuario	
	Hidrograma unitario especificado por el usuario	
	Flujo Base	Recesión delimitada
		Mensualmente constante
Reservorio lineal		
Aproximación no lineal de Boussinesq		
Recesión		
Canal	Transito	Onda cinemática
		Retraso
		Puls modificado
		Muskingum
		Muskingum-Cunge
		""STRADDLE STAGGER""
	Perdidas / Ganancias	Constante
		Percolación

Fuente: Manual para el uso del modelo Hidrológico HEC-HMS. UCV

En esta investigación se seleccionó como método para el cálculo de pérdidas el Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service, como método de transformación se seleccionó el Hidrograma Unitario de Snyder,

como Flujo Base se seleccionó el método de mensualmente constante, y por último para el modelo de tránsito se utilizó el modelo de Muskingum.

Método del Soil Conservation Service (SCS).

Este método fue desarrollado por hidrólogos del US Soil Conservation Service (1972), sobre la base de numerosos datos experimentales en cuencas con áreas de hasta 2600 km² para estimar la escorrentía directa en función de la precipitación, de las condiciones hidrológicas de la cuenca y de las características del suelo.

El método distingue tres condiciones de humedad antecedente:

Condición I = seca, Condición II = media y Condición III = húmeda.

Cuatro grupos de suelo de acuerdo con su permeabilidad, es decir, su potencial de escorrentía: Condición A = Bajo potencial de escorrentía, alta tasa de infiltración; Condición B = moderadamente bajo potencial de escorrentía; Condición C = Moderadamente alto potencial de escorrentía; y Condición D = Alto potencial de escorrentía, es decir, tasa de infiltración muy lenta.

El procedimiento calcula la escorrentía mediante la siguiente relación:

$P_e = [P - 0.2 S]^2 / [P + 0.8 S]$ donde P_e es la precipitación efectiva o escorrentía directa en mm; P es la precipitación total en mm y S es una medida de la infiltración potencial en mm.

La principal limitación del modelo del SCS lo constituye la estimación del parámetro S, el cual depende de factores edáficos, condiciones de la superficie y el grado de humedad antecedente. El SCS, desarrolló la siguiente expresión para estimar S en base al denominado *número de curva* CN:

$S = 25.4 [(1000/CN) - 10]$ donde S se expresa en mm y CN se encuentra tabulado para cada tipo de condición hidrológica en función del uso y para cada grupo de suelo. La condición de humedad más usual es la II, por lo que en la Tabla 3 se presentan los valores de CN para dicha condición, en función del uso de los terrenos y para cada grupo de suelo.

Tabla 3 Número de Curva CN de escorrentía para usos agrícola, urbano y suburbano.

Condición II de humedad antecedente		Grupo de Suelo			
Uso de la tierra		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamiento Conservacional	72	81	88	91
	Con tratamiento Conservacional	62	71	78	81
Pradera o pastizal	Condición mala	68	79	86	89
	Condición buena	39	61	74	80
Sabanas	Condición buena	30	58	71	78
Bosques	Ralo, Cobertura, pobre	45	66	77	83
	Cobertura buena	25	55	70	77
Espacios abiertos, jardines, parques, campos de golf, Cementerios ,etc.					
Condición buena	Cobertura de grama de 75% o más al área	39	61	74	80
Condición regular	Cobertura de grama de 50% a 75% del área	49	69	79	84
Áreas comerciales y de negocios (85% impermeable)		89	92	94	95
Áreas industriales (72% impermeables)		81	82	91	93
Residencial					
Parcela promedio	% de Impermeabilidad				
500 m2 o menos	65	77	85	90	92
1000 m2	38	61	75	83	87
1500 m	30	57	72	81	86
2000 m	25	54	70	80	85
4000 m	20	51	68	79	84
Estacionamientos, parcelas, techos, autopistas, etc.		98	98	98	98
Calles y caminos	Pavimentados con cunetas y Alcantarillas	98	98	98	98
	Granzón	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89

Fuente: Guevara y Cartaya (2004) p. 157.

Los valores de CN para las otras condiciones también pueden estimarse en función de los valores CN de la condición II de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$CN I = [4.2 CN II]/[10 - 0.058 CN II]$$

$$CN III = [23 CN II]/[10 + 0.13 CN II]$$

Donde CN I es la condición de humedad antecedente seca; CN II es la condición de humedad antecedente normal y CN III es la condición de humedad antecedente húmeda.

Las condiciones de humedad antecedente se pueden establecer sobre la base de la precipitación acumulada durante los cinco días previos al evento que se analiza, de acuerdo con las siguientes magnitudes:

- Para la condición I : 0 - 35 mm
- Para la condición II: 35 - 50 mm
- Para la condición III: más de 50 mm.

Hidrograma Unitario de Snyder:

En 1938, Snyder publicó una descripción de un hidrograma unitario paramétrico, donde se relacionaron parámetros del hidrograma a partir de las características de la cuenca. Snyder seleccionó el Lag (retraso), el caudal pico y tiempo base total como las características críticas del hidrograma

(Felman, 2000), definió el hidrograma unitario como uno cuya duración de lluvia, (t_r), está relacionada al t Lag de la cuenca, (T_p), por:

$$T_p = 5,5 t_r.$$

El t Lag es la diferencia en el tiempo del pico del hidrograma unitario y el tiempo asociado con el centroide del hietograma de lluvia excedente.

Snyder propuso la siguiente relación:

$$T_p = C C_t (L L_c)^{0.3}$$

Donde:

C_t : es el coeficiente de la cuenca

L : es la longitud del cauce principal

L_c : longitud del cauce principal a un punto próximo al centroide de la cuenca.

C : constante de conversión

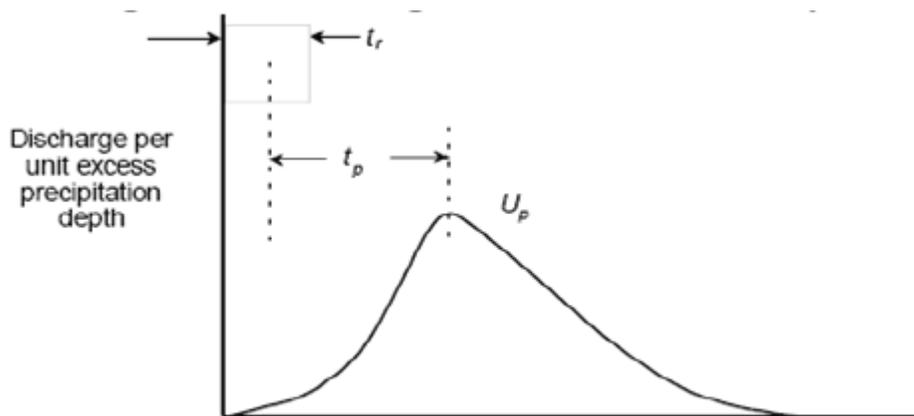


Figura 23 Hidrograma Unitario de Snyder

Caudal base constante, con variación mensual:

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

Para ingresar los datos al programa se realizó para cada subcuenca con su respectivo hidrograma, tomado mediante el área de drenaje de cada una de ellas mensualmente dividido entre el número de días que tiene cada mes.

Modelo de Transito de Muskingum:

La transformación que sufre el hidrograma a lo largo de un tramo de un cauce se puede resumir en dos puntos que podemos observarlos en la Figura 23.

- Un aumento del tiempo punta del hidrograma de salida del tramo con respecto al hidrograma de entrada.
- Una disminución el caudal punta en el mismo sentido.

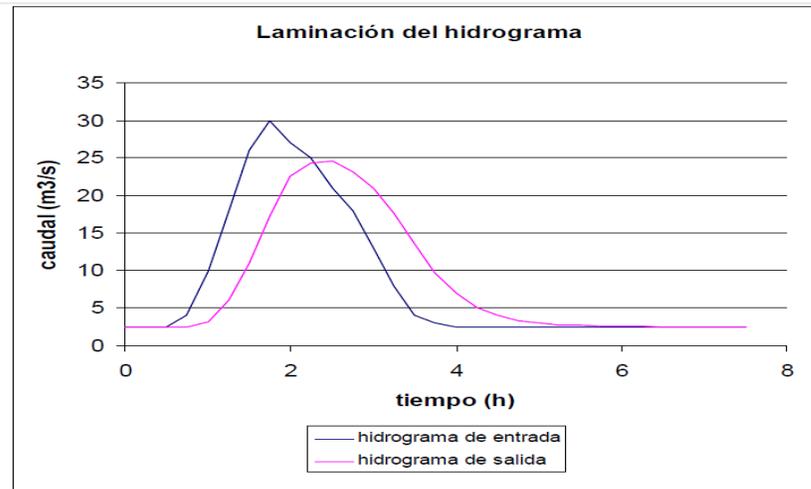


Figura 24 Laminación del hidrograma.

Esto se debe a una variación en el almacenamiento de agua en el tramo, que atenúa la onda de avenida de una forma parecida a como se produce en un embalse. Partiendo de la ecuación de continuidad para el movimiento variable.

$$dS/dt = I - O$$

Donde:

dS: es el incremento del almacenamiento del agua en el tramo.

dt: es el intervalo de tiempo

I: caudal entrante en el tramo

O: caudal saliente del tramo.

Si se conoce el hidrograma de entrada, es decir I a lo largo del tiempo t, se puede estimar el hidrograma de salida en función de las características del cauce. El método de Muskingum propone la siguiente expresión:

$$S = K. (X.I + (1-X) .O)$$

Donde:

K: es el tiempo estimado que tarda la onda de avenida en recorrer el tramo (en horas).

X: es el coeficiente de forma del cauce cuyo valor oscila entre 0,0 y 0,5.

Si se estudian dos momentos t_1 y t_2 separados un intervalo de tiempo t ($t = t_2 - t_1$) se presenta la siguiente situación:

$$S_1 - S_2/t = I_1 + I_2/2 - O_1 + O_2/2$$

Aplicando la ecuación de Muskingum:

$$S_1 = K.(X.I_1 + (1- X).O_1)$$

$$S_2 = K. (X.I_2 + (1- X).O_2)$$

Sustituyendo S_1 y S_2 en la ecuación inicial, se puede despejar O_2 en función de I_1 , I_2 , y O_1 datos conocidos y en consecuencia se obtiene:

$$O_2 = c_1.I_1 + c_2.I_2 + C_3.O_1$$

$$C_1 = 2.K.X + t / 2.K. (1-X) + t$$

$$C_2 = - 2.K.X + t / 2.K. (1-X) + t$$

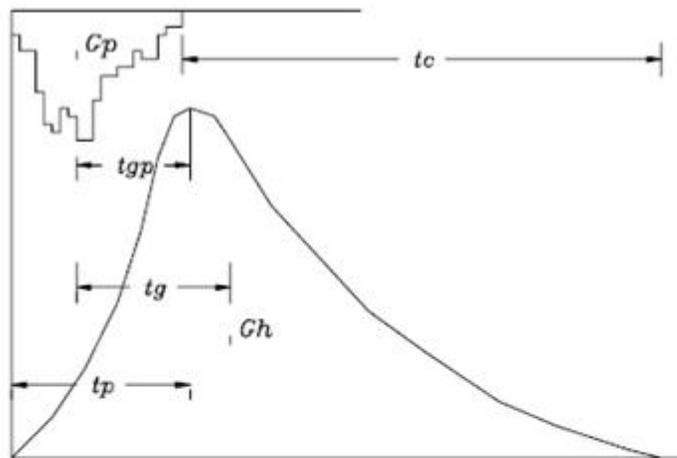
$$C_3 = - 2.K. (1-X) - t / 2.K. (1-X) + t$$

Donde $C1+C2+C3= 1$

Determinación de los parámetros hidrológicos

La determinación de los parámetros hidrológicos obedece a la necesidad de ordenar de manera apropiada la información que se necesita para el cálculo de los caudales máximos esperados. Para lograr este objetivo se procedió a la determinación de los siguientes parámetros: tiempo de viaje (t_v), tiempo de concentración (t_c), tiempo de retardo (t_l), retención potencial máxima (S), índice de abstracción inicial (I_a), parámetros de K y X para el tránsito.

En la Figura 24 se pueden observar los distintos tiempos que se consideran al analizar la respuesta de una cuenca, en forma de caudales al ocurrir una precipitación determinada el más significativo de todos es el tiempo de concentración (t_c), por ser el que se utiliza para caracterizar la respuesta de una cuenca ante episodios aislados de lluvia.



- Gp, centro de gravedad de la precipitación neta
- Gh, centro de gravedad del hidrograma
- tc, tiempo de concentración; tiempo que tarda en llegar, a la sección de salida de la cuenca, el agua que cae en el punto hidrológicamente más alejado.
- tgp, tiempo que transcurre entre el centro de gravedad de la precipitación y el centro del hidrograma.
- tg, tiempo que tarda en alcanzarse el caudal punta.
- tp, tiempo entre el centro de gravedad de la precipitación y el momento del máximo caudal (caudal punta).

Figura 25 Tiempos característicos de respuesta de una cuenca

Fuente: José Robredo

En las cuencas naturales se ha comprobado que la relación entre t_g y t_c oscila poco y su valor es cercano a 0,45. ($t_g / t_c = 0,45$), y la relación entre t_{gp} y t_c oscila en torno a 0,35.

Tiempo de concentración: es el tiempo que la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de la cuenca toma en llegar a una sección determinada de dicha corriente. En esta investigación se escogió la siguiente fórmula:

Formula de Kirpich o de California donde: L es la longitud del cauce principal, en km y H es el desnivel correspondiente a L en mts. La relación entre tgp y tc oscila en torno a 0,60.

$$t_c = \left(\frac{0.87 \cdot L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Tiempo de retardo:

Es el tiempo transcurrido entre el centro de masas de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma de escurrimiento directo.

$$T \text{ Lag} = 0.35 T_c$$

Estimación del Número de Curva (CN)

El número de curva CN está en función de la permeabilidad de la superficie y se utiliza para estimar la escorrentía directa generada por una lluvia de interés particular. La selección del valor de CN depende fundamentalmente de las características de la cuenca de drenaje, como son: la condición antecedente de humedad del suelo (CHA), uso de la tierra y condiciones del suelo (grupo hidrológico).

Una vez delimitado el parteaguas o frontera de las subcuencas se identificaron los tipos y usos de suelo que existían dentro de éstas para calcular un número de curva hidrológico parcial. Posteriormente, los números de curvas parciales existentes en las subcuencas se ponderan en relación al área ocupada; esto permitió determinar los correspondientes CN promedios asociados a cada subcuenca; RPTU representa las áreas de los ríos pequeños tributarios del río Unare.

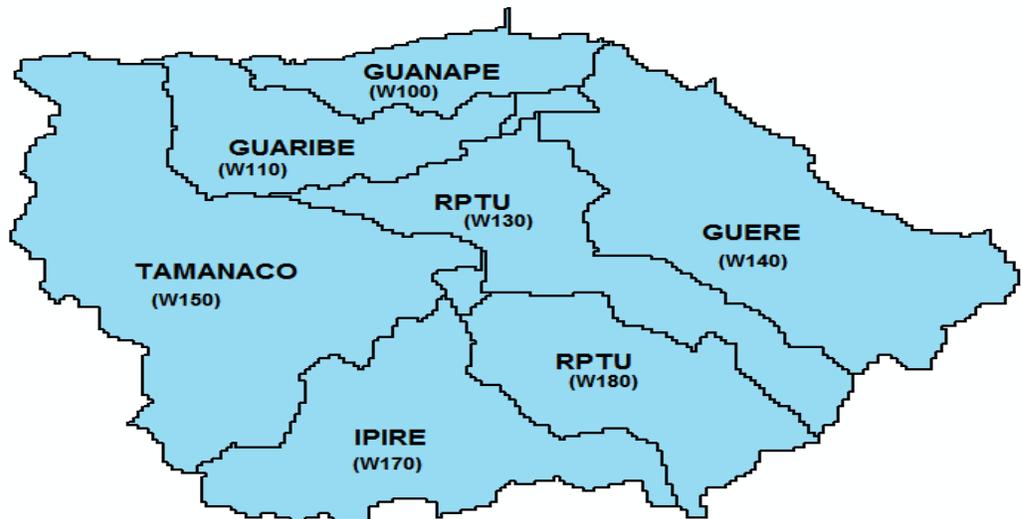


Figura26 Sub cuencas del Río Unare.

El método para determinar el número de curva (NC) que se utilizó fue el SCS este parámetro se obtiene a partir de la relación del tipo de suelo y el uso del suelo de la cuenca y está presentado en tablas publicadas por el SCS. La base de datos usada para el procesamiento del tipo de suelo se tomó del documento “Sistemas Ambientales Venezolanos. Proyecto Ven/79/001” que contiene la metodología para definición de regiones, sub-regiones y áreas naturales y fue suministrado por el MARNR, los datos para el uso del suelo se crearon a partir de fotografías aéreas desde Google Earth y aportes de datos por parte de la división de Sistemas de Información Geográfica de los Estados Guárico y Anzoátegui, con la ayuda del software ArcGis y con la técnica de superposición de mapas se relacionaron obteniéndose el mapa de NC, se crearon tablas de búsqueda de CN para las diferentes condiciones de humedad del suelo seca (CNI), normal (CNII), y húmeda (CNIII) en un archivo de Microsoft Excel, para la asignación de los valores de CN a cada tipo de suelo A,B,C,D se usaron tablas desarrolladas por el Servicio de Conservación de suelos (SCS).

El resultado de la aplicación de esta herramienta es el cuadro que muestra la Figura 26.

CODIGO UT	Shape Length	Shape Area	Landuse	LUValue	PctA	PctB	PctC	PctD	CN
AGRICOLA	23353.288994	19987338.33601	1	1	5	15	40	40	94.000734
RESIDENCIAL PERMEABLE	4284.705093	1257557.487077	5	5	5	15	40	40	88.775659
SABANA	6863.680989	3140601.63116	2	2	5	15	40	40	83.488569
BOSQUE	51166.118814	50723070.304864	3	3	5	15	40	40	82.353528
AGRICOLA	13513.307148	9523261.329319	1	1	5	15	40	40	94.000734
SABANA	56147.15437	85740907.652808	2	2	5	15	40	40	83.488569
RESIDENCIAL PERMEABLE	5715.269948	2393956.102497	5	5	5	15	40	40	88.775659
BOSQUE	33775.631848	28826192.16743	3	3	5	15	40	40	82.353528
SABANA	44518.780358	49154315.835073	2	2	5	15	40	40	83.488569
AGRICOLA	1541490.615409	13936575196.0957	1	1	5	15	40	40	94.000734
AGRICOLA	31453.782763	23394111.698464	1	1	5	15	40	40	94.000734
AGRICOLA	11814.932681	8705364.489983	1	1	5	15	40	40	94.000734

Figura 27 Polígono de número de curva.

Importar el Modelo de la cuenca hacia el software HEC-HMS.

Una vez creado el proyecto en HMS con la extensión ya se puede importar dicho proyecto hacia el HEC-HMS para la modelación de la cuenca que está dividida en subcuencas se hará el modelaje para todas las subcuencas.

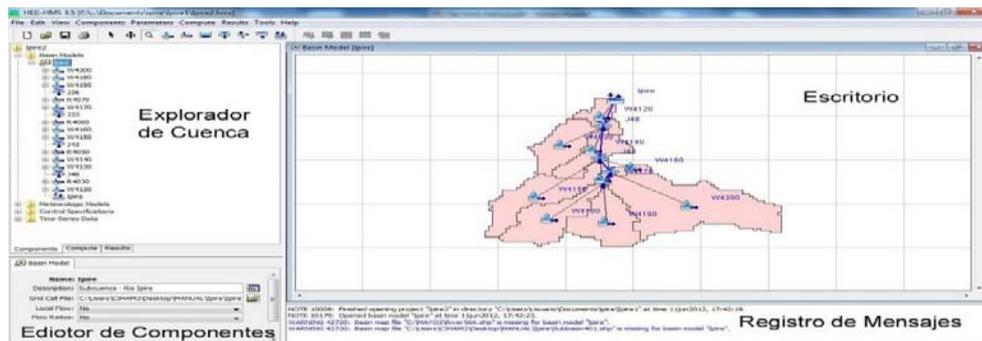


Figura 28 Simulación del proyecto importado desde HEC-GeoHMS.

El procedimiento del modelaje de la cuenca es el principal componente del proyecto, por que convierte condiciones atmosféricas en caudal en

lugares específicos de la cuenca. Se deben seleccionar los métodos de pérdida, en este proyecto se seleccionó el Número de Curva SCS, como método de transformación se seleccionó el Hidrograma Unitario de Snyder para la transformación de lluvia-escorrentía, como método de flujo base se seleccionó constante mensual, para el modelo de tránsito se seleccionó el modelo de Muskingum.

Creación del Modelo Hidrológico.

La creación del modelo hidrológico requiere de series temporales de datos de precipitación en la cuenca, a partir del menú de componentes seleccionando el administrador de series de tiempo se puede escoger la opción Precipitación Gages (pluviómetros) que permite introducir la información correspondiente a datos de lluvia.

En este proyecto la selección se hizo a partir de los datos suministrados por INAMEH con mediciones realizadas cada 5 minutos con los pluviómetros ubicados en las estaciones ubicadas en la cuenca del Río Unare, se seleccionaron eventos de duración una hora, dos horas, y tres horas entre el grupo de datos correspondiente a los años 2010- 2014.

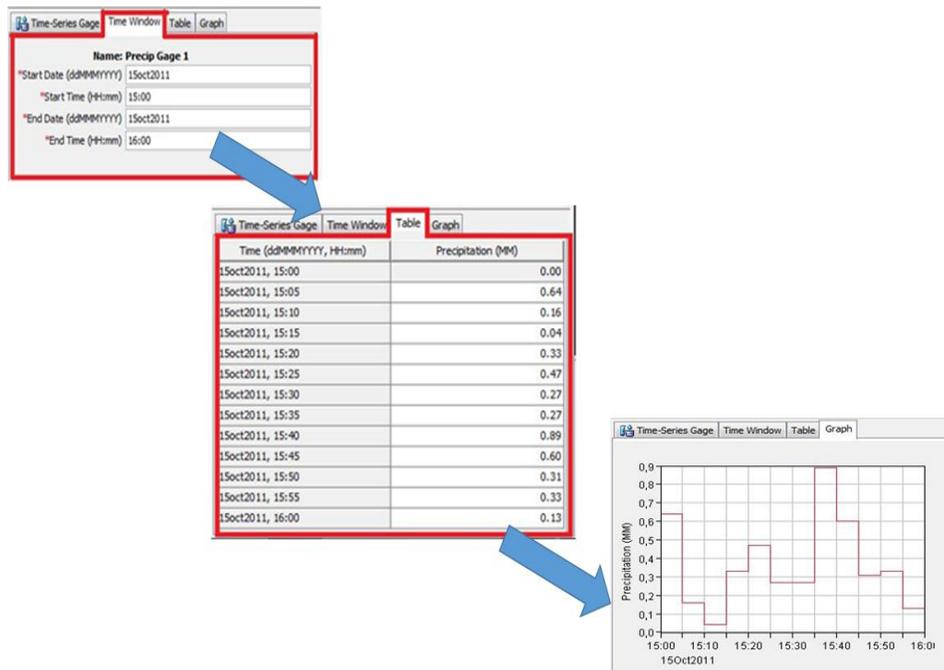


Figura 29 Creación de pluviómetro

Para obtener el resultado o descarga de estos datos introducidos se selecciona en el menú Time-Series-Data Manager (Administrador de series de tiempo), y se selecciona medidor de descarga y se puede obtener la tabla de valores de descarga y el hidrograma resultante de la descarga.

