

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA SUPERIOR  
DEL RÍO DE ORO.**

**JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA SUPERIOR  
DEL RÍO DE ORO.**

**JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Magíster en Ingeniería Civil  
Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático  
GPH**

**Director  
SULLY GÓMEZ ISIDRO (I.C., M.Sc., Ph.D)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

*A mi mamita María del Carmen, quien no pudo estar aquí para verme finalizar con éxito esta etapa de mi vida, y a mi querido papá Antonio, mi amada esposa Tulia Eugenia y a mis dos queridos retoños, Adrián Felipe y Marianna, a quienes por fortuna todavía tengo a mi lado y siempre serán el motor de mi vida y a DIOS por darme toda esta vida para compartirla con ellos.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, quien me brindó la oportunidad de poder adelantar mis estudios de maestría en la Universidad Industrial de Santander, que sin su apoyo hubiese sido imposible llevar a cabo.

A mi directora, La Doctora Sully Gómez I. por brindarme la posibilidad de desarrollar este proyecto de investigación con el grupo GPH, y permitirme la oportunidad de explorar y descubrir nuevos conocimientos.

A todos los integrantes del GPH, que de forma directa o indirecta participaron y aportaron en el desarrollo de este proyecto, como lo fueron los egresados: Édwing Yesid González Parra, José Luis Salazar Mesa, Deivis Orlando Quitian Rojas, Rafael L. Castellanos S., Disson A. Torres H., Wilmer Florez Leal, José Alfredo Rueda Núñez, John Jairo Aguilar Ardila y Cristian Ricardo Caballero Ramirez.

Quiero agradecer a la CDMB, por permitirnos la instalación de la estación automática en la finca el Rasgón, de igual forma a la Piedecuestana de Servicios, por apoyar y permitir la instalación de la estación de aforo automática y también al IDEAM, que aportaron y permitieron la adquisición de gran parte de la información hidrológica.

Finalmente agradecer a todos mis profesores y compañeros de maestría de la UIS, que me apoyaron, estimularon y enseñaron grandes cosas durante mi proceso de aprendizaje e investigación y muy especialmente al Doctor Gustavo Chio y a nuestra querida y siempre recordada, Doctora Esperanza Maldonado que en el cielo nos cuida “Muchas GRACIAS”.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
1.1. MÉTODOS TRADICIONALES.....	22
1.2. MODELOS AGREGADOS.....	23
1.3. MODELOS SEMI-DISTRIBUIDOS. ....	24
1.4. MODELOS DISTRIBUIDOS. ....	25
1.5. MODELOS DISTRIBUIDOS DE BASE FÍSICA.....	25
1.6. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO .....	26
1.7. MODELO SHIA (SIMULACIÓN HIDROLÓGICA ABIERTA).....	28
1.7.1. Primer tanque (T1); .....	29
1.7.2. Segundo tanque (T2); .....	30
1.7.3. Tercer tanque (T3); .....	30
1.7.4. Cuarto tanque (T4): .....	31
1.7.5. Tanque de almacenamiento de nieve (T0); .....	31
<b>2. ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>34</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	34
2.1.1. Localización de la CSRO; .....	36
2.1.2. Vías de acceso; .....	36
2.1.3. Hidrografía de la CSRO; .....	37
2.1.4. Geología; .....	37

<b>3. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA MODELACIÓN EN TETIS .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN .....</b>	<b>43</b>
3.1.1. Creación del modelo digital de elevación. ....	44
<b>3.2. MAPA DE PENDIENTE, DIRECCIÓN DE FLUJO Y FLUJO ACUMULADO .</b>	<b>51</b>
3.2.1. Software ArcMap; .....	51
3.2.2. Corrección de los Sumideros (Pits); .....	52
<b>3.3. MAPAS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN .....</b>	<b>60</b>
3.3.1. Clasificación supervisada de cobertura vegetal y uso actual del suelo; ..	60
<b>3.4. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>70</b>
3.4.1. Estaciones Hidroclimáticas; .....	70
3.4.2. Estación automática de aforo; .....	74
<b>4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1. Modelo conceptual.....</b>	<b>77</b>
4.1.1. Mapas de Litología e Hidrogeología. ....	78
4.1.2. Modelo conceptual propuesto para la CSRO. ....	80
<b>4.2. Mapas de Hu, Ks, Kp.....</b>	<b>85</b>
4.2.1. Mapa de almacenamiento estático Hu.....	85
4.2.2. Mapa de conductividad hidráulica del suelo Ks. ....	88
4.2.3. Mapa de conductividad hidráulica del substrato Kp.....	90
<b>4.3. DEFINICIÓN DE EVENTOS Y PERIODOS DE ESTUDIO. ....</b>	<b>92</b>
<b>4.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN. ....</b>	<b>93</b>
4.4.1. Calibración y validación; .....	94

4.4.2. Aplicación del modelo en otros escenarios de simulación;.....	106
<b>5.1. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>108</b>
<b>5.2. RECOMENDACIONES. ....</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>120</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura1.	Esquema general de representación del modelo tetis [47] .....	28
Figura2.	Esquema del almacenamiento estático tetis [50] .....	29
Figura3.	Esquema del almacenamiento sobre la superficie de la ladera cuando se presenta escorrentía superficial tetis [50].....	30
Figura4.	Esquema del almacenamiento gravitacional en la capa superior del suelo donde se tiene flujo subsuperficial tetis [50].....	30
Figura5.	Esquema del almacenamiento de agua gravitacional en la parte inferior del suelo tetis [50].....	31
Figura6.	Esquema del almacenamiento de nieve tetis [50] .....	31
Figura7.	Localización general de la cuenca superior del río de oro. (csro) .....	34
Figura8.	Esquema de las diferentes planchas que conforman la cartografía existente del igac. A escala 1:25000 para la zona de proyecto. ....	45
Figura9.	Cartografía digitalizada a escala 1:25000 del igac, con las curvas de nivel cada 50 metros de altura, sobre la ventana de estudio.....	45
Figura10.	Ejemplo de ventana para la generación del mde mediante el programa surfer 8.....	47
Figura11.	Mde de la zona de influencia de la csrl generado por el programa surfer 8 con la aplicación del método de interpolación de kriging.....	49