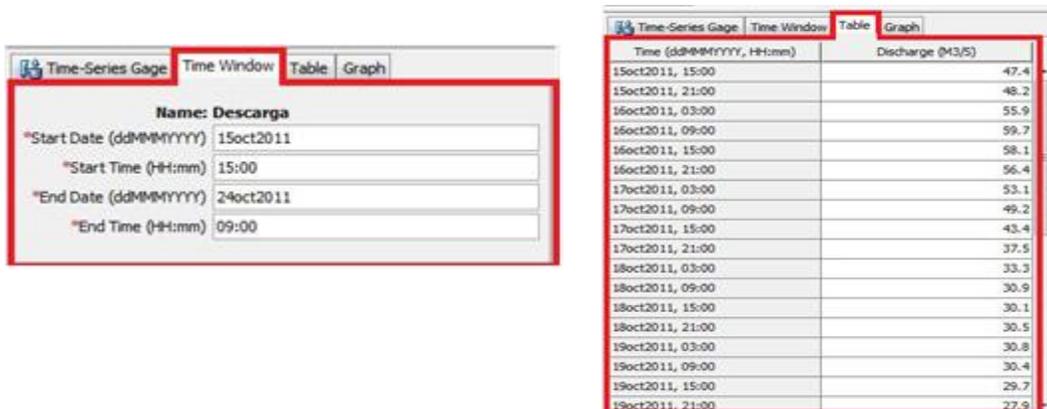


Figura 30 Editor de fecha y hora de la descarga, y tabla de valores de la descarga.



Figura 31 Hidrograma correspondiente a la descarga observada con los datos introducidos

Creación del Modelo Meteorológico.

El propósito de la creación de este modelo es preparar las condiciones meteorológicas para las subcuencas, una vez caracterizada la cuenca deberemos indicar la precipitación que caerá sobre ella en cada una de las avenidas a simular, este aspecto se concreta en HEC-HMS en el modelo meteorológico.

Las especificaciones de control definen el período de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. En el caso del tiempo final es conveniente terminar unas horas después de que cese la lluvia para permitir que el caudal generado llegue a la desembocadura de la cuenca.

Objetivo 3: Simulación de los escenarios del proceso lluvia escorrentía adaptados a la cuenca del río Unare.

La aplicación del modelo HEC-HMS para este proyecto comprende cuatro etapas básicas: la creación de un modelo de cuenca, la creación de un modelo meteorológico, la definición de especificaciones de control, y finalmente la etapa de simulación y resultados.

Modelo de cuenca. En este proyecto se seleccionó un modelo de cuenca que por defecto será el modelo de la cuenca ya realizado y fue importada, esta simulación se hizo con la **subcuenca Ipire** que usamos como modelo para desarrollar la metodología.

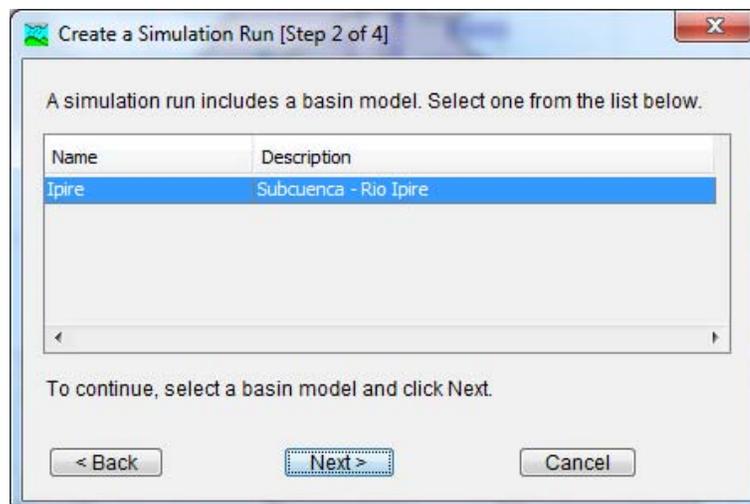


Figura 32 Asignación del modelo de cuenca a utilizar para la simulación.

Modelo meteorológico. Igualmente se seleccionó por defecto el modelo ya realizado correspondiente a la subcuenca Ipire.

Especificaciones de control. Aquí se definen los periodos a simular, los tiempos de lluvia e intervalos, en este proyecto se seleccionaron las mismas especificaciones de control ya antes seleccionadas.

Simulación y resultados. Se procede a ejecutar la simulación y se presentaran los resultados en forma de tablas y gráficos, que pueden ser visualizados como un resumen global, o de forma individual para cada subcuenca.

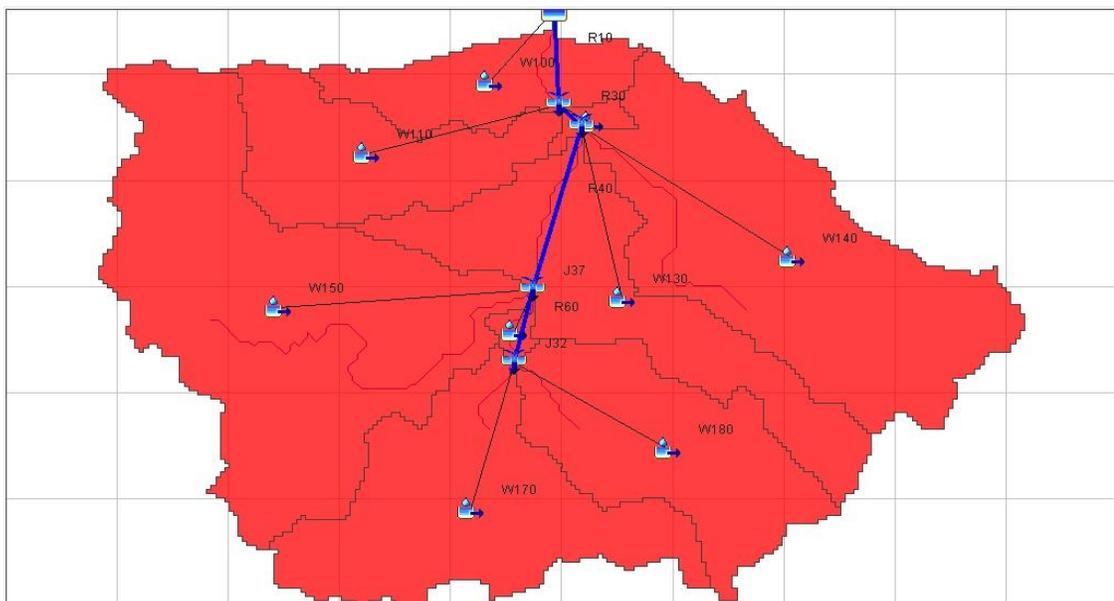


Figura 33 Esquematización de la modelación hidrológica del río Unare.

2. Componente Hidráulico

Para la realización del componente hidráulico se requiere la ejecución de diferentes pasos, mostrados en la Figura 34.

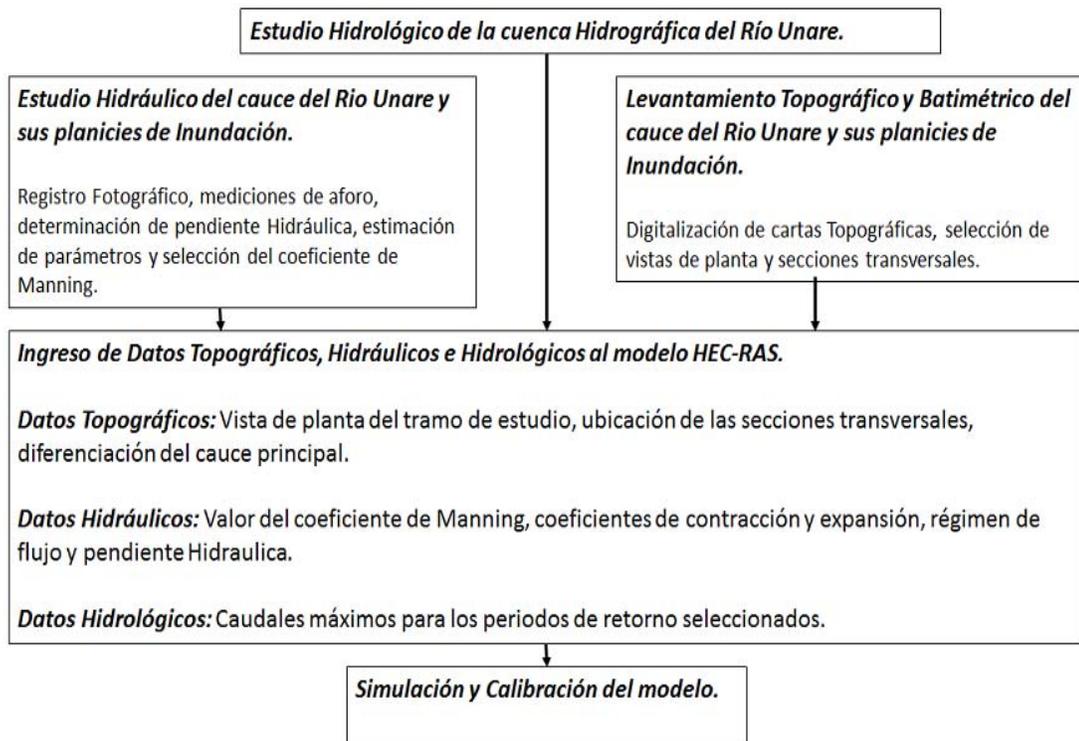


Figura 34 Metodología del Componente Hidráulico.

Levantamiento topográfico y batimétrico de la zona, en esta etapa se crean las líneas de corte de las secciones transversales del río con la herramienta (*cross-sectional cut lines*), estas secciones deben ser dibujadas 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. En este proyecto se seleccionó

1000 mt de separación entre cada sección, y 5000 mt de ancho de la sección transversal.

La Figura 34 muestra la selección de estos parámetros en el programa

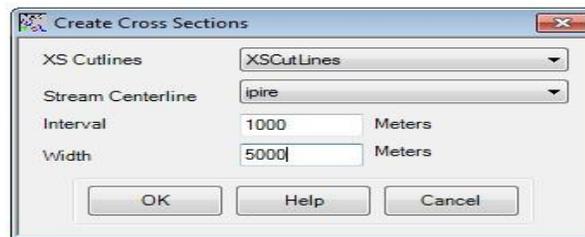


Figura 35 Selección de líneas de corte de la sección transversal.

Ingreso de datos topográficos, hidráulicos e hidrológicos al modelo HEC-RAS.

Este archivo creado con sus datos topográficos creado anteriormente es importado al programa HEC-RAS (que es un paquete integrado de programas de análisis hidráulicos, con el cual se pueden realizar cálculos de los modelos de flujo estable e inestable de las aguas, cálculos de perfil de superficies, transporte de sedimentos entre otros).

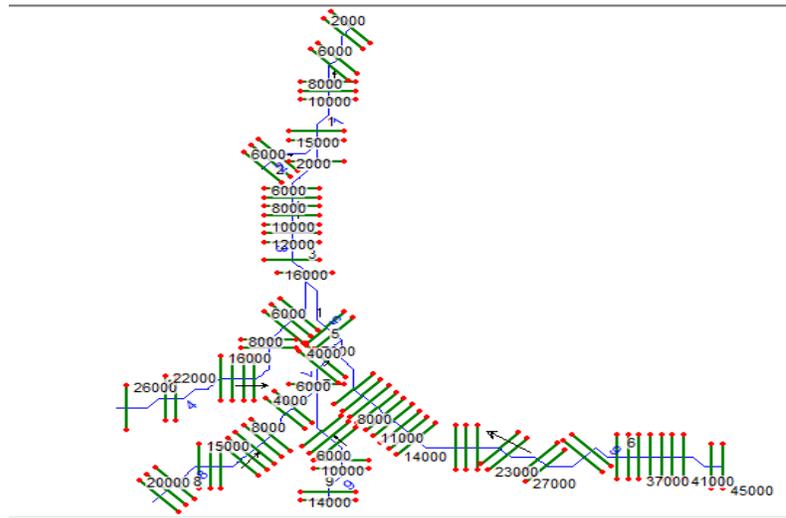


Figura 36 Archivo de importación creado por PreRAS donde se observan las secciones transversales del cauce.

Los datos hidráulicos que requiere el programa son: valor de la rugosidad o coeficiente de Manning, coeficientes de contracción y expansión, condiciones de frontera, régimen de flujo, y pendiente hidráulica.

Con respecto al coeficiente de Mannig el programa contiene un manual de referencias del programa donde se despliega una tabla de valores típicos de este factor tomado del libro “HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chown1959)”, la cual se muestra en la Fig. 37.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>			
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

Figura 37 Tabla para valores de coeficiente de Manning, (Chown, 1959).

De esta tabla se seleccionó el valor **0.05** que corresponde al factor de rugosidad para canales sin revestir en tierra, con planicies de áreas cultivadas, ríos con poca vegetación en sus márgenes con árboles y malezas.

Los valores de los coeficientes de contracción y expansión también se seleccionan de una tabla que presenta el programa en su manual de referencias donde se seleccionaron los valores de acuerdo a los siguientes criterios: se consideró un cambio gradual en las secciones transversales y las

secciones en las montañas presentan poco cambio el valor de C de 0.1 y un valor de E igual a 0.3 refleja esa situación (gradual transitions), como puede observarse en la tabla siguiente:

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

Figura 38 Tabla para seleccionar coeficientes de contracción y expansión.

Con la herramienta Cross section se pueden obtener secciones transversales del cauce como las mostradas en la Figura 38.

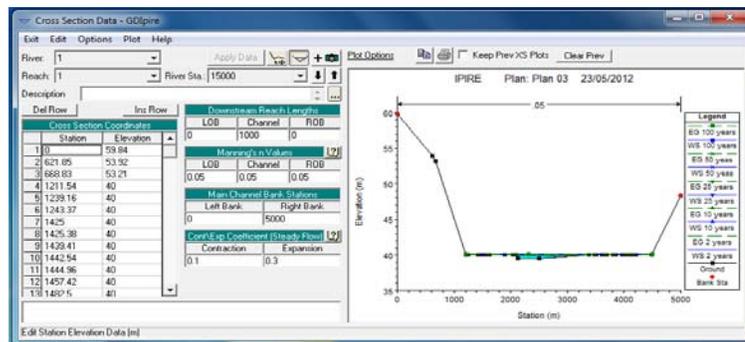


Figura 39 Sección transversal del río.

Con respecto al régimen de flujo para la simulación hidráulica del tramo en estudio se adoptó la opción de análisis de flujo permanente, el análisis de flujo permanente es apropiado para el cálculo de los perfiles de agua para flujo gradualmente variado. El modelo HEC-RAS permite manejar tanto un tramo del río como una red de tributarios. El análisis de flujo permanente tiene la posibilidad de simular perfiles de agua para regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y combinado. El procedimiento del cálculo se basa en la solución de la ecuación de la energía, a través de un proceso iterativo conocido como el método del paso estándar. En este proyecto se seleccionó régimen de flujo subcrítico. Se seleccionó la opción de profundidad crítica como condición de frontera.



Figura 40 Selección del modelo para la corrida.

Los datos hidrológicos que requiere el programa son los correspondientes a la cantidad de perfiles, así como también la selección del periodo de retorno, y la duración de la tormenta que generó la creciente, se ingresaron además los datos de los caudales picos de las crecientes generadas con el programa HEC-HMS.

4^{ta} Etapa Análisis de Resultados:

En esta última etapa se analizan los resultados obtenidos de la modelación y se logran cubrir los siguientes objetivos:

Objetivo 4: Evaluar la influencia de las manchas de inundación sobre los tramos y áreas de riesgo de potencial significativo de inundación.

Para crear los mapas o manchas de inundación es necesario trabajar con la extensión HEC-GeoRas, que crea un archivo para importar datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales, etc. Posteriormente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a Arc view y pueden ser procesados para obtener los mapas de inundación.

El procedimiento consiste en crear las superficies de agua con la herramienta (*Water Surface Generation*), se crea un archivo TIN para los perfiles correspondientes a los periodos de retorno a analizar, se eligió 2 años de periodo de retorno. La Figura 41 muestra el resultado de esta selección.

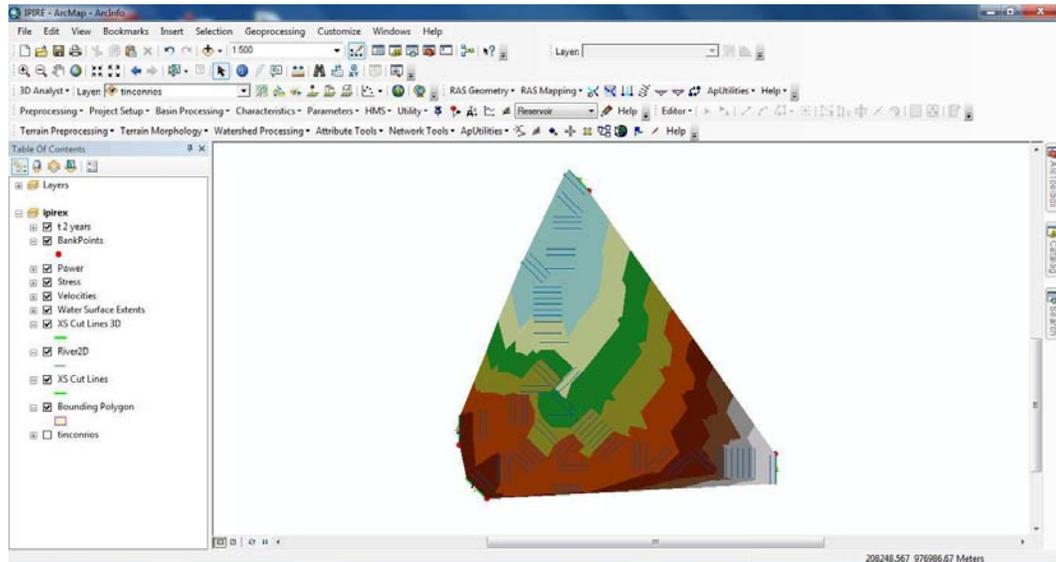


Figura 41 TIN de las superficies de agua creadas.

Para delimitar las planicies de inundación se requiere de la herramienta (*Floodplain Delineation*), en la figura se puede observar el resultado de este procedimiento.

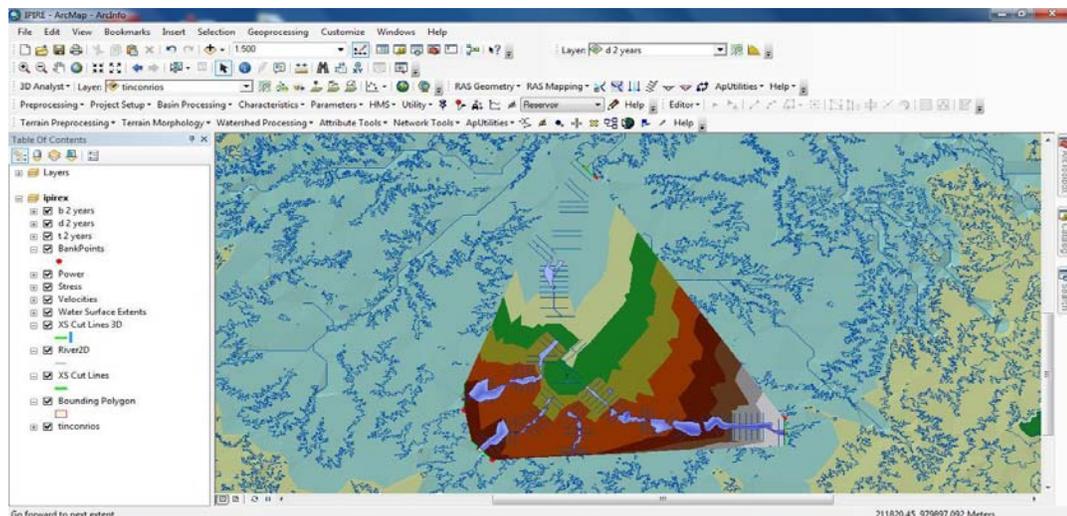


Figura 42 Delimitación de las planicies de inundación.

Para la evaluación de la influencia de las manchas de inundación generadas en la cuenca se revisaron datos de información histórica de episodios de inundación sucedidos en la cuenca del Río Unare y suministrados por la Dirección General de Protección Civil, información de las comunidades, Planes Especiales de Protección Civil frente a las inundaciones, y otras informaciones recopilada de investigaciones anteriores, el resultado de este proceso fue la identificación de zonas de riesgo potencial de inundación obtenida a partir de datos históricos, y de estudios previos.

Para el análisis de los episodios de inundación se construyó una tabla para clasificar y evaluar los impactos de cada inundación clasificándolas de acuerdo al tipo de riesgo como: de riesgo alto aquellas inundaciones que han causado víctimas, daños en viviendas, industrias, que han afectado vías, instalaciones de agua potable, red eléctrica, etc.; de riesgo medio aquellas que han afectado viviendas, infraestructuras y servicios no prioritarios; de riesgo bajo aquellas que han afectado principalmente zonas agrícolas y ganaderas, así como áreas naturales.

Otro criterio para estimar el riesgo frente a las inundaciones de un determinado territorio es establecer la vulnerabilidad del mismo y la peligrosidad a la que está expuesto, entendiéndose por peligrosidad la probabilidad de ocurrencia de un evento, y la vulnerabilidad la sensibilidad del área a ser dañada.

La vulnerabilidad se evaluará de acuerdo al uso de la tierra, y la peligrosidad se obtiene de los estudios hidráulicos en los que se determinaron las áreas de inundación para diversos períodos de retorno.

La vulnerabilidad del territorio se evaluó en alta (zonas urbanas con edificaciones e infraestructuras de primer orden), moderada (resto de edificaciones e infraestructuras) y baja en zonas agrícolas y vegetación natural.

En el caso de peligrosidad la clasificación se realizó a partir de la información reportada por las manchas de inundación clasificando como altas las llanuras de inundación, llanuras deltaicas, así como las planicies de inundación para crecidas de 50 años de periodo de retorno, moderada (terrazas) y bajas (resto de formaciones).

Objetivo 5: Validación de los modelos estudiados del proceso lluvia-escorrentía.

La validación se realiza con el objetivo de verificar la calidad de los ajustes de la etapa de calibración, la calidad y confiabilidad de la información disponible para la corrida del modelo, consiste en usar los parámetros determinados en la calibración, pero en un periodo diferente (Sarria et al, 2008).

Normalmente el modelo es menos robusto en validación debido a la utilización de un periodo en el que no se realiza la optimización de los parámetros.

Validación de los datos:

Para la validación de la información obtenida se utilizó el método de “doble masa”, el objetivo es el de determinar la consistencia de la serie de

datos utilizada para el estudio, se realiza la comparación de las series de datos con estaciones que presenten un comportamiento homogéneo.

Curvas de calibración:

Mediante campanas de aforos realizadas en campo, se obtuvieron curvas de calibración, estos aforos fueron realizados en diferentes secciones del río Unare a partir de estas curvas de calibración se pudo comparar caudales resultantes de la corrida con caudales registrados en la cuenca. Los datos suministrados de los aforos realizados fueron suministrados por el CIHAM UC.

Validación del modelo:

Para validar el modelo lluvia escorrentía, se utilizan los datos de la tormenta ocurrida el día 15-10-2011 de 2 horas de duración y que fue registrada en el pluviómetro de la estación Zaraza. Y se utilizaron datos de caudales suministrados por INAMEH, utilizados para establecer comparaciones entre los caudales simulados y los caudales reales. Se utilizó como referencia la misma subcuenca utilizada la del río Ipire para hacer la validación.

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación así como la interpretación de los mismos.

4.1. Describir las características del proceso lluvia- escorrentía utilizando los datos de la red de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas de la cuenca del río Unare.

Se seleccionaron cuadros de eventos de 1, 2 y 3 horas de duración de las diferentes estaciones pluviométricas del periodo 2010-2014.

Con los datos seleccionados se construyeron los hietogramas que son representaciones graficas de la precipitación en mm en el eje de las ordenadas versus el tiempo medido cada 5 minutos en el eje de las abscisas, correspondientes a cada estación de acuerdo a las duraciones antes mencionadas.

Del análisis de los hietogramas se puede determinar: en la estación **Aragua de Barcelona** se alcanzó la máxima profundidad de la lluvia de 10.3 mm registrada el día 02 de Agosto de 2012 con una duración de dos horas, habiéndose iniciado a las 08.40 pm.

En la estación **Pariaguan** se observó una profundidad máxima de 7.4 mm producida por una lluvia de dos horas de duración registrada el día 19 de Abril de 2012, iniciada a las 10.10 pm.

Con respecto a la estación **Clarines** la profundidad máxima alcanzada fue de 4.66 mm registrada durante una lluvia de una hora de duración el día 19 de Agosto de 2010, en la estación **Carito** la mayor profundidad registrada fue de 4.67 mm el día 19 de Abril de 2011 con dos horas de duración y por último en la estaciones **Boca de Uchire** con de profundidad de 9.0 mm registrada el día 05 de Agosto de 2014 con una hora de duración.

En la Figura 43 se muestra un ejemplo de uno de los hietogramas de la estación Aragua de Barcelona donde se representa un evento ocurrido en la cuenca del río Unare.

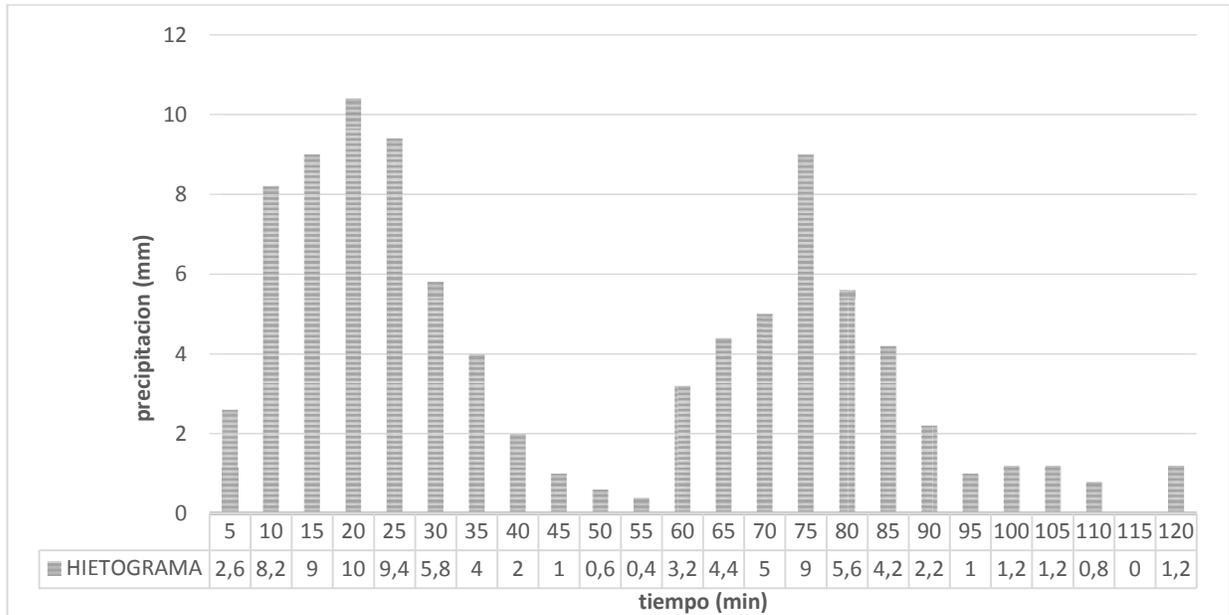


Figura 43 Hietograma Estación Aragua de Barcelona 02 de Agosto del 2012 duración dos horas.

Estimación de tormentas de diseño:

Con respecto a las tormentas de diseño se utilizaron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia generadas para la Cuenca del río Unare (Anzoátegui-Guárico) con datos correspondientes a registros de 29 estaciones pluviográficas (Rojas, 2012), esta región venezolana está ubicada en la región hidrológica II.

En la Figura 44 se muestran las curvas I-D-F utilizadas en esta investigación.

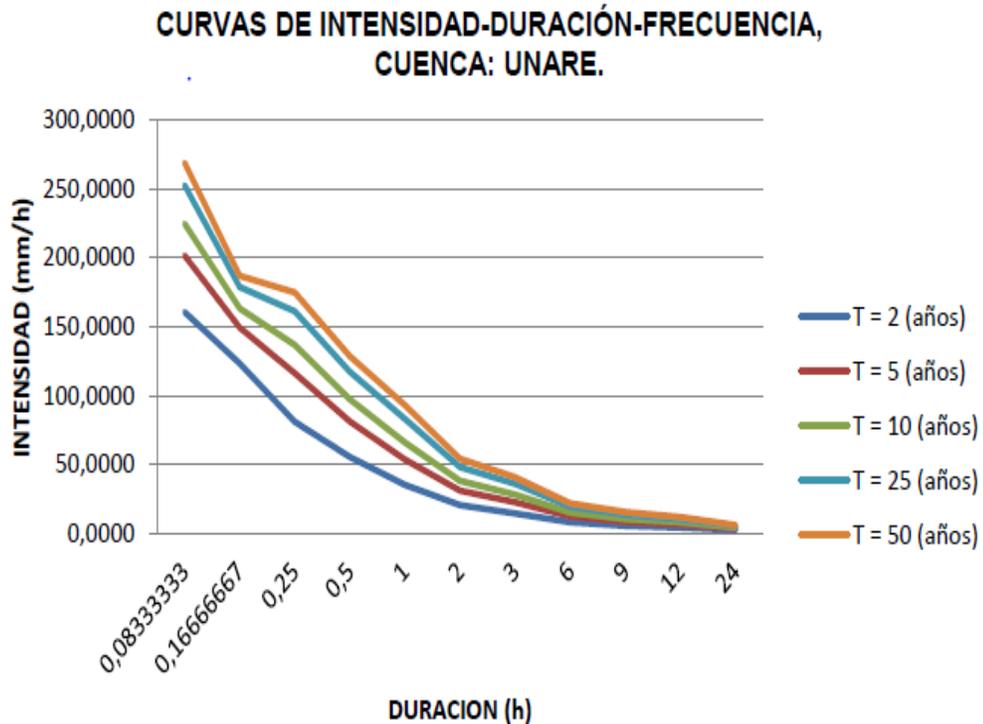


Figura 44 Curva intensidad Duración Frecuencia para la cuenca del río Unare.

$$I = \frac{54.22 * T^{0.3677}}{(D + 0.6243)^{1.1635}}$$

Donde:

I = Intensidad de la lluvia expresada e mm/h.

T= Período de retorno expresado en años.

D= Duración de la lluvia de diseño expresada en minutos.

Para la distribución de los valores de las tormentas de diseño se utilizó el método de los bloques alternos (Chow, 1988) que es utilizado para desarrollar hietogramas de valores de precipitación incremental. El método consiste en ubicar el bloque de altura incremental de máximo valor en la

mitad de la duración requerida, ubicando los bloques remanentes en orden descendentes alternativamente antes y después del bloque central.

La Figura 45 muestra un ejemplo de un hietograma de bloques alternos para periodo de retorno 10 años.

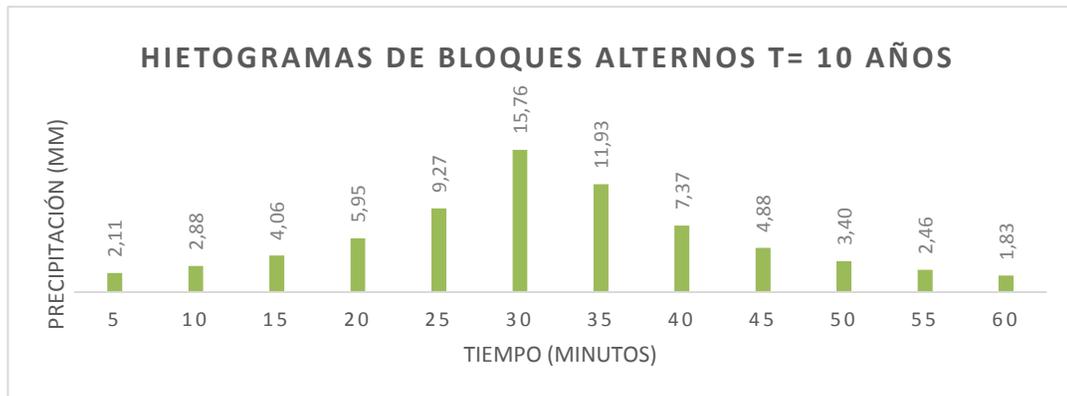


Figura 45 Representación de un Hietograma de bloques alternos.

La otra variable utilizada en esta investigación es el caudal o escorrentía directa cuyos datos fueron suministrados por el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) producto de mediciones de campo realizadas en dos estaciones de medición ubicadas en Clarines específicamente en puente Clarines Estado Anzoátegui y la otra en la población de Zaraza en puente Zaraza Estado Guárico donde con un correntómetro de copas marca Gurley se hicieron las respectivas mediciones de la velocidad de la corriente y a través de la ecuación característica del equipo se determinaron los caudales correspondientes a diferentes días de mediciones. Con los datos de caudal se construyeron los hidrogramas que son representaciones graficas del caudal expresado en m^3/s en el eje de las ordenadas y el tiempo en el eje de las abscisas. En las gráficas siguientes podemos observar ejemplos de estos hidrogramas para ambos puntos de mediciones.

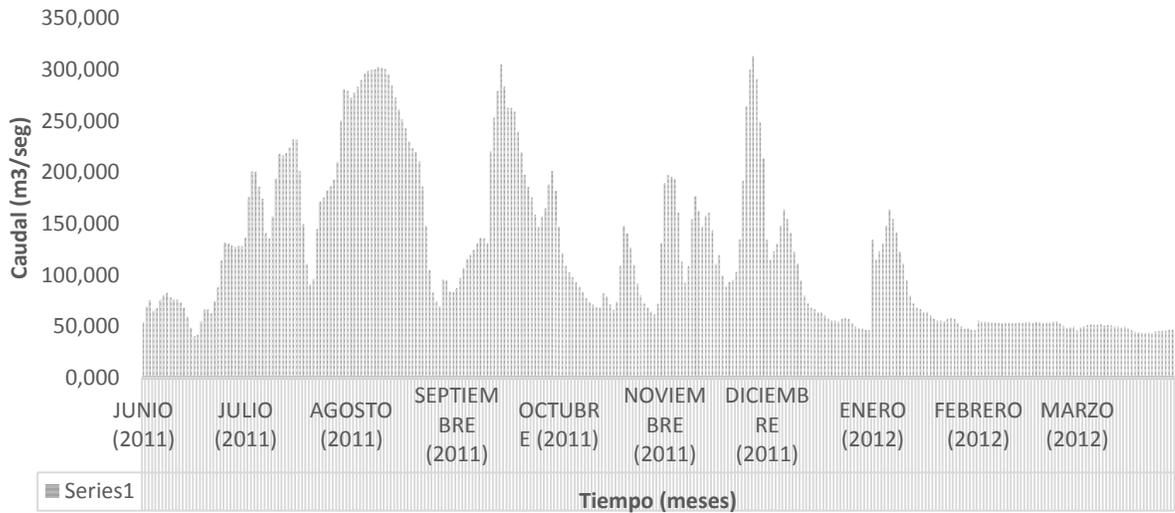


Figura 46 Caudales medios diarios en el aforo ubicado en estación Clarines.

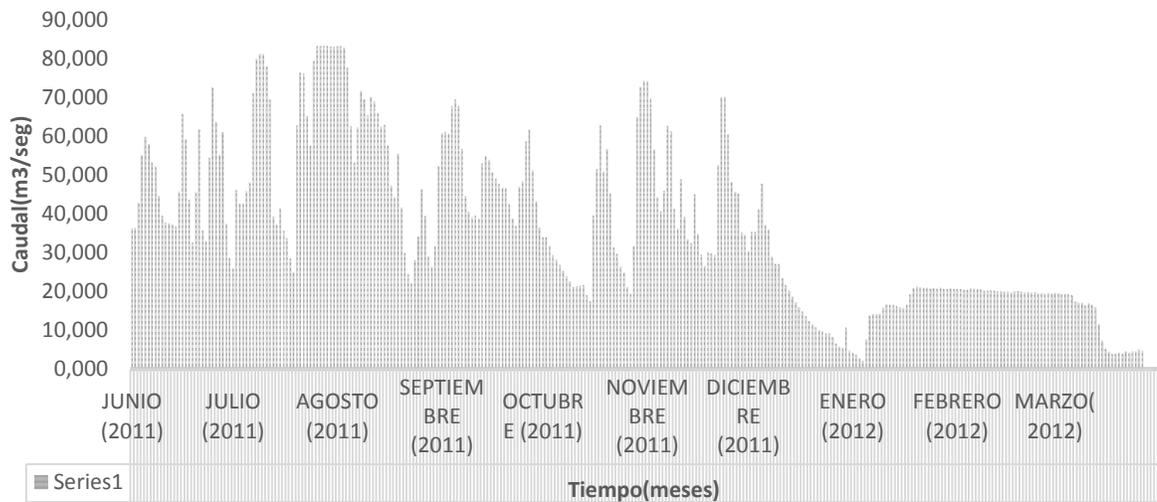


Figura 47 Caudales medios diarios en el aforo ubicado en estación Zaraza.

Además se contó con los datos suministrados por el CIHAM-UC correspondientes a los registros de los aforos realizados.

En la Figura 48 se muestra un ejemplo de una representación gráfica del nivel de agua alcanzado durante el día 04 del mes de Agosto del año 2011 medido en la estación puente Clarines.

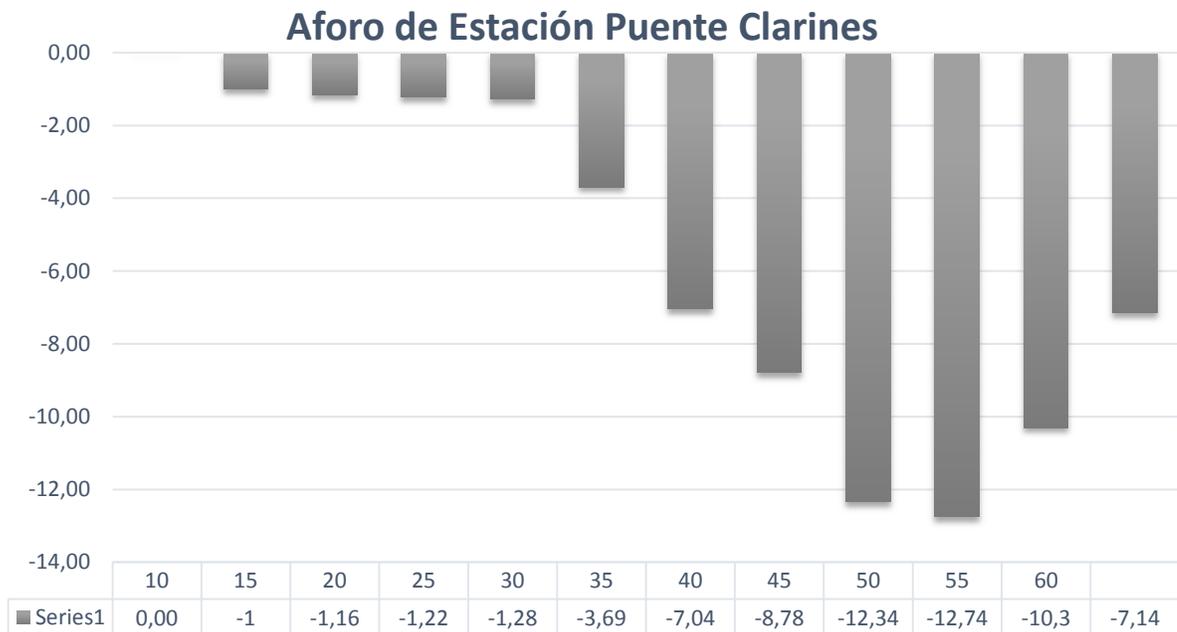


Figura 48 Representación gráfica de las profundidades registradas en el punto de aforo puente Clarines.

4.2. Determinación de los parámetros de los modelos determinísticos basados en el proceso lluvia –escorrentía.

Es necesario determinar los diferentes parámetros que se requieren por cada modelo seleccionado para la modelación de la cuenca.

Entre las características morfométricas que deben considerarse para cada subcuenca está por ejemplo el área de la subcuenca que permitió

definir todos los cálculos de capacidad y conversión de los volúmenes de lluvia en escorrentía.

Para la morfometría de la cuenca se obtuvieron los siguientes parámetros mostrados en la tabla 4.

Tabla 4 Parámetros morfométricos de la cuenca

<i>Parámetros</i>	<i>Valores</i>
Forma de la cuenca	Ovalo-Redonda
Área (Km ²)	23.635,29
Perímetro (km)	791
Coefficiente de compacidad	1,44
Factor de forma	0,29
Pendiente de la cuenca(m/m)	0,001-0,003

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la morfometría fluvial se muestran a continuación:

Tabla 5 Características del río principal.

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
Longitud río Unare	258 km
Pendiente del río Unare	0,000227
Elevación aguas arriba	330,07 m.s.m
Elevación aguas abajo	20 m.s.m

Fuente: Elaboración Propia

Estas características físicas y de drenaje de la cuenca del río Unare se obtuvieron mediante el procesamiento del terreno al utilizar las herramientas HEC- GeoHMS.

Morfometría de la cuenca:

Del análisis de estos resultados podemos determinar que desde el punto de vista de morfometría de la cuenca el relieve de la cuenca varia de llano a ondulado en las zonas del noreste que posee pendientes más pronunciadas, las pendientes van disminuyendo hacia el este y sureste con pendientes más suaves, que indican una lenta evacuación de las aguas precipitadas.

La forma de la cuenca es una característica importante porque se relaciona con el tiempo de concentración, el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya a la sección de la corriente, es decir es el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma.

Con respecto a los valores obtenidos de factor de forma, y factor de compacidad (valor de K_c obtenido esta entre un rango de 1,25 a 1,5) se puede determinar que su forma es ovalo redonda con una tendencia de crecida media, un área de 22.542,41 km², y un perímetro de 791 km.

Morfometría del sistema fluvial:

Esta cuenca posee una red fluvial bien distribuida, como río principal tiene al río Unare con una longitud de 258 km, sus afluentes más importantes por su margen izquierda los ríos Guanape, Guaribe, Tamanaco e Ipire y por la margen derecha el río Guere.

El río Unare desde su nacimiento (cerca de Pariaguan) hasta su desembocadura en el mar Caribe presenta una trayectoria muy sinuosa por

la poca pendiente que posee su cauce, motivo por el cual ocurren fuertes inundaciones en periodos de lluvia.

Los ríos Guanape, Guaribe, y Tamanaco son los que poseen cotas más altas que los ríos Ipire y Guere, y en consecuencia poseen mayores pendientes.

La red de drenaje de esta cuenca es tipo dendrítica, sus numerosas áreas onduladas, sus pendientes y tipos de suelo determinan la orientación de sus cauces.

Clima:

En la región predomina el tipo de clima de bosque seco tropical, existiendo dos periodos bien definidos uno seco de Noviembre a Mayo, y otro lluvioso de Junio a Octubre. La temperatura media varía entre 26 °C y 28 °C con una amplitud anual de 2,3 a 2,6 °C, lo que refleja una relativa uniformidad de la temperatura a lo largo del año. La evaporación promedio anual oscila entre 2000-2800 mm.

Se registran precipitaciones crecientes en sentido noreste-sureste con valores entre 400 a 1400 mm. La subcuenca con mayor precipitación corresponde a la de Ipire.

Vegetación:

La vegetación de la cuenca es diversa evidenciándose una mayor extensión ocupada por matorral seco y arbustos, tomando en consideración el cálculo de las superficies dentro del mapa de vegetación esta representa

un área aproximada de 5090.75 km², existen también un área de sabanas y herbazales de 6571.52 km², las áreas intervenidas ocupan un área aproximada de 7447,44 km², se localizan lotes boscosos en las áreas colinosas o en las vegas de los ríos como bosques de galería en un área aproximada de 3643,40 km².

Las áreas intervenidas representan un 32.73% del área total de la cuenca, siendo la subcuenca de Tamanaco la más intervenida.

En la Figura 49 se puede observar la clasificación de los diferentes tipos de vegetación presentes en la cuenca del río Unare resultado de la aplicación de las herramientas HEC-HMS.

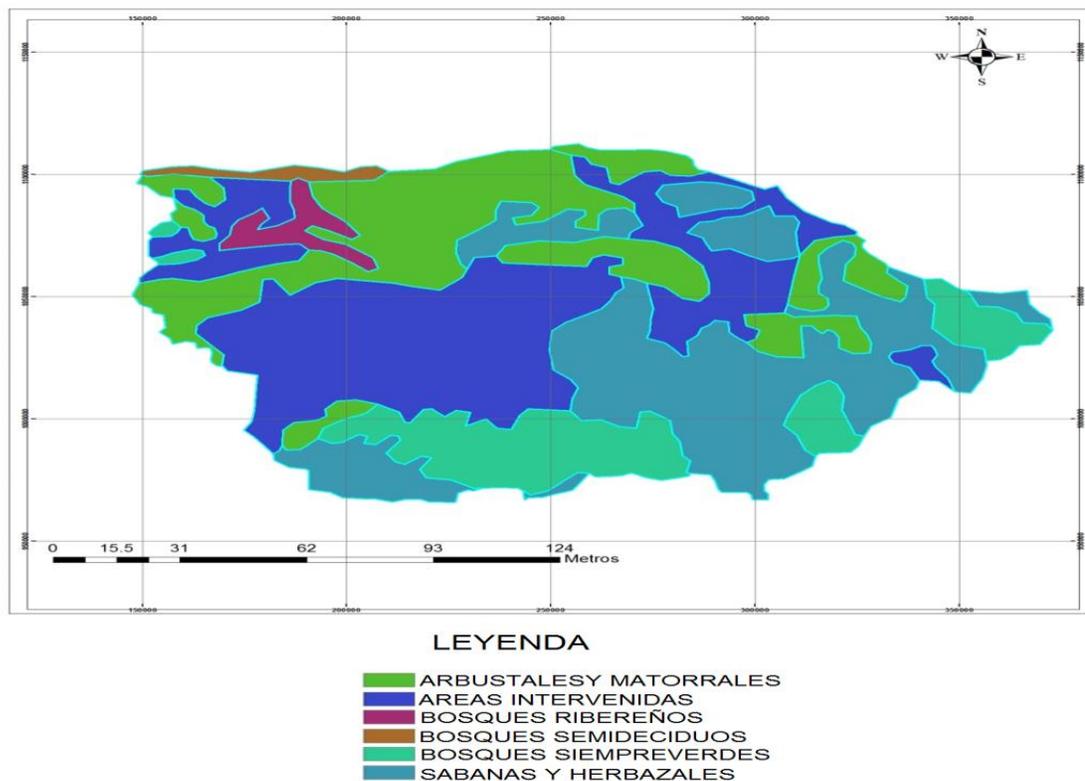


Figura 49 Mapa de Tipos de Vegetación en la cuenca del río Unare.

Las figuras a continuación muestran fotos de la vegetación típica de la zona donde se puede observar combinación de arbustos y árboles como cují, robles y acapro; predominantes en las asociaciones de matorrales, propios de las sabanas llaneras o zonas de vida del bosque tropical seco, así como también se localizan zonas con presencia de vegetación tipo xerófito en zonas de paisaje de litoral, tipo cardones, tunas y uvas de playa.



Figura 50 Vista panorámica de la cobertura presente en la cuenca de Unare



Figura 51 Vista panorámica de la cobertura presente en la cuenca de Unare.

Tipos de suelos:

Del resultado obtenido al procesar los datos se obtuvo la siguiente información.

Tabla 6 Características de los suelos de la cuenca del río Unare.

SUELO	TEXTURA	MATERIA ORGANICA	AREA OCUPADA (KM ²)	FERTILIDAD
OXISOL	ARCILLOSA	AUSENCIA	6883,91	MUY BAJA
VERTISOL	ARCILLOSA	DEFICIENCIA	6330,42	MUY ALTA
ULTISOL	ARCILLOSA	PRESENCIA	4572,36	MUY BAJA
ENTISOL	ARENOSA	DEFICIENCIA	3888,12	MUY ALTA
INCEPTISOL	ARCILLOSOS	AUSENCIA	1130,10	MUY BAJA

Fuente: Ascencio Sara .Universidad Politécnica de Valencia. España.

Estos resultados fueron analizados y comparados con la bibliografía existente (Cuaderno Cenamb 5. UCV, Manejo Integral de Cuencas. Fundación La Salle, Programa de Acción Nacional Fundambiente) y coinciden con los tipos de suelos de la zona. El tipo de suelos **oxisoles** que ocupan un 30,20% del área total de la cuenca son suelos que presentan severas limitaciones para fines agropecuarios, como consecuencia del excesivo lavado de nutrientes del suelo, se destinan a uso forestal, contienen pocos minerales y escasa o inexistencia de materia orgánica, lo que lo convierte en suelos de fertilidad extremadamente baja, el otro alto porcentaje 27,75% está representado por suelos del tipo **vertisol**, que presentan altas proporciones de arcillas, que los convierte en suelos compactos en las estaciones secas, y muy plásticos en épocas húmedas, presentan generalmente una vegetación herbácea, se desarrollan en climas tropicales y subtropicales, son generalmente muy fértiles aunque presentan mal drenaje y deficiencia de materia orgánica, los suelos **ultisoles** representan el 20% del área se presentan en sabanas, son suelos ácidos lo que los convierte en suelos de uso forestal, de muy baja fertilidad, suelos **entisol** ocupan el 17% de la cuenca son suelos saturados que se encuentran en los valles aluviales de la cuenca alta de río Unare poseen poca materia orgánica

y por último los suelos **inceptisoles** que cubren el 4,95% del área de la cuenca son suelos de terrenos agrícolas y praderas, se forman en zonas convexas con pendientes de llana/horizontal a levemente ondulada.

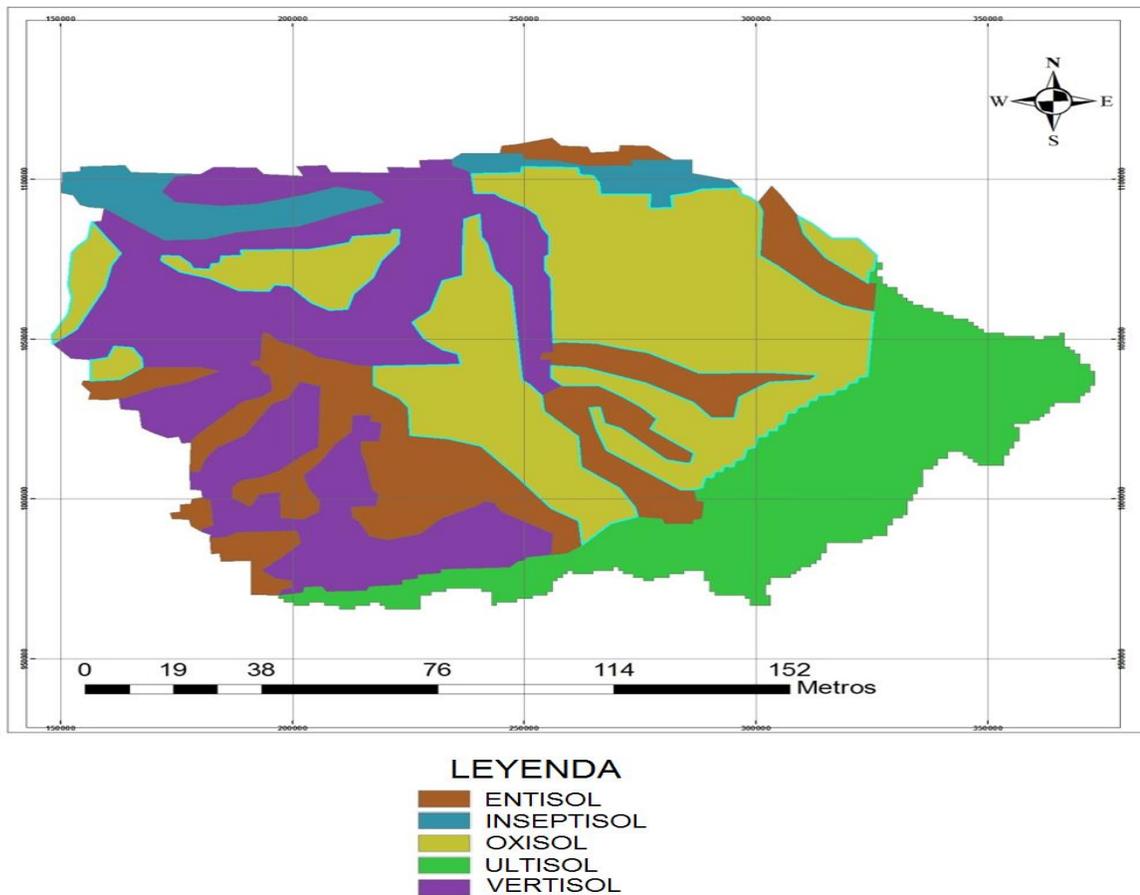


Figura 52 Mapa de tipo de suelo de la cuenca del río Unare.

En las figuras se muestran fotos correspondientes a tipos de suelos característicos de la zona.



Figura 53 Vista panorámica de suelos presentes en la cuenca Unare.



Figura 54 Vista panorámica de los suelos presentes en la cuenca Unare.

Uso de la tierra:

En la zona hay diversidad de modalidades del uso de la tierra existiendo entre ellas la agroproducción (agricultura vegetal, ganadería y pesca) hasta la camaronicultura y la acuicultura de peces de agua dulce, debido a la presencia de 17 embalses y 2000 lagunas artificiales en la cuenca de Unare.

Existe además una extensa área (39%) aproximadamente ocupada por PDVSA donde se realizan actividades de exploración y explotación de gas y petróleo.

La minería se practica con la explotación del carbón a cielo abierto en la Fila Maestra, así como la cal en el Cerro Pena Blanca (sur de la laguna de

Píritu) y otras areneras ubicadas en las márgenes de los ríos, pero estas actividades se pueden considerar de tipo artesanal.

Otra actividad que se desarrolla en esta zona es el turismo concentrado en la franja costera, además de ciertas actividades recreacionales concentradas en los embalses Tamanaco, La Estancia, etc.

En lo que respecta a los centros poblados se encuentran ubicados en toda la región clasificándose como urbanos los que cuentan con más de 2500 habitantes, la mayor densidad de población se encuentra en la subcuenca Guanape, y otro centro de concentración importante está en Puerto Píritu. En la figura se muestra la ubicación de los centros poblados de la región y la fotografía muestra una vista panorámica de uno de los centros poblados más importantes de la cuenca

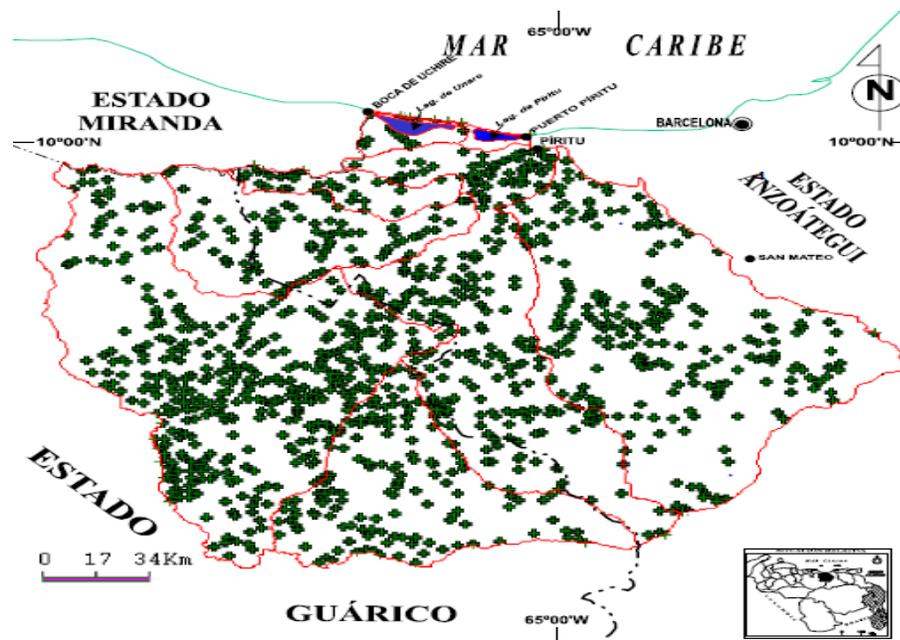


Figura 55 Ubicación de los centros poblados presentes en la cuenca Unare. Fuente Cuaderno Cenamb 5 UCV.



Figura 56 Vista panorámica de uno de los centros poblado de la zona Puerto Piritu.

De acuerdo al uso de la tierra podemos clasificar el uso de la tierra de la cuenca del río Unare como: áreas intervenidas, vegetación natural, actividades agrícolas, suelo desnudo y áreas urbanas, y otros.

En la Figura 57 se presenta un diagrama de torta de los porcentajes de superficies por subcuencas de la región.

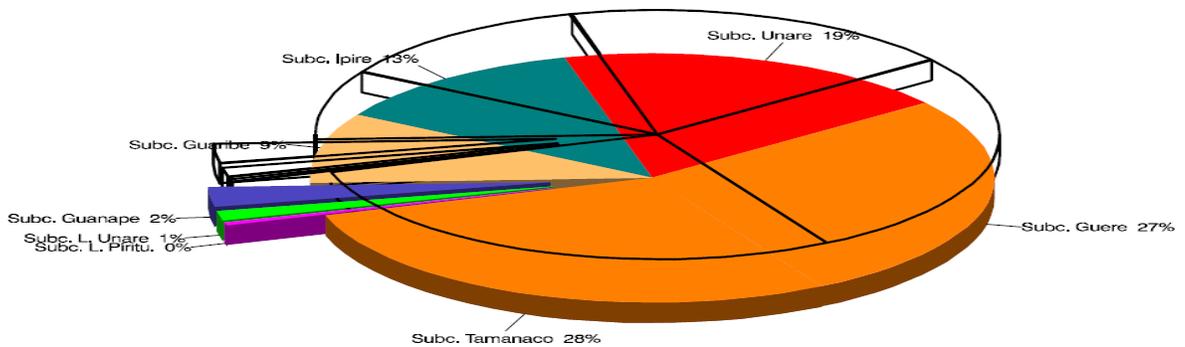


Figura 57 Porcentajes de superficie de las subcuencas de la cuenca del río Unare. Fuente: Cuadernos Cenamb 5.UCV.

En la tabla 6 se puede observar la clasificación del uso de la tierra en la cuenca del río Unare.

Tabla 7 Áreas intervenidas en la cuenca del río Unare.

Subcuenca	Áreas Naturales e Intervenidas por Subcuencas							
	Vegetación Natural		Agrícola		Suelo Desnudo Y Urbano		Otras	
	km2	%	km2	%	km2	%	km2	%
Guere	2585,5	42,0	3508,9	57,0	49,2	0,8	18,5	0,3
Ipire	1922,2	67,0	889,4	31,0	4,0	0,1	54,5	1,9
Tamanaco	1659,8	26,0	4596,5	72,0	3,2	0,1	19,2	0,3
Guaribe	794,8	39,0	1243,2	61,0	1,8	0,1	0,8	0,0
Guanape	238,4	43,0	321,6	58,0	1,7	0,3	0,6	0,1
RPTU	1949,8	36,0	3466,2	64,0	8,7	0,2	21,7	0,4
Total	9150,6	-	14025,8	-	68,6	-	115,2	-

Nota: Gil y López (2014)

4.3 Calibración de los modelos estudiados del proceso lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del río Unare.

Para la calibración del modelo, se seleccionó la subcuenca Ipire, se escogió como variable de entrada una tormenta con datos conocidos ocurridos en esta subcuenca y registrados por una estación ubicada en la zona, ocurrida el día 15 de octubre de 2011 de una hora de duración.

En vista que el objetivo general de la investigación es comprobar la validez de los modelos de estimación del proceso lluvia-escorrentía en la

cuenca del río Unare, para la calibración de los modelos se utilizaron tres de los métodos empleados para transformar la lluvia o exceso en escorrentía: Método de Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el hidrograma unitario de Clark, y el hidrograma unitario de Snyder.

Se plantearon tres escenarios donde se mantuvieron constantes los modelos que se habían seleccionado previamente: para pérdidas el **Servicio de conservación de suelos**, para modelo de tránsito: **Muskingum**, modelo de recesión de flujo: **Caudal constante mensual** y se variaron en los tres escenarios los modelos de transformación lluvia escorrentía.

Para el primer escenario de calibración se seleccionó el **modelo el Servicio de conservación de suelos**, para el segundo escenario se seleccionó el **Hidrograma Unitario de Clark**, y para el tercer escenario el **Hidrograma Unitario de Snyder**.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con los tres escenarios planteados.

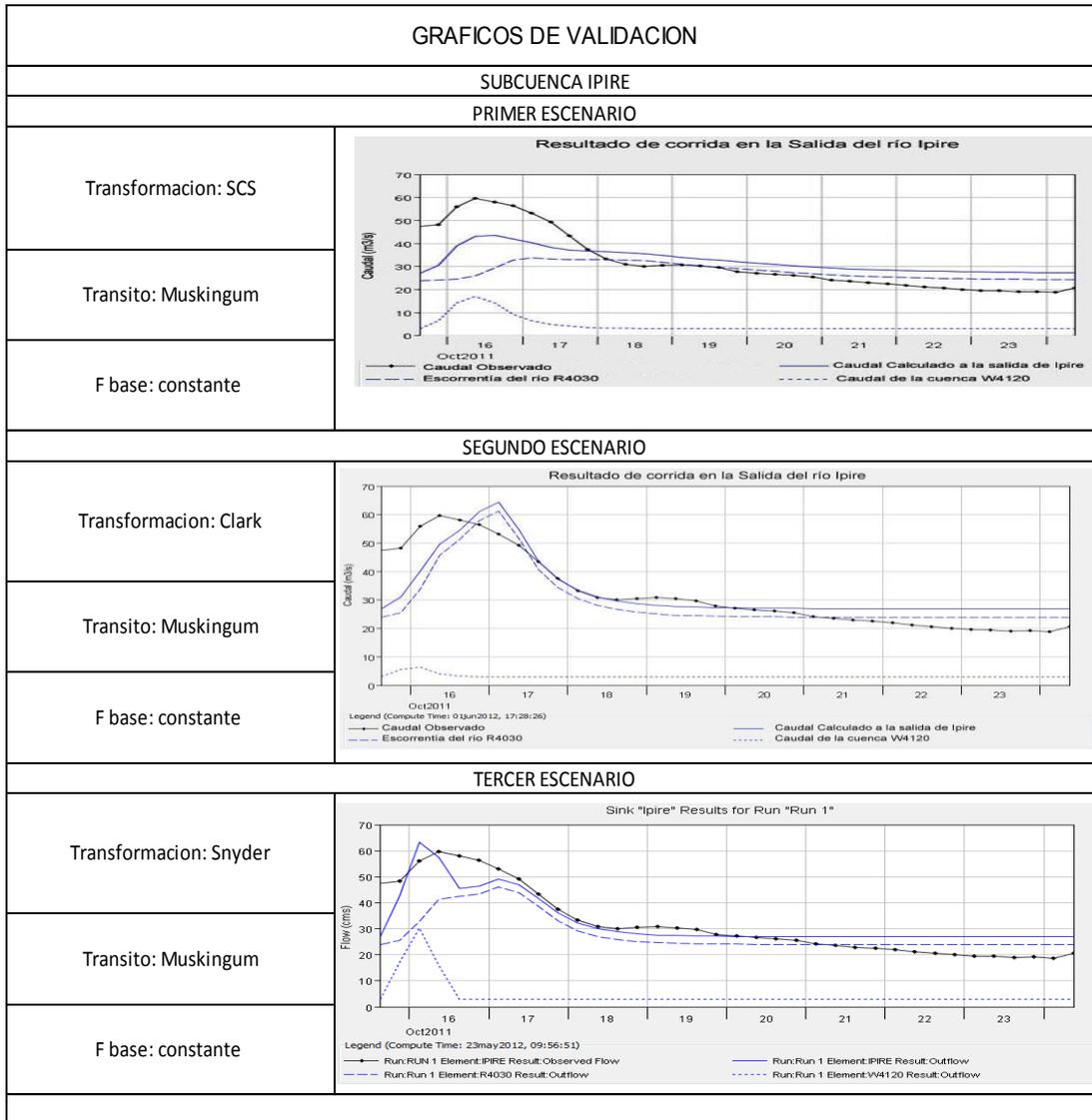


Figura 58 Resumen de los escenarios planteados

Para comprobar la calidad del proceso, se utilizaron los siguientes algoritmos de bondad de ajuste como medida de evaluación, los dos procedimientos corresponden a los descritos en el manual de usuarios del programa, hecho por el US Army Corps of Engineers,(2001).

.- **Suma de errores absolutos:** Esta función compara cada ordenada del hidrograma simulado, con la correspondiente al hidrograma observado, señalando como error la diferencia entre las mismas.

$$Z = \sum_{i=1}^n |Q_o(i) - Q_s(i)|$$

Z: función objetivo

Qo: caudal observado

Qs: caudal simulado.

.-**Error porcentual en el caudal punta:** Esta función centra su interés exclusivamente en el valor del caudal punta del hidrograma, calculando el error cometido en la simulación en forma de porcentaje, respecto al valor realmente observado su expresión matemática es:

$$Z = 100 * (| Q_{op} - Q_{sp} |) / Q_{op}$$

Donde:

Qop: caudal máximo en el hidrograma observado

Qsp: caudal máximo en el hidrograma simulado.

A continuación los resultados obtenidos con ambos métodos de evaluación de errores.

Tabla 8 Resultados de la aplicación de métodos de medición de errores.

MODELO LLUVIA- ESCORRENTIA	CAUDAL OBSERVADO	CAUDAL CALCULADO	ERROR ABSOLUTO	ERROR PORCENTUAL
	m ³ /seg	m ³ /seg		%
SCS	59,7	43,5	16,2	27,13
CLARK	59,7	64,3	4,6	7,7
SNYDER	59,7	63,1	3,4	5,6

Fuente: Elaboración Propia.

También se validó la selección de este modelo de transformación de lluvia-escorrentía utilizando el cálculo del coeficiente de determinación R^2 que dio como resultado 0,788

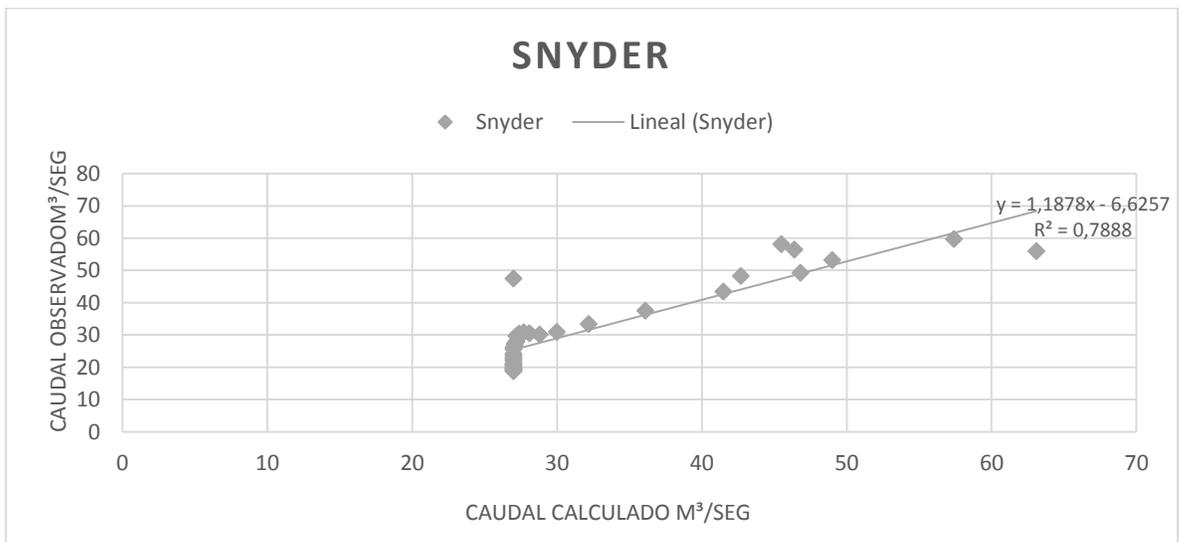


Figura 59 REPRESENTACIÓN DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Como resultado de la evaluaciones de los errores obtenidos y el valor de R^2 se seleccionó el modelo de transformación lluvia- escorrentia según el modelo de Snyder. A continuación se muestran los resultados de los parámetros obtenidos en cada escenario de validación.

Tabla 9 Parámetros según Servicio Conservación de Suelos.

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación	Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	R_{retardo} (h)	B_{base} (m^3/s)	Río	K (h)	X
W4120	20	78.24	24.14	14.34	3	R4030	3.23	0.5
W4130	87.85	66.55	30.28	45.34	3	R4040	11.16	0.5
W4140	91.99	62.74	33.59	43.56	3	R4050	3.58	0.5
W4150	93.87	60.84	35.09	89.02	3	R4080	37.66	0.5
W4160	99.58	55.92	39.67	41.85	3	R4060	6.27	0.5
W4170	100	55.53	40	14.7	3	R4070	4.88	0.5
W4180	99.83	55.61	39.87	61.47	3	R4100	4.57	0.5
W4190	100	55.53	40.05	57.09	3	R4110	29.23	0.5
W4200	91.51	66.57	28.9	69.89	3	R4090	11.19	0.5

Tabla 10 Parámetros según Hidrograma Unitario de Clark.

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación		Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	T _C (h)	R(h)		Río	K (h)	X
W4120	20	78.24	24.14	7.37	4.4	3	R4030	3.23	0.5
W4130	87.85	66.55	30.28	15.5	9.3	3	R4040	11.2	0.5
W4140	91.99	62.74	33.59	12	7.2	3	R4050	3.58	0.5
W4150	93.87	60.84	35.09	19.2	12	3	R4080	37.7	0.5
W4160	99.58	55.92	39.67	6.37	3.8	3	R4060	6.27	0.5
W4170	100	55.53	40	2.74	1.6	3	R4070	4.88	0.5
W4180	99.83	55.61	39.87	15.6	9.4	3	R4100	4.57	0.5
W4190	100	55.53	40.05	15.6	9.4	3	R4110	29.2	0.5
W4200	91.51	66.57	28.9	28.2	17	3	R4090	11.2	0.5

Tabla 11 Parámetros según Hidrograma Unitario de Snyder.

Sub Cuenca	Pérdidas			Transformación		Recesión de Flujo	Tránsito		
	Abstracciones Iniciales (mm)	CN	Impermeabilidad (%)	R _{retardo} (h)	Coficiente al Pico (h)		Río	K (Horas)	X
W4120	20	78.24	24.14	7.6	0.8	3	R4030	3.23	0.5
W4130	87.85	66.55	30.28	10	0.8	3	R4040	11.16	0.5
W4140	91.99	62.74	33.59	33.5	0.8	3	R4050	3.58	0.5
W4150	93.87	60.84	35.09	12	0.8	3	R4080	37.66	0.5
W4160	99.58	55.92	39.67	7.1	0.8	3	R4060	6.27	0.5
W4170	100	55.53	40	19.7	0.8	3	R4070	4.88	0.5
W4180	99.83	55.61	39.87	15.3	0.8	3	R4100	4.57	0.5
W4190	100	55.53	40.05	22.3	0.8	3	R4110	29.23	0.5
W4200	91.51	66.57	28.9	13.9	0.64	3	R4090	11.19	0.5

4.4 VALIDACION DEL MODELO LLUVIA-ESCORRENTIA

Para esta etapa de validación se seleccionaron modelos basados en procesos físicos que se aplicaron a todas las subcuencas modeladas y con los parámetros del modelo ya calibrado.

Los modelos basados en procesos físicos seleccionados fueron:

Modelo de Pérdidas: Servicio de Conservación de Suelos.

Modelo de Transformación Lluvia-Escorrentía: Hidrograma Unitario de Snyder

Modelo de Tránsito: Muskingum

Modelo de Recesión de Flujo: Caudal Constante Mensual.

Escenarios:

Debido a la extensión de la cuenca se realizaron varias simulaciones por subcuencas y uniendo las que presentaban características de relieve similares.

Se realizaron cuatro (4) simulaciones del proceso lluvia escorrentía distribuida en las diferentes subcuencas tomando los datos de lluvias reportados por las distintas estaciones ubicadas en el área de estudio.

En la Figura 61 se muestra la distribución de las subcuencas generada por el programa.

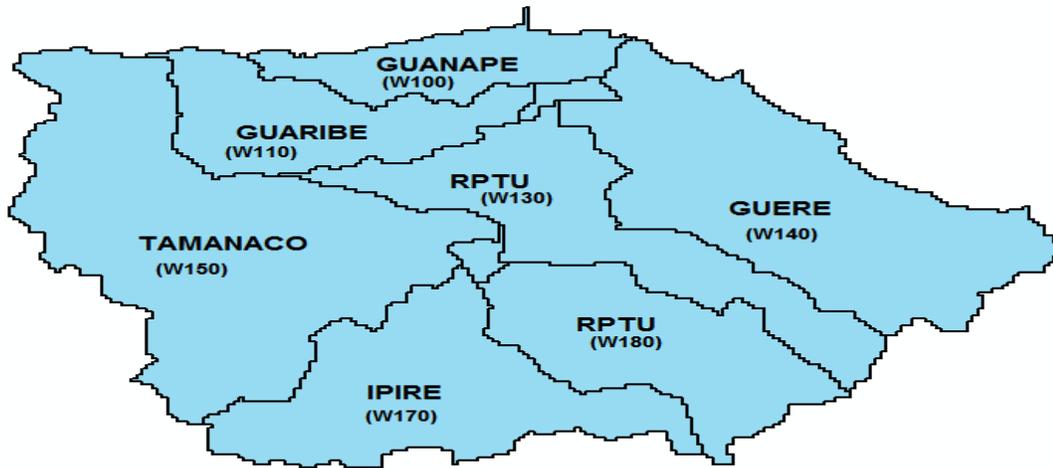


Figura 60 Delimitación de subcuencas del río Unare

A continuación se muestran los diferentes escenarios:

PRIMER ESCENARIO:

Se seleccionaron las subcuencas de los ríos pequeños tributarios al río Unare (RPTU W130-W180) y la subcuenca Guere (W140), como datos de entrada se introdujeron datos de la lluvia ocurrida el 25 de Abril del 2013 representada en el hietograma de una lluvia de 4.4 mm, de tres horas de duración, registrada en la Estación Aragua de Barcelona, iniciada desde las 04:00 am hasta las 07:am, como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de 1179,20 m³/s y un volumen de 145466,9 m³.

SEGUNDO ESCENARIO:

Se seleccionaron las subcuencas Tamanaco (W150) y la subcuenca Ipire (W170), como datos de entrada se introdujeron datos de la lluvia ocurrida el

25 de Abril del 2013 representada en el hietograma de una lluvia de 4.4 mm, de tres horas de duración, registrada en la Estación Aragua de Barcelona, iniciada desde las 04:00 am hasta las 07:am, como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de 1117,30 m³/s y un volumen de 153326,7m³

TERCER ESCENARIO:

Se seleccionó la subcuenca Guanape (W100), como datos de entrada se introdujeron datos de la lluvia ocurrida el 04 de Junio del 2011 representada en el hietograma de una lluvia de 0.4 mm, de tres horas de duración, registrada en la estación Clarines, iniciada desde las 06:45 pm hasta las 09:45 pm, como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de 54,8 m³/s y un volumen de 3521,4m³.

CUARTO ESCENARIO:

Se seleccionó las subcuencas Tamanaco (W150) y la subcuenca Guaribe (W110), como datos de entrada se introdujeron datos de la lluvia ocurrida el 25 de Abril del 2013 representada en el hietograma de una lluvia de 4.4 mm, de tres horas de duración, registrada en la estación Clarines, iniciada desde las 04:00 am hasta las 07:00 am, como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de 793,8 m³/s y un volumen de 144220,3 m³.

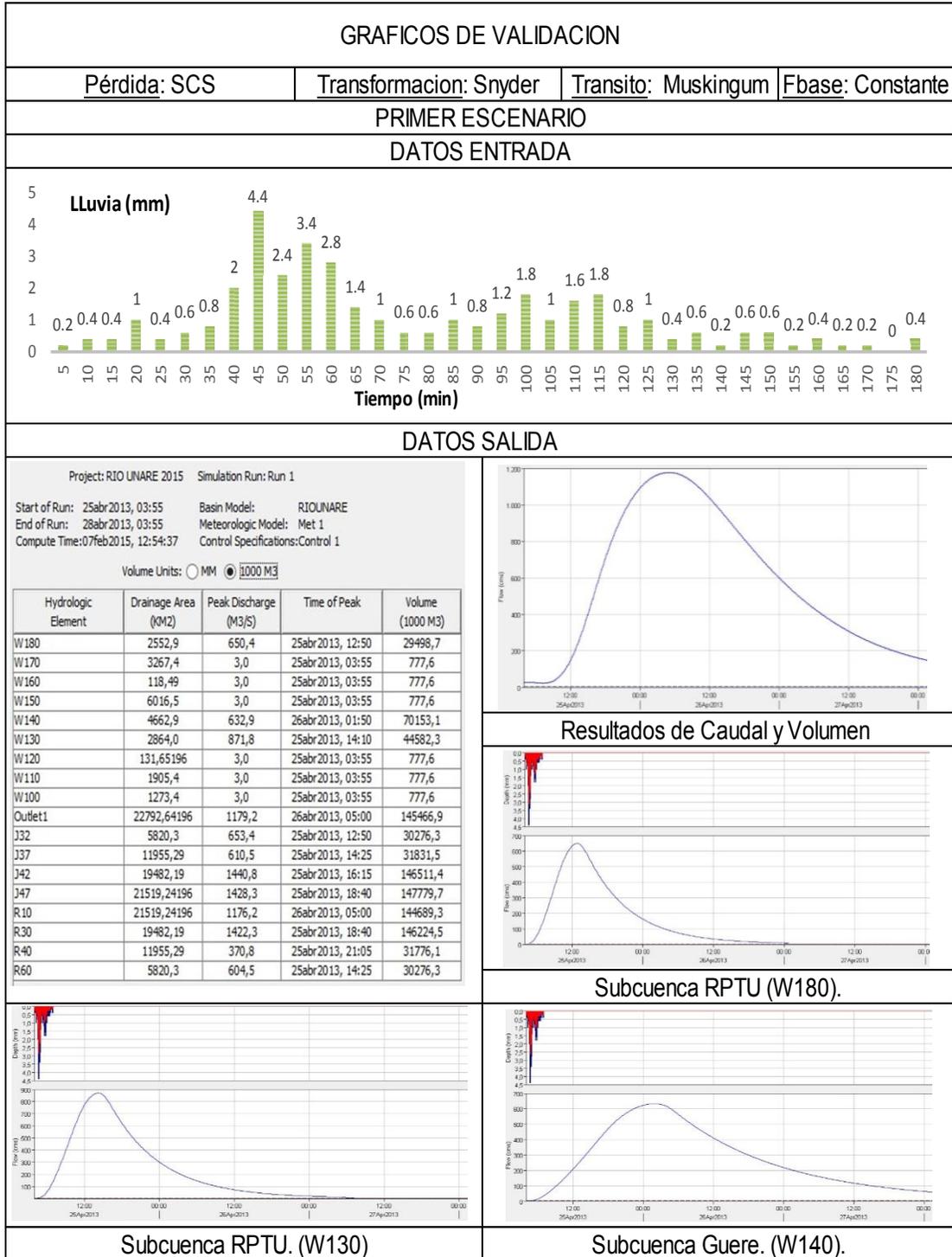


Figura 61 Representación del primer escenario de validación.

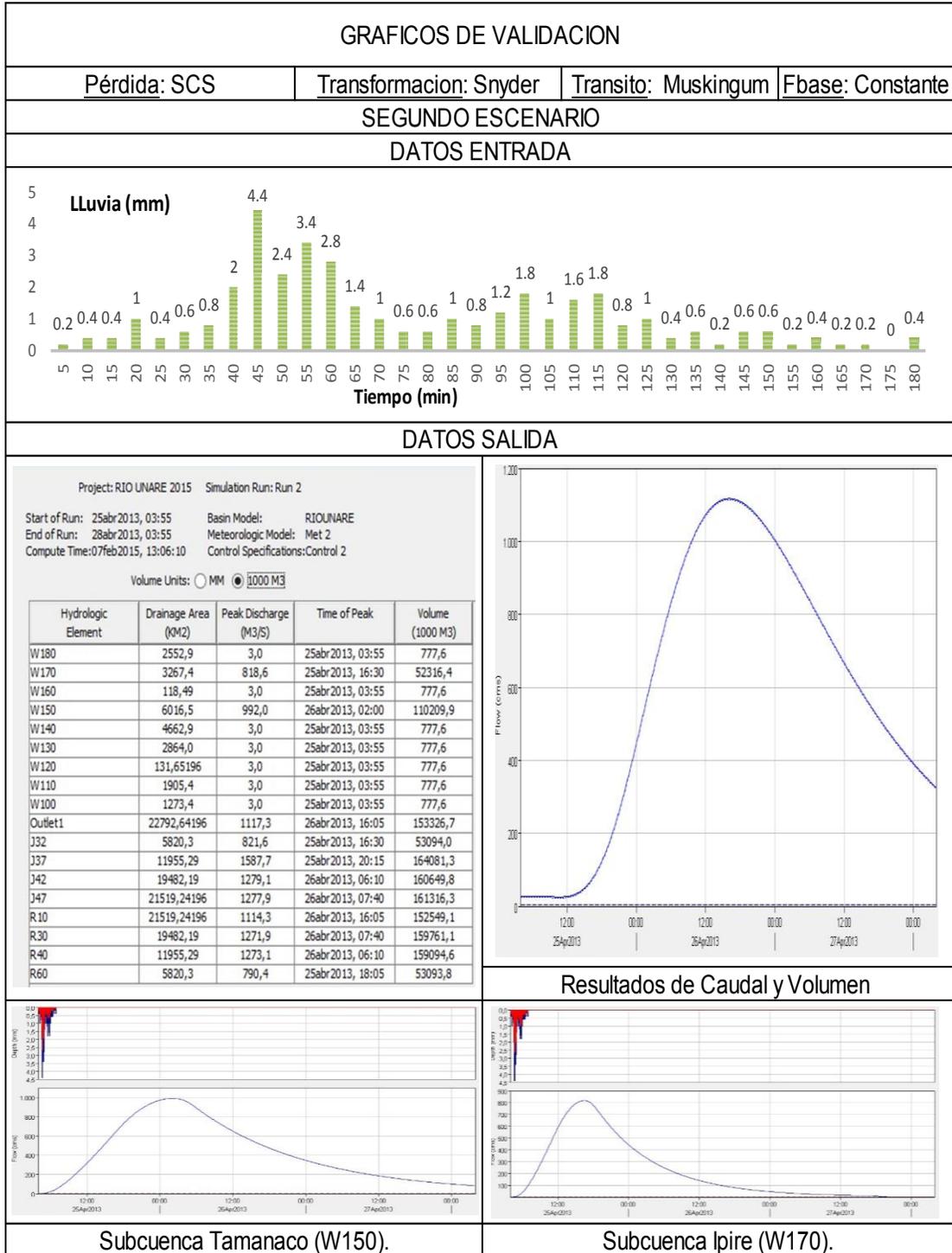


Figura 62 Representación del segundo escenario de validación

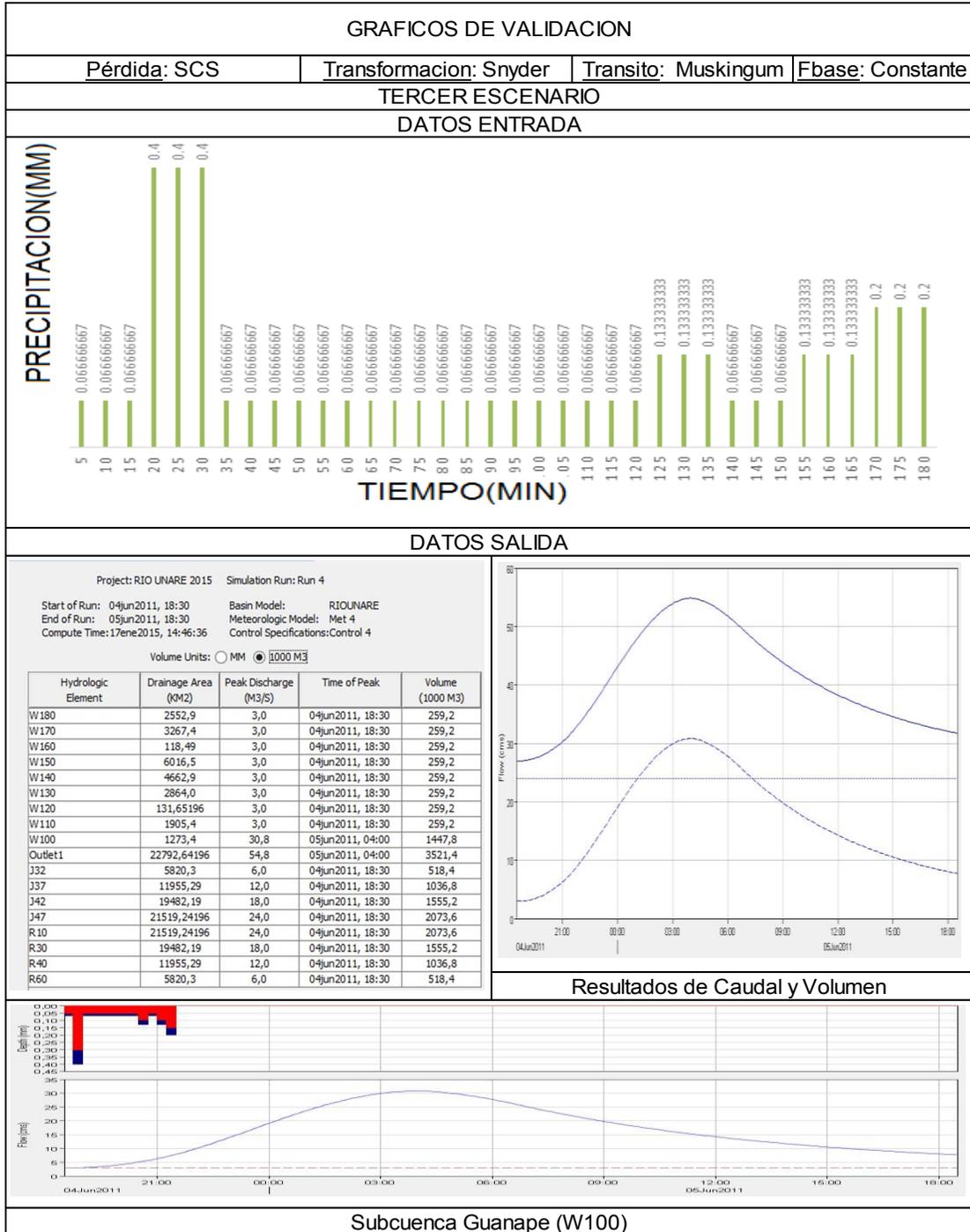


Figura 63 Representación del tercer escenario de validación

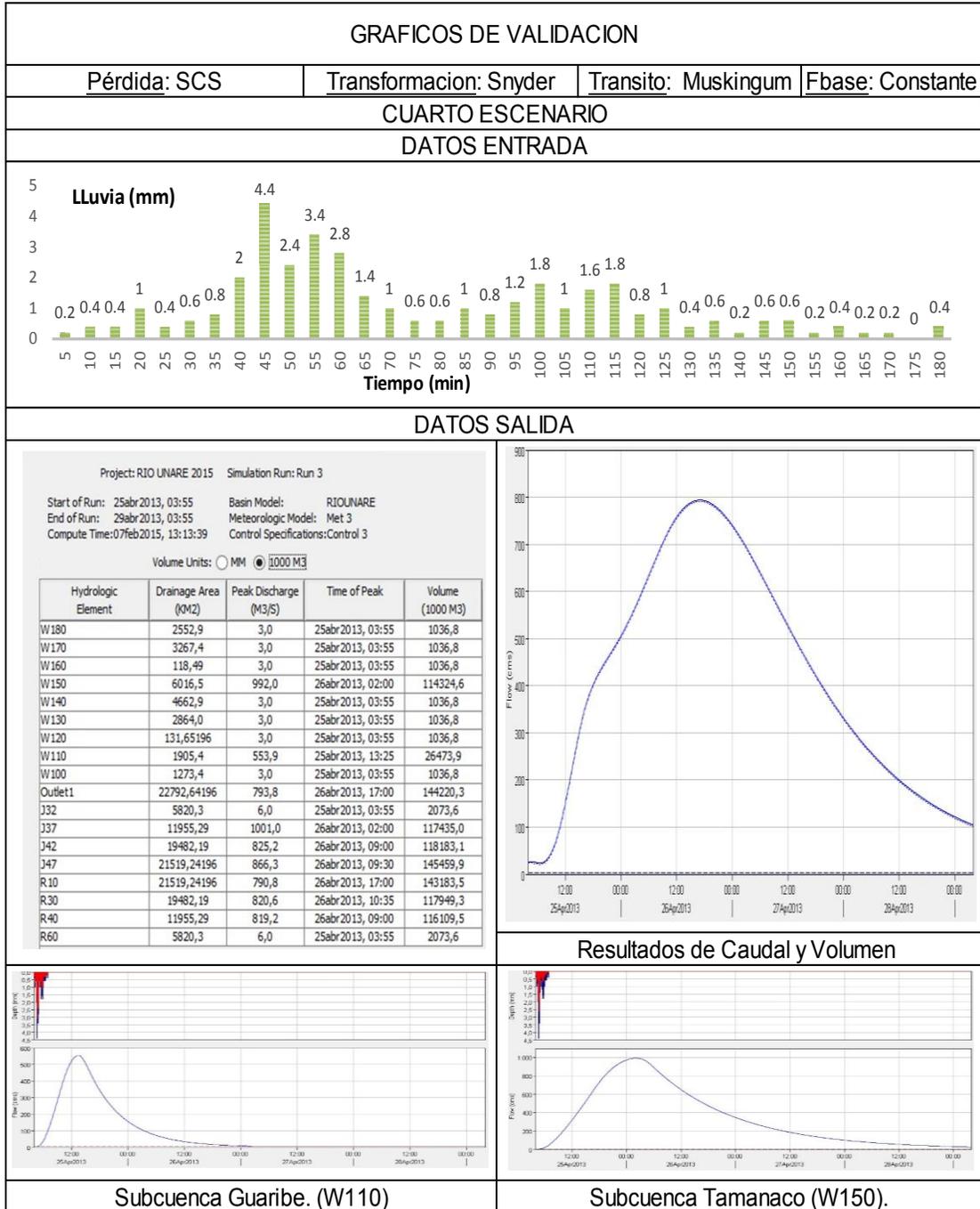


Figura 64 Representación del cuarto escenario de validación

El análisis de los resultados obtenidos de la validación anterior podemos resumirlos en la siguiente tabla.

Tabla 12 Resultados obtenidos para cada escenario simulado

ESCENARIO	SUBCUENCA	CAUDAL PICO (m ³ /s)	VOLUMEN(m ³)	FECHA
PRIMER	GUERE Y RPTU	1179,20	145.666,90	abr-13
SEGUNDO	TAMANACO E IPIRE	1117,30	153.326,70	abr-13
TERCER	GUANAPE	54,8	3521,4	jun-11
CUARTO	TAMANACO Y GUARIBE	793,8	144.220,3	abr-13

Fuente: Elaboración Propia.

De los datos obtenidos en campo se puede observar que para la fecha del mes de junio del año 2011 con los datos registrados por INAMEH se determinó un valor de caudal medio de 47,33 m³/s. Y el caudal registrado para el día 04 de junio era de 54 m³/s.

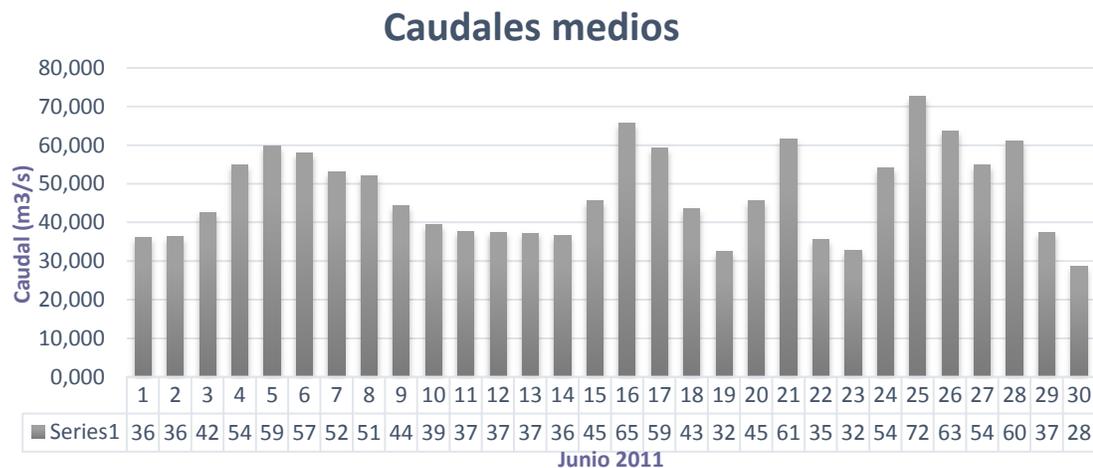


Figura 65 Hidrograma de caudales medios

De los trabajos realizados en campo producto de los aforos y datos obtenidos del sensor de nivel se construyeron curvas de gasto con las cuales se pueden estimar valores de caudal, de estos datos producto de las

mediciones se obtuvieron profundidades en el orden de 12,74 metros que si se sustituye en la ecuación de la curva de gastos estimada da caudales del orden de 1158,53 m³/s.

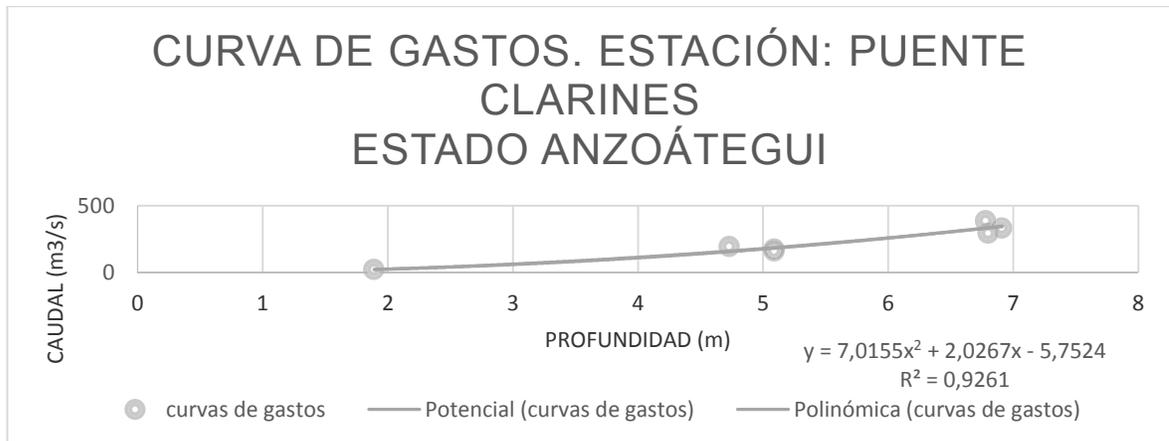


Figura 66 Curva de gastos estación de aforo puente Clarines

Otra forma de validar estos resultados es a través de información proveniente de eventos ocurridos en la zona de estudio y nos permitan comparar los datos reales con los datos obtenidos de las validaciones de los modelos.

En datos registrados por la prensa nacional se hace referencia a inundaciones de la zona que alcanzan alturas de hasta 10 metros, y que el caudal registrado por INAMEH alcanza los 700m³/s, representando solo entre el 12% y el 13% del caudal total.

namb intensifico monitoreo de embalses y del río Unare en el oeste

Camayal y La Tigra son algunas de las represas que están bajo la mira del Ministerio del Ambiente debido a las constantes lluvias.

Aileen Nieto / Doryel Salazar |



El río Unare se desbordó el pasado sábado 18 de agosto Foto: Daniel Olivares

Barcelona.- La directora regional del Ministerio del Ambiente (Minamb), Neyra Fuenmayor, informó que este jueves inspeccionó las poblaciones afectadas por la crecida del río Unare en Clarines, municipio Bruzual, y entregó 65 bolsas de comida como apoyo a la alcaldía.

Una comisión del organismo se dirigió a las poblaciones La Cerca y El Hatillo, donde junto con funcionarios del Ministerio de Transporte Terrestre y Protección Civil, se acordó ampliar las dos bocas de la laguna de Unare, conocidas como Boca Mora y Boca Nueva, para facilitar el desagüe porque "observamos que el caudal está bastante fuerte".

Con esta medida, los entes tratan de minimizar las probabilidades de inundaciones en esas dos localidades pesqueras.

Fuenmayor indicó que el río alimenta la laguna a través de los caños El Alambre y El Hatillo, y por las constantes lluvias ha aumentado la situación de riesgo. Destacó que este cauce recorre unos 20 kilómetros, desde Clarines hasta la costa. La crecida, que aún persiste en la capital del municipio Bruzual, alcanzó los 10 metros.

"Además tiene varias cuencas conectadas, entre ellas los ríos Guere y Aragua, y embalses como Onoto, La Estancia, La Becerra, El Pueblito, Cigarrón, Tamanaco, Guaical, Cují, Camayal, La Tigra y Santa Rosa. Todos están en constante monitoreo".

Estas represas han operado normalmente, según la directora regional del Minamb. El jueves, la cota de descarga en El Pueblito, La Becerra, Cigarrón, El Andino y La Estancia se ubicó en 99.62 metros.

Alivio insuficiente

En Clarines existe una estación automatizada que es operada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inameh), por la cual pasan actualmente 700 metros cúbicos por segundo de agua, "pero es apenas 12% o 13% del caudal", dijo Fuenmayor.

Figura 67 Nota de prensa sobre el río Unare

También se utilizaron referencias fotográficas que permiten observar los hechos antes referenciados, en la fotografía se pueden observar las comparaciones de las alturas o niveles alcanzados por el cauce del río Unare.



Figura 68 Diferentes vistas del cauce del río Unare

También se validaron los datos utilizados en esta investigación, se utilizó el método de doble masa para determinar la consistencia de datos utilizados,

utilizando los registros medios anuales de precipitación expresados en mm para la estación pluviométrica Guanape, al igual que los datos de las otras estaciones con las que se realizó el análisis de consistencia de datos. El periodo abarca desde el año 2010 al 2014.

Los registros medios anuales se obtuvieron a partir de los registros diarios para cada estación cercana a la escogida para este análisis durante el periodo seleccionado que fue el mismo utilizado para las simulaciones y validaciones.

Se obtuvo un valor de R^2 igual a 0,8 lo que nos permite concluir que existe una buena consistencia entre los datos que se usaron en la investigación.

4.5 SIMULACION DE LOS MODELOS LLUVIA ESCORRENTIA ADAPTADOS A LA CUENCA DEL RIO UNARE:

Para el modelaje hidráulico de las crecientes de diseño se realizaron siete (7) simulaciones en total, cuatro (4) para periodos de retorno de (2) dos años, y tres (3) para periodos de retorno de (50) cincuenta años en las mismas distribuciones de área de cada subcuenca que conforman la cuenca del río Unare.

Tomando datos de precipitaciones seleccionados de los registros suministrados por el INAMEH desde el 2010 hasta el 2014, registradas en las estaciones: Aragua de Barcelona, Pariaguan, Clarines, Carito y Boca de Uchire.

El modelo seleccionado es el mismo que para la etapa de validación basada en procesos físicos y con los mismos modelos de simulación.

ESCENARIOS DE SIMULACION

Los primeros cuatro escenarios corresponden a tormentas diseño para periodos de retorno de dos años.

PRIMER ESCENARIO:

Se seleccionaron las subcuencas de los ríos pequeños tributarios al río Unare (RPTU W130-W180) y la subcuenca Guere (W140), las variables de entrada la representa el hietograma de bloque alterno de una lluvia total de 3,22 mm, de dos horas de duración, registrada el 16 de septiembre del 2010 a las 03:45 am hasta las 05:45 am, en la estación de Aragua de Barcelona, como datos de salida se muestran los hidrogramas un caudal pico calculado de 203,2 m³/s y un volumen de 22550,9 m³.

SEGUNDO ESCENARIO:

Se seleccionaron las subcuencas Tamanaco (W150) y la subcuenca Ipire (W170), las variables de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 3,22 mm, de dos horas de duración, registrada el 16 de septiembre del 2010 a las 03:45 am hasta las 05:45 am, en la estación de Aragua de Barcelona .

Como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de 209,3 m³/s y volumen 23353,3 m³.

TERCER ESCENARIO:

Se seleccionó la subcuenca Guanape (W100), la variable de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 1,28 mm, de dos horas de duración, registrada el 07 de octubre del 2013 a las 17:05 am hasta las 18:05 am, en la estación de Clarines.

Como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un Caudal Pico Calculado= $203,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen de $22550,9 \text{ m}^3$.

CUARTO ESCENARIO:

Se seleccionó las subcuencas Tamanaco (W150) y la subcuenca Guaribe (W110), las variables de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 1,28 mm, de dos horas de duración, registrada el 07 de octubre del 2013 a las 17:05 am hasta las 18:05 am, en la estación de Clarines.

Como datos de salida se observa la tabla de resultados y los hidrogramas que muestran un caudal pico calculado de $143,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen de $20025,9 \text{ m}^3$.

A partir de este quinto escenario se trabaja con tormentas de diseño para periodos de retorno de 50 años.

QUINTO ESCENARIO:

Se seleccionaron las Subcuenca de Ríos Pequeños Tributarios al Río Unare (RPTU W130-W180) y la Subcuenca Guere (W140).

Las variables de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 14,88 mm, de dos horas de duración, registrada el 16 de septiembre del 2010 a las 03:45 am hasta las 05:45 am, en la estación de Aragua de Barcelona.

Las variables de salida se observan en el hidrograma de salida con un Caudal Pico Calculado= 5227,4 m³ /s y un volumen de 471453,1 m³.

SEXTO ESCENARIO:

Se seleccionaron las subcuencas Tamanaco (W 150) y la subcuenca Ipire (W 170), las variables de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 14,88 mm, de dos horas de duración, registrada el 16 de septiembre del 2010.

Las variables de salida se observan en el hidrograma de salida con un Caudal Pico Calculado= 5285,0 m³ /s y un volumen de 501668,0 m³.

SEPTIMO ESCENARIO:

Se seccionaron las subcuencas Tamanaco (W150), y la subcuenca Guaribe (W100). Las variables de entrada la representa el hietograma de una lluvia total de 14,88 mm, de dos horas de duración, registrada el 16 de septiembre del 2010 a las 03:45 am hasta las 05:45 am, en la estación de Aragua de Barcelona.

Las variables de salida se observan en los hidrogramas de salida con un caudal Pico Calculado=3417,8 m³/s y un volumen 408409,2 m³.

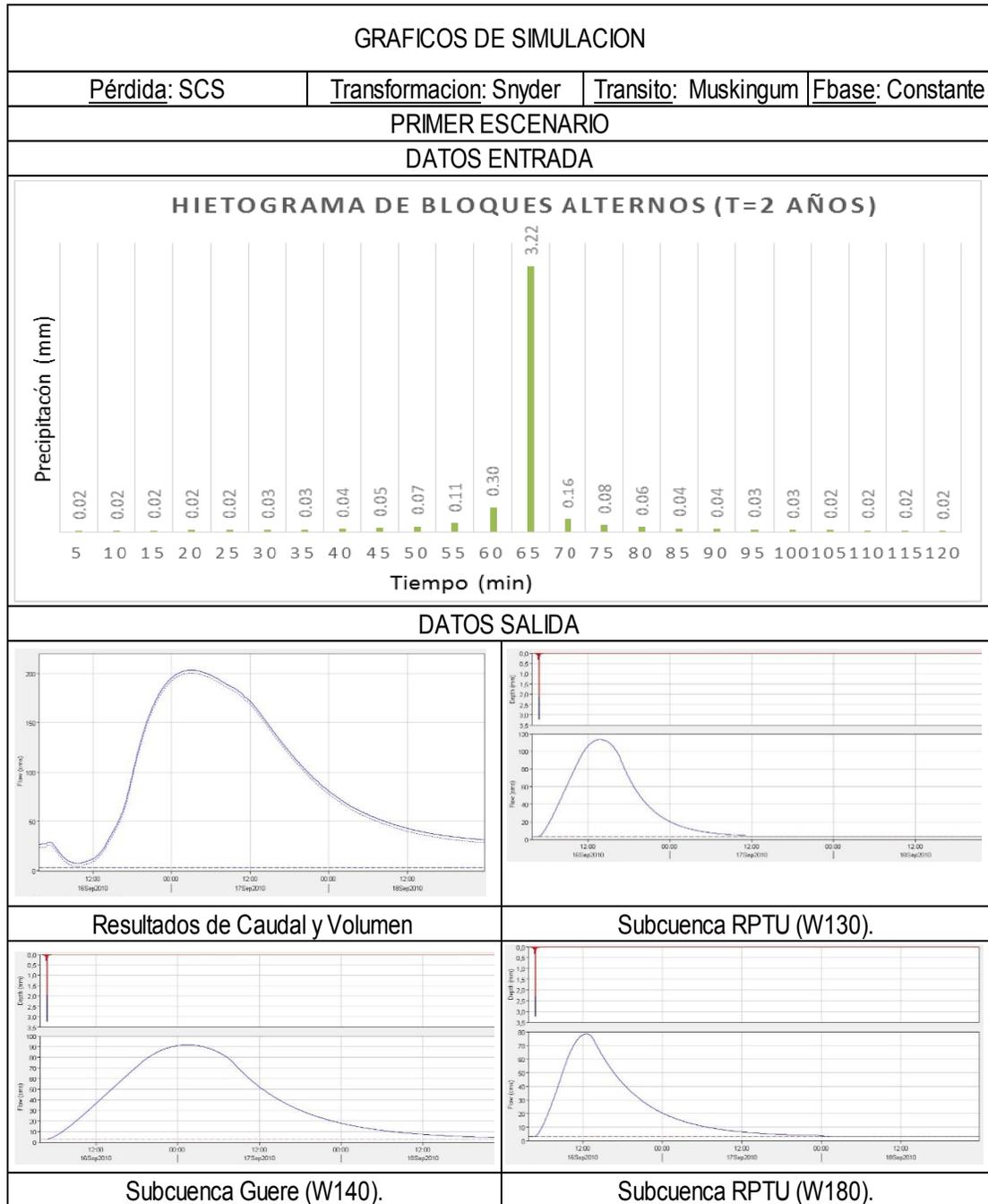


Figura 69 Representación del primer escenario de simulación

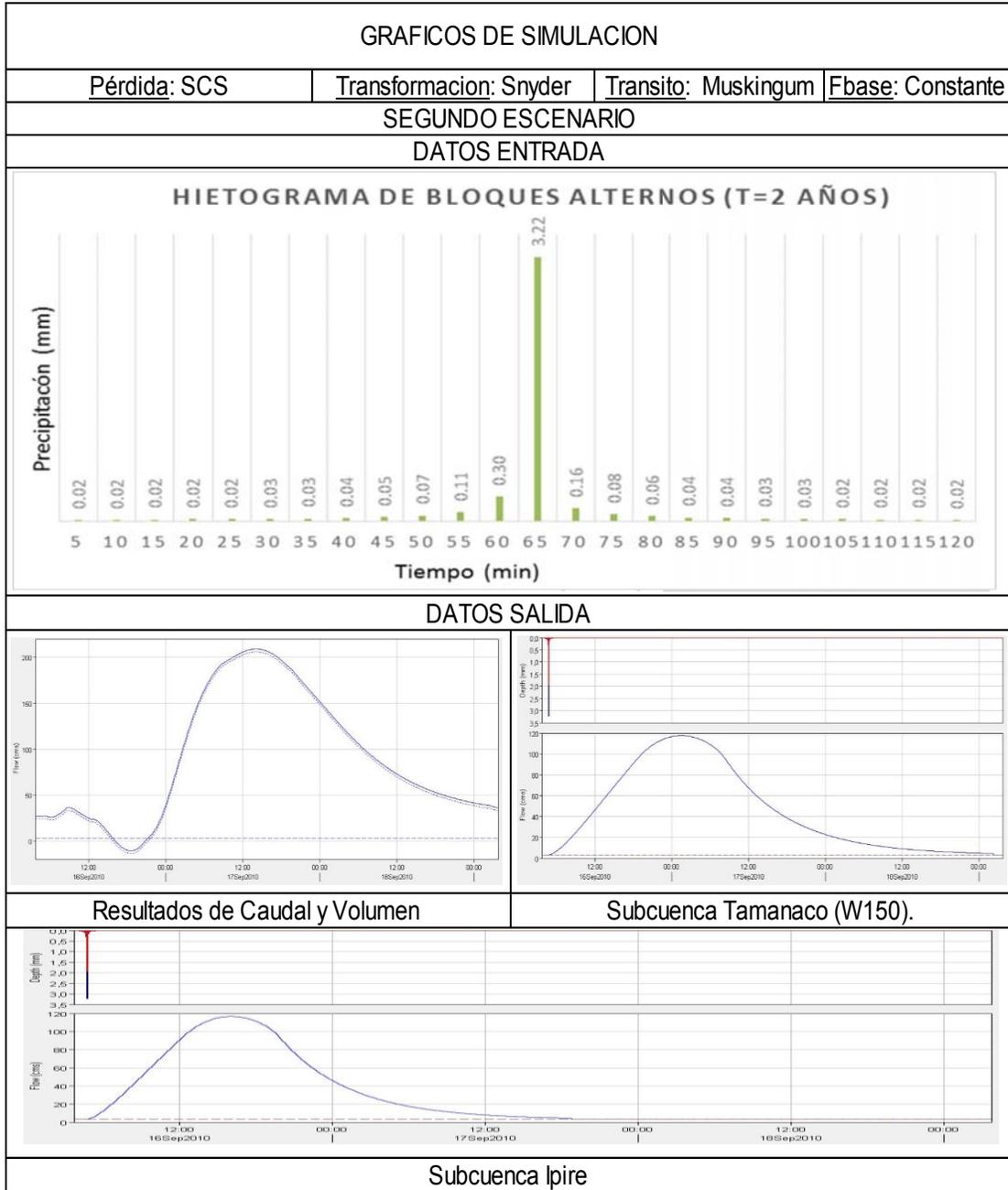


Figura 70 Representación del segundo escenario de simulación

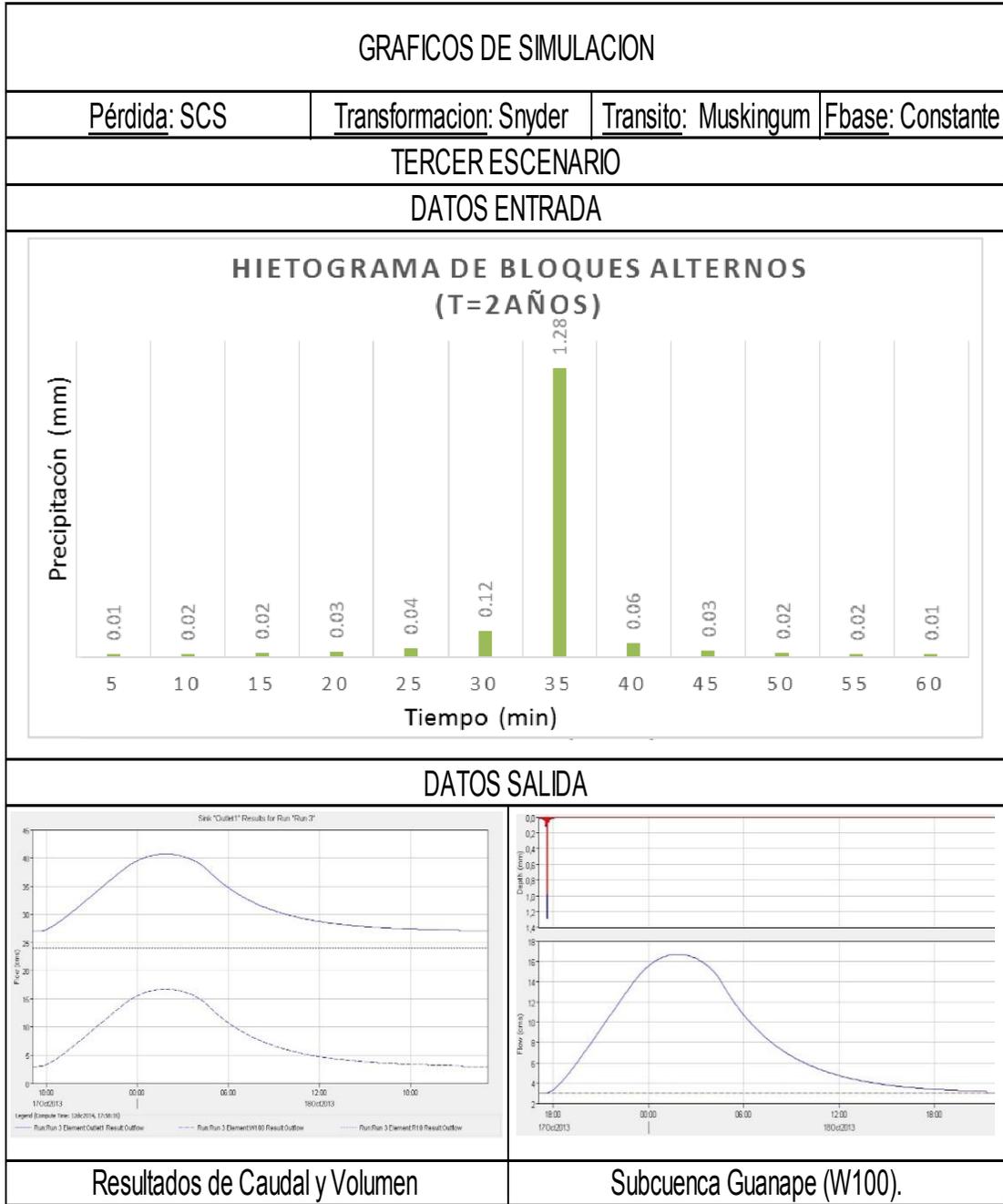


Figura 71 Representación del tercer escenario de simulación

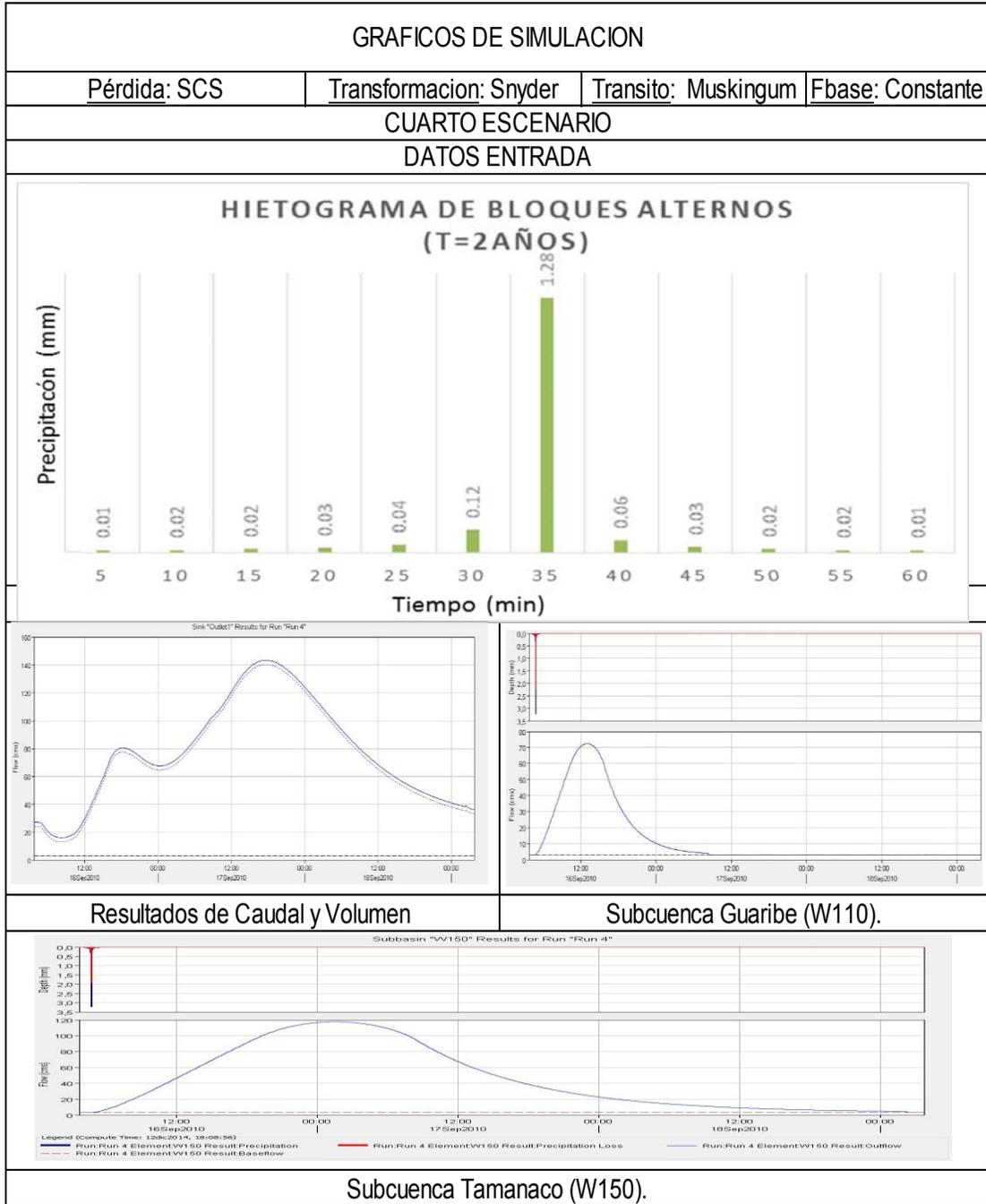


Figura 72 Representación del cuarto escenario de simulación

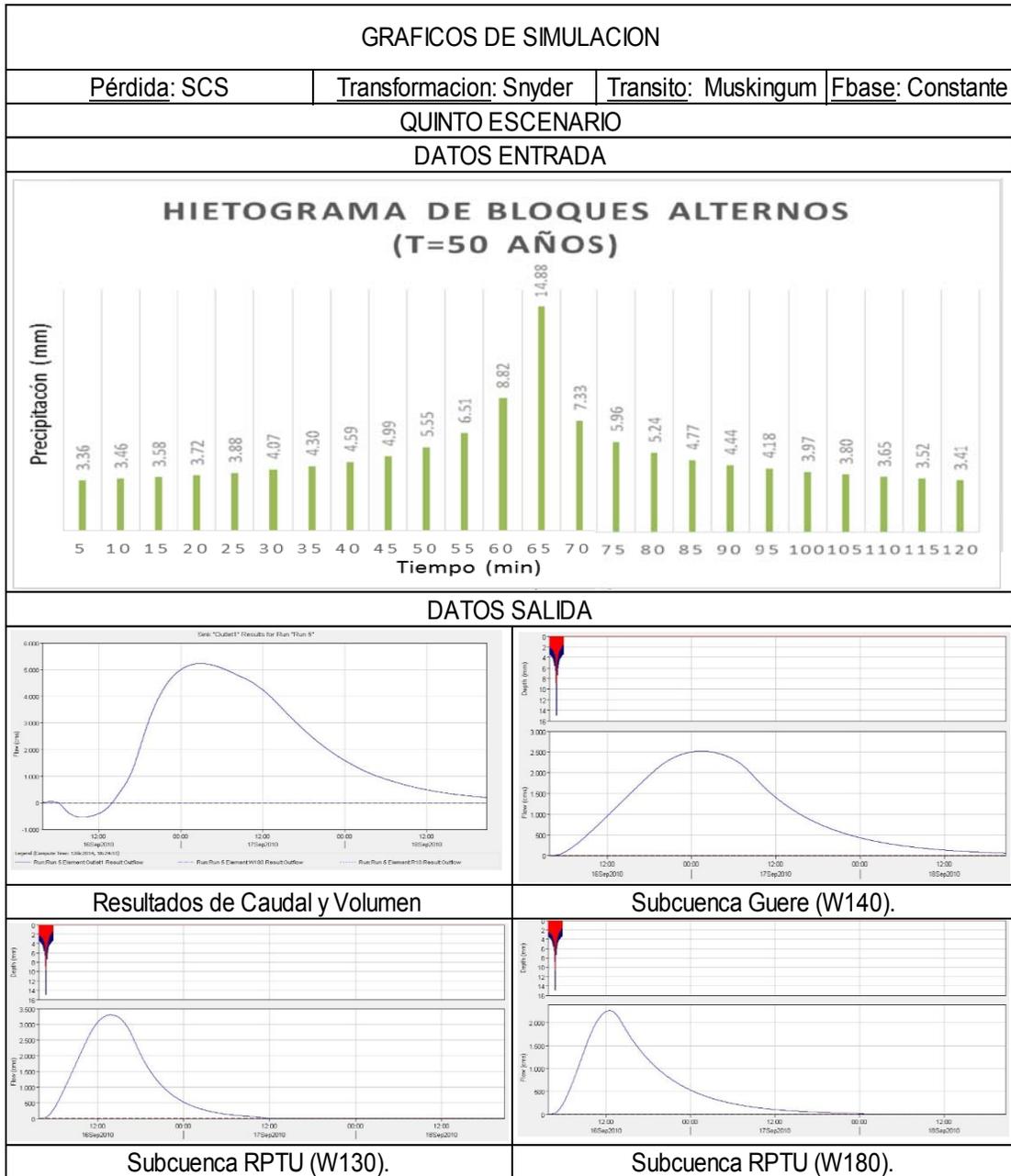


Figura 73 Representación del quinto escenario de simulación

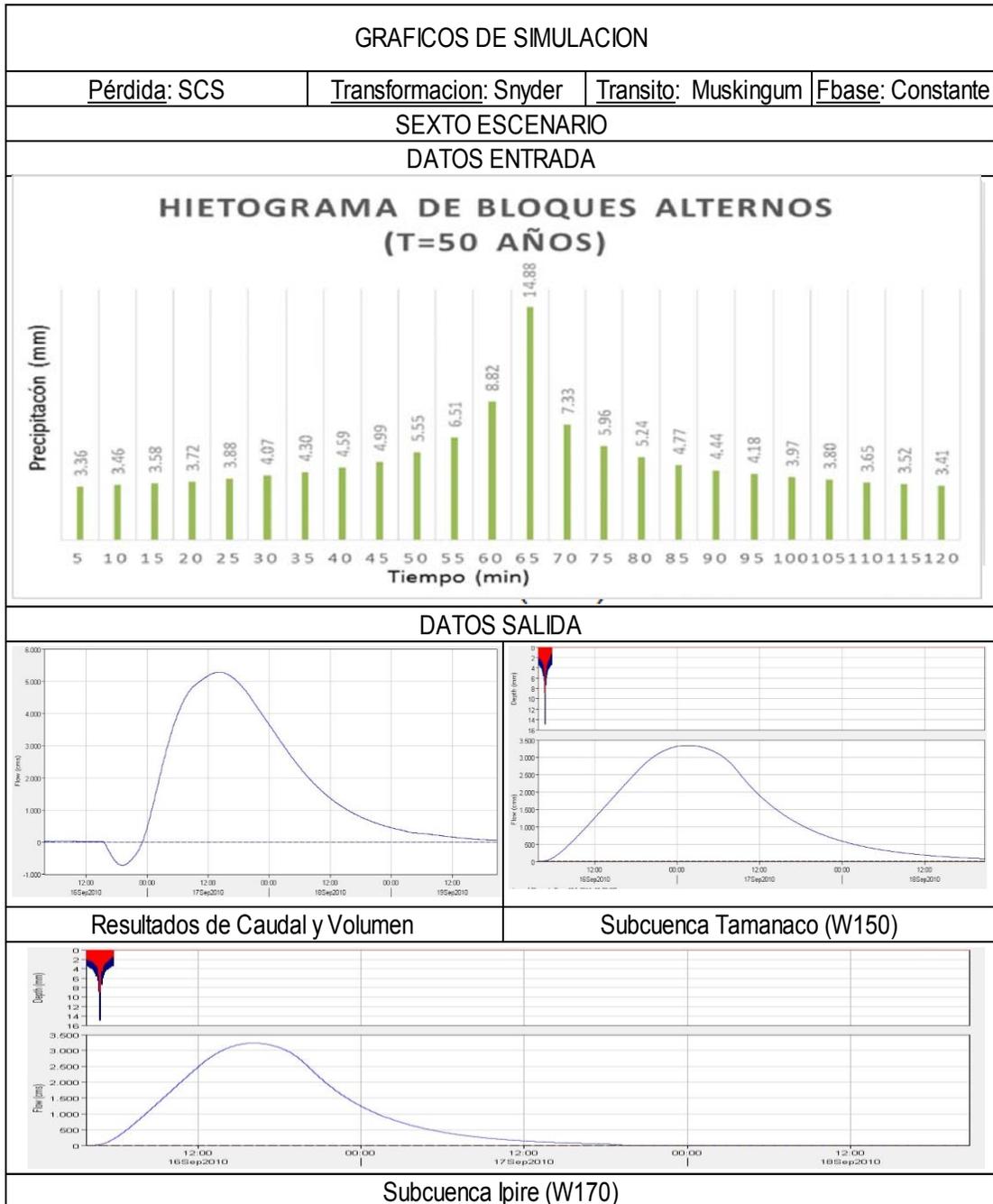


Figura 74 Representación del sexto escenario de simulación

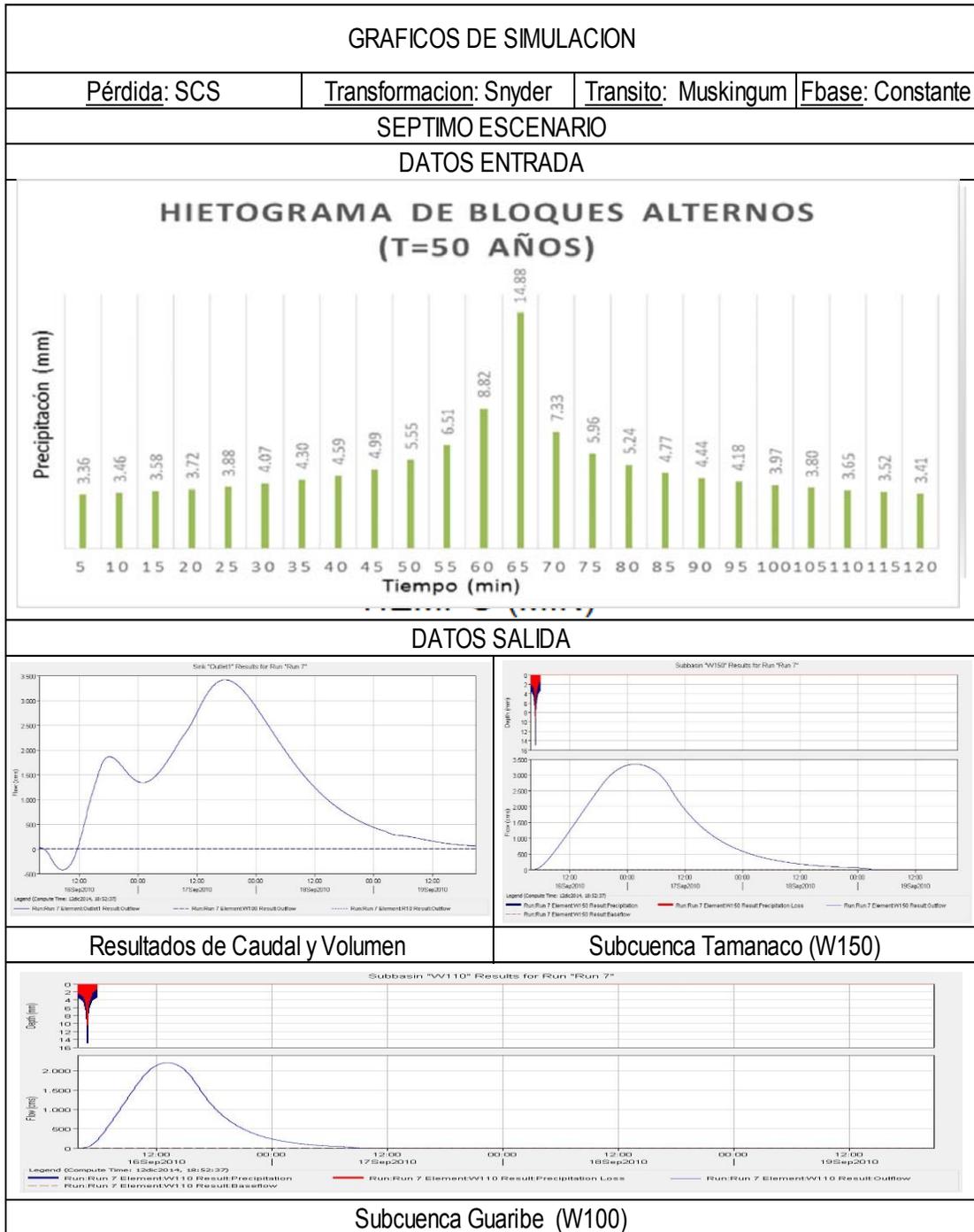


Figura 75 Representación del séptimo escenario de simulación

GENERAR MAPAS DE ZONIFICACIÓN DE PLANICIES INUNDABLES EN LA CUENCA DEL RIO UNARE.

Para lograr el objetivo correspondiente a la evaluación de la influencia de las manchas de inundación sobre los tramos y áreas de riesgo potencial a inundación es necesario generar primero los mapas de zonificación de planicies, según la metodología explicada en el Capítulo III.

Los caudales picos generados en las simulaciones anteriores se transformaron en láminas de escorrentía mediante el procedimiento utilizado por el programa HEC-RAS y con la aplicación del HEC-GeoRas se obtuvieron las planicies inundables sobre la cuenca del río Unare.

En las Figuras 79 y 81 se muestran vistas de planta de las secciones transversales de los ríos y se seleccionaron dos secciones a manera de ejemplo para visualizar el comportamiento de ambos ríos frente a simulaciones para diferentes periodos de retorno.

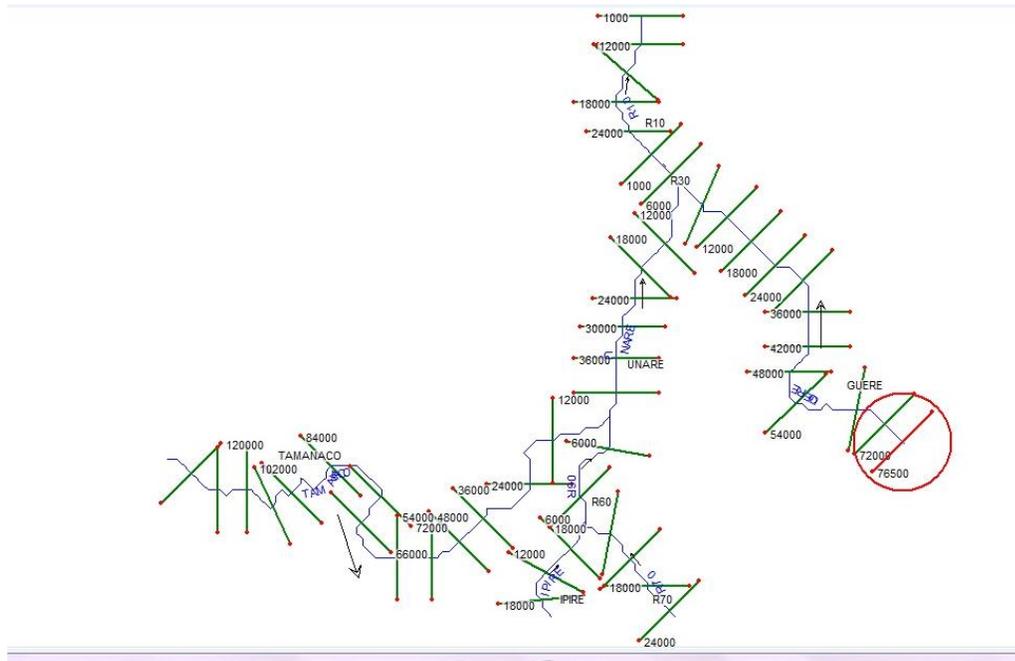


Figura 76 Vista de planta que muestra selección de una sección del río Guere.

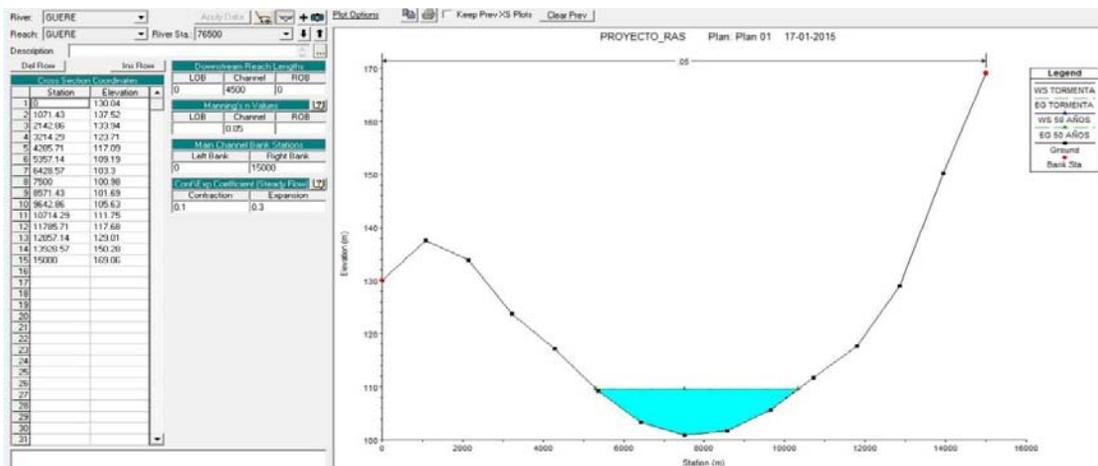


Figura 77 Salida HEC-RAS en sección transversal río Guere (Tr=50 años)

En la Figura 83 se puede observar la planicie de inundación de la cuenca del río Unare generada por la simulación por una tormenta de periodo de retorno de 2 años.

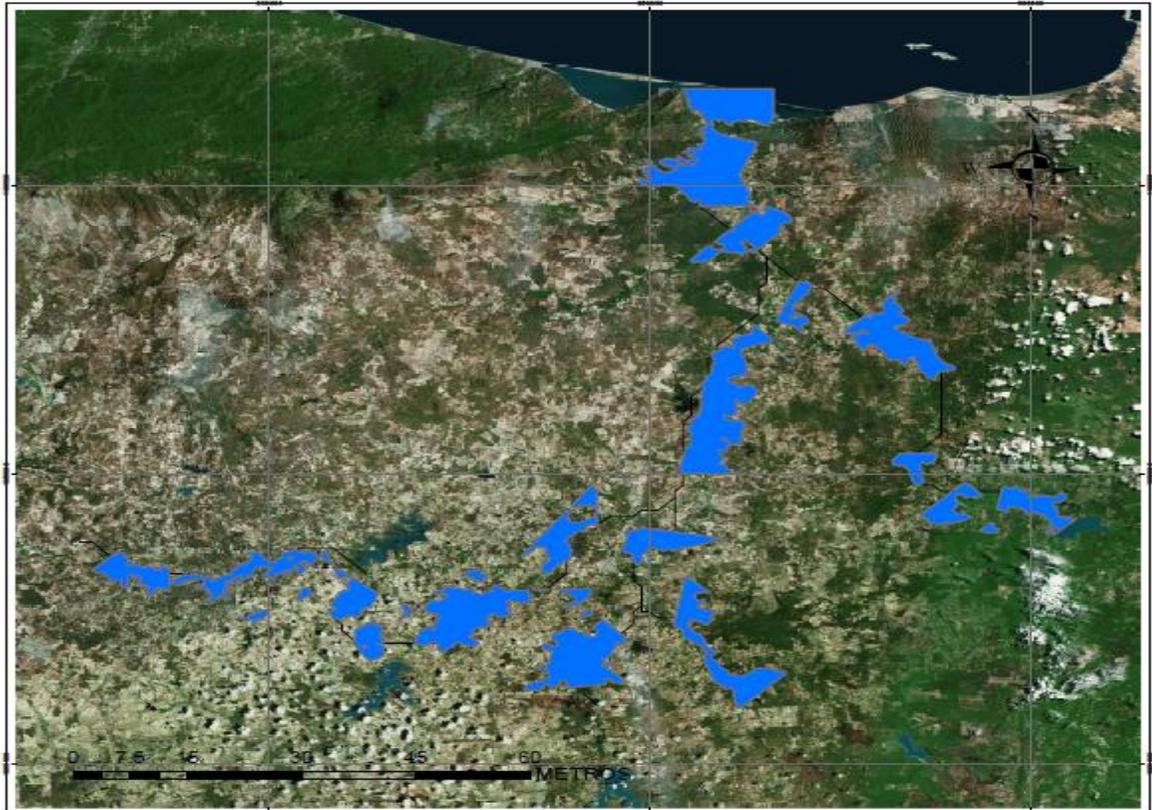


Figura 80 Zonificación de planicies inundables para la cuenca del río Unare para T_r 2 años.

En la Figura 84 se observa la planicie de inundación para un periodo de retorno de 50 años.

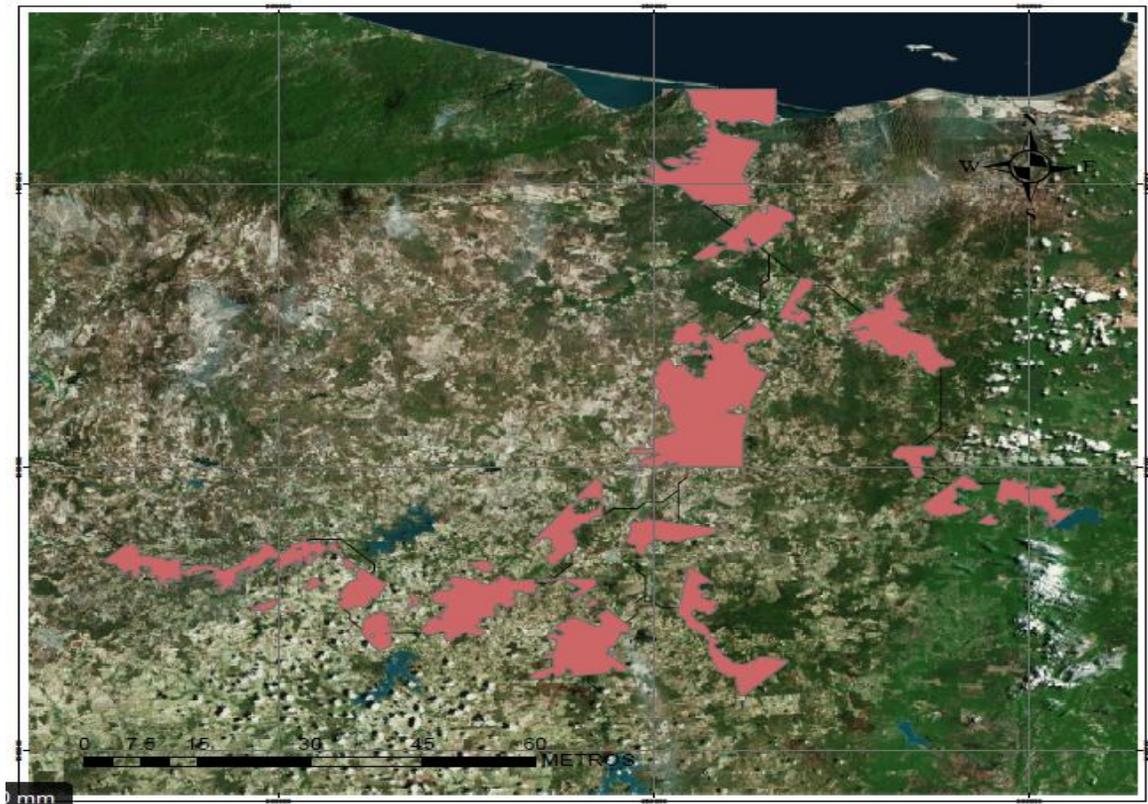


Figura 81 Zonificación de planicies inundables para la cuenca del río Unare para Tr 50 años.

4.5 Evaluar la influencia de las manchas de inundación sobre los tramos y áreas de riesgo potencial significativo de inundación.

Un criterio utilizado para evaluar el riesgo al que están expuestas las comunidades cercanas a estas planicies de inundación es el de la vulnerabilidad que se evaluará según el uso de la tierra, asignándole un criterio de alto a las zonas urbanizadas con infraestructura de primer orden, moderada para el resto de las edificaciones y baja en zonas agrícolas y de vegetación.

De la revisión a los censo poblacionales en la subcuenca Guere es donde está concentrada mayor número de habitantes, en segundo lugar la subcuenca Tamanaco donde se encuentra Valle de Pascua zona con alta densidad poblacional y luego tenemos la zona RPTU donde agrupamos a varias zonas entre ellas Clarines, Onoto, Zaraza, y Boca de Uchire que son zonas pobladas con ciertas infraestructuras, que podíamos clasificarlas como zonas urbanizadas, de acuerdo a este criterio se construyó la siguiente tabla.

Tabla 12 Porcentajes de riesgo según el índice poblacional

Subcuenca	Área (km ²)	Población (%)	Índice de riesgo
Guere	6159	29,94	Alto
Ipire	2868	4,63	Bajo
Tamanaco	6468	22,74	Alto
Guaribe	2043	4,88	Bajo
Guanape	557	4,11	Bajo
RPTU	4656	33,70	Alto

Fuente: Elaboración Propia.

Bajo el criterio de peligrosidad se realizó la clasificación evaluando las planicies de inundación clasificando como altas las llanuras de inundación deltaicas, moderada las terrazas y bajas el resto del área.

En toda la cuenca del río Unare podemos clasificar el uso de la tierra según la siguiente tabla

Tabla 13 Clasificación del riesgo según el uso de la tierra

Uso de la tierra	Área (km ²)	Riesgo
Vegetación Natural	8968	Bajo
Agrícola	13386	Bajo
Urbanismo y otros	384	Alto

Fuente: Elaboración Propia.

Si observamos las planicies de inundación para un periodo de retorno de 50 años podemos observar que las zonas más propensas a riesgo por inundación están ubicadas en las cercanías de los ríos y coinciden con las zonas de mayor densidad poblacional, al superponer el mapa de inundación con el mapa de ubicación de las zonas habitadas el mayor porcentaje de uso de la tierra corresponde a zonas que denominamos urbanas y el otro porcentaje importante corresponde a zonas de vegetación natural, como se observa en la Figura 85.

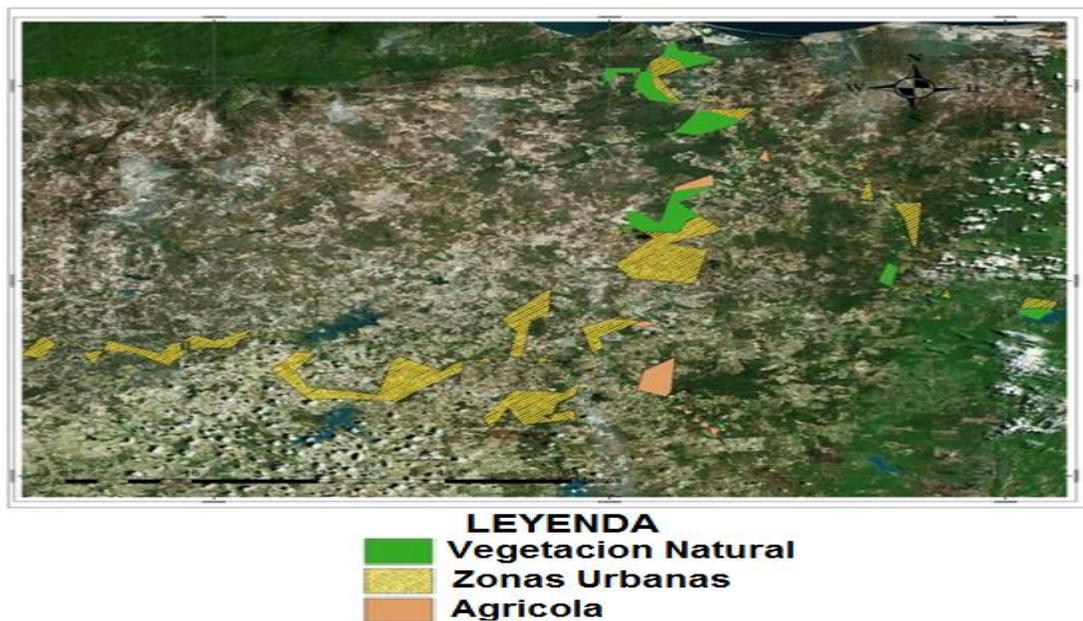


Figura 82 Mapas de zonas de riesgo potencial significativo de inundación en la cuenca del río Unare.

Tabla 14 Porcentajes de riesgo para áreas ubicadas en la planicie de inundación

Uso de la tierra	Área (km ²)	Riesgo (%)
Vegetación Natural	423	35,27
Agrícola	267	22,26
Urbanismo y otros	509	42,47

Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de las imágenes de la zona tomadas a través de satélites se puede determinar que la zona de Clarines, Onoto y Zaraza son las más afectadas por las inundaciones ocurridas en la zona, hechos que también pudieron corroborarse con anuncios de prensa y entrevistas hechas a los habitantes del lugar.



Figura 83 Ubicación del centro poblado Clarines Fuente: Geogle Earth (Marzo, 2015)



Figura 84 Ubicación del centro poblado Onoto Fuente: Geogle Earth (Marzo, 2015)



Figura 85 Ubicación del centro poblado Zaraza Fuente: Geogle Earth (Marzo, 2015)

Como se puede observar el análisis muestra que la zonas más vulnerables es la que comprende toda la planicie de inundación, por lo que los elementos localizados en esa área corren el riesgo de ser destruidos o severamente danados

de presentarse una fuerte inundación. Se deduce entonces, que los elementos más expuestos lo constituyen las estructuras localizadas en las planicies, como acueductos, viviendas, puentes y vías de comunicación localizadas en el curso de los ríos. Otro elemento muy importante lo constituye las superficies dedicadas a la agricultura, que se lleva a cabo en las planicies de inundación y que constituye el medio económico de subsistencia de la mayoría de sus habitantes.

Algunas reseñas de periódicos nacionales que reportan la situación de la región ante las crecidas del río Unare y sus afluentes.

CONCLUSIONES

Al terminar las fases del proceso de esta investigación que consistió en realizar un análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Unare, soportada en la aplicación de modelos matemáticos para la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía de la cuenca, para eventos de distintos periodos de retorno, que permitieron generar los mapas de inundación, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Si es posible adaptar un modelo matemático al pronóstico lluvia-escorrentía para evaluar el comportamiento de la cuenca del Río Unare, este modelo fue calibrado, validado y simulado, generando resultados aceptables de los procesos hidrológicos involucrados, destacándose su relativa facilidad de aplicación y poca cantidad de parámetros involucrados, además de la simplicidad conceptual de los mismos.

Se comprobó mediante la calibración de los modelos de transformación utilizados (SCS, CLARK, SNYDER) que el modelo de transformación del Hidrograma Unitario de Snyder fue el que mejor se adaptó al comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Unare.

La validación del modelo lluvia-escorrentía adaptados a la cuenca del Río Unare arrojó resultados satisfactorios en comparación con los valores obtenidos de las mediciones realizadas en campo.

Los valores de los caudales de diseño obtenidos con la simulación para periodos de retorno de 50 años aportan resultados de alto riesgo de inundación reflejado en las planicies de inundación, con valores de hasta 42,48% en zonas habitadas.

La disponibilidad de elaborar mapas de planicies de inundación ayuda a la ordenación racional del territorio, a minimizar los daños causados por las inundaciones, a conocer las zonas propensas a inundarse, los canales de flujo preferentes y la delimitación del dominio público para la protección del sistema fluvial frente al comportamiento de los seres humanos, pero principalmente son útiles para generar planes de gestión que disminuyan los danos a la salud humana, al ambiente y al patrimonio cultural de la nación.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones en el uso de esta herramienta HEC-HMS se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

Sería conveniente que el Instituto de Cartografía Nacional Simón Bolívar contará con las cartas topográficas del territorio nacional ya digitalizadas en las escalas recomendadas para este tipo de trabajo 1:25000.

El mantenimiento de las estaciones existentes y la creación de nuevas estaciones pluviométricas no solo en la cuenca del Río Unare sino en toda Venezuela debería ser una prioridad de los entes gubernamentales.

Con respecto a los resultados obtenidos de la generación de las planicies de inundación es muy importante que los organismos encargados de la protección civil del país conocieran y aplicaran los conocimientos que les permitieran implementar planes de alerta temprano como método de mitigación y preparación ante inundaciones, creación e implementación de programas de educación ambiental dentro de las comunidades concientizando a la población a no utilizar las zonas tradicionalmente inundables, al lado de las llanuras de inundación de los ríos para ubicar asentamientos humanos y uso del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANDREU, J. (1993): Análisis de Sistemas y Modelación en Conceptos y Métodos para la Planificación Hidrológica. CIMNE. Barcelona.

APARICIO, M. (2008): Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México.

BUNGE, M. (1985): La Investigación Científica. Ariel. Madrid.

CEPAL, (1994): Los efectos socioeconómicos de las inundaciones y deslizamientos en Venezuela en 1999.LC/MEX/L421, 14 Febrero 2000.

CEPAL, (1994): La gestión del agua y las cuencas en América Latina. Santiago de Chile. Agosto de 1994.

CORDERO, M. (1999): El Estudio de la Cuenca Alta del Rio Tea. Escuela Politécnica Superior. Galicia, España.

CHAVARRI, E. (1999): Aplicación de HEC-RAS para obtener perfiles Hidráulicos de Caudales de Crecida del Rio Temis. Universidad Agraria La Molina. Perú.

CHOWN, V. (1994): Hidrología Aplicada. McGRAW HILL, Bogotá. Colombia.

CORREA, O. (2010): Estimación de la Producción Hídrica mediante la aplicación de modelos Hidrológicos en la Cuenca del Rio Unare. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

DIAZ, Y OTROS. (2013): Efectos de la implementación de un sistema de información geográfica para la planificación de la prestación de

servicios de drenaje, agua potable y saneamiento en el municipio Naguanagua, Edo Carabobo. 2013. Universidad de Carabobo.

ESTRELA, T. (1996): Los SIG en Hidrología. Curso sobre la Utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología .Cedex. Madrid.

ESTRELA, T. (1997): Máster en Hidrología General y Aplicada. Tomo II. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

FELICISIMO, A. (1998): Modelo Digital del Terreno. Introducción y Aplicación en las Ciencias Ambientales. Oviedo. España.

FELMAN, A. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual.

GARCIA, Y OTROS. (2010): Tres aproximaciones para la estimación y distribución espacio- temporal del balance hídrico cuenca de Cuitzeo.México.

GUEVARA, E. (2000): Sistemas de Conservación y Rehabilitación de Cuencas. CDCH- UC. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

GUEVARA, E. (2004): Hidrología Ambiental. CDCH-UC. Fundacite Carabobo. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

GUEVARA, E. (2005): Gerencia de Desastres. Monografía del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

HERNANDEZ, Y OTROS. (2006): Metodología de la Investigación. McGRAW HILL. México.

KELTON, W; LAW, A (1991): Simulation Modeling y Analisis.United States of America. McGRAW HILL.

LLAMAS, J. (1993): Hidrología General. Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao.

MARQUEZ, A. (2011): Zonificación de planicies inundables en la cuenca del Río Unare. Segundo Congreso Venezolano de Ciencia y Tecnología. Caracas, Venezuela.

MARQUEZ, A. (2012): Estudio de Intensidad, Duración y Frecuencia de llluvias en la Cuenca del Rio Unare y el Embalse Pao Cachinche. CIHAM- UC. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

MARZAL, C. (2012): Impacto del Cambio Climático sobre la Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Elqui. Universidad de la Serena. Chile.

NAMIA, L. (2007): Manual Básico de HEC-HMS 3.0 Y HEC-Geo-HMS 1.1. Granada.

PEDRAZA, R. (2005): Uso de Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica en la modelación Hidrológica.

PROYECTO VEN/79/001, (1993): Sistemas Ambientales Venezolanos. Metodología para la Definición de Regiones, Subregiones, y Áreas Naturales Departamento de Reproducción Gráfica DGPOA. Caracas. Venezuela.

ROJAS, R. (2005): Evaluación Preliminar del Modelo HEC-HMS. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

ROJAS, M. (2012): Regionalización de los Modelos de Intensidad-Duración-Frecuencia .Casos Cuencas Río Pao y Unare.

SARRIA, F. (2008): Modelización de Sistemas Ambientales. Universidad de Murcia. España.

SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE MEXICO, (2008): Desazolve del arroyo Iquinuapa, municipio de Jalpa de Mendez, Tabasco, México.

TRIVINO, (2004): Sistemas de Información Geográfica y Modelización Hidrológica. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles No 31, págs 23-46.

U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS, (2006): Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Users Manual Versión 3.1.0.

U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS, (2008): River Analysis System HEC-RAS. Users Manual Versión 4.0.

VALENCIA, F. y GUEVARA, E (2010): Análisis Geomorfológico de la Cuenca del Río Cabriales. VII Congreso de Investigación del CDCH-UC, Valencia, Venezuela. Universidad de Carabobo.

ANEXOS

Crecida del río Unare incomunica a caseríos del municipio Cajigal

03.08.2011 | 12:45 PM | Las comunidades La Encantada, Quiripiche y Onoto están bajo las aguas por causa del desbordamiento del río que ha dejado incomunicados a los habitantes del sector.

Viviana Mella / Pasante USM



El río Unare también inundó sectores de Onoto. Vía @Emilio_Guzmán

Puerto La Cruz.- Residentes de comunidades rurales del municipio Cajigal en el estado Anzoátegui informaron a la redacción de **El Tiempo** el estado de alerta que viven desde hace ocho días debido a la crecida del río Unare.

Las aguas han subido, al punto de generar inundaciones en los sectores aledaños al cauce del río.

Reyes Catabarria, habitante del caserío La Encantada afirmó que las dos vías de comunicación con las que cuenta el caserío están intransitables gracias al nivel del agua, por lo que quienes residen allí han debido esperar hasta el martes por la noche la presencia de Protección Civil.

En el poblado de Quiripiche la situación es similar, según Armenia Meza, moradora del sector, las inundaciones se iniciaron hace aproximadamente ocho días y han aumentado progresivamente de acuerdo a unas marcas que los habitantes han improvisado alrededor de la carretera.

“Hay 16 fincas afectadas, una de ellas perdió toda su cosecha y el ganado, y las demás van por el mismo camino. El caserío está totalmente rodeado, no nos podemos mover de aquí y el agua empozada en el monte ha traído malos olores y mosquitos. Necesitamos la presencia de las autoridades”.

Los vecinos también temen por un poste eléctrico que se encuentra en una zona cercana a la carretera principal, el cual está cerca de ser superado por la altura de la crecida y “puede causar un tragedia si el terreno cede y las guayas tocan el suelo inundado”.

La comunidad de Quiripiche solicita con urgencia la presencia de las autoridades, ya que hasta los momentos no han tenido asistencia.

Río Unare inunda esperanzas de Clarines

Siete sectores agrícolas del municipio Bruzual bajo las aguas

CLARINES.- La improvisada casa de José Vaamonde en el sector Simón Rodríguez de Clarines (Municipio Bruzual), se llenó de agua y también de gente. El agricultor habita con su esposa y cuatro hijos. La delicada situación por las inundaciones obligó prestarle ayuda a otro matrimonio, y a sus tres hijos.

Vaamonde es la cabecilla de una de las 400 familias que han visto como las aguas del río Unare se desbordaron y están progresivamente ahogando la poca agricultura que se cosecha en la región. A pesar que en horas del mediodía las temperatura ronda los 40 grados, al final de la tarde, los torrenciales aguaceros no tardan en llegar.

En promedio llueve de manera intensa por tres horas, lo que ha obligado a personal de Hidrocaribe, a abrir las tres represas cercanas a Clarines.

Representantes de la empresa hidrológica, prefieren descargar el agua poco a poco, que arriesgarse a que los diques se rompan y la inundación se escape de control.

No menos de siete sectores están perjudicados, por lo que efectivos de Protección Civil están desplegados en todo el municipio Bruzual (Clarines). Con varios camiones volteo, efectivos militares y de rescate, asisten a los damnificados.

La primera etapa es resguardar la vida de las personas, quienes son instalados a tres refugios. Uno funciona en una cancha deportiva, y los otros dos, en escuelas públicas.

"En los camiones metemos desde los televisores hasta los cochinos", dijo, el sargento de la Guardia Nacional, Franklín García, mientras carga con los enseres de una familia.

Mary Campos, residente del sector Boca de Guaribe, sacó a sus dos hijos para una zona más alta por el riesgo de inundación. "Hace dos días el nivel del agua lo veíamos lejos, pero ya está en la sala del rancho. Aquí no somos chavistas, pero debemos admitir que el Gobierno nos ha apoyado en todo. Protección Civil está encargada de las cosas que necesitamos; y si el tiempo se pone peor, nos iremos a un refugio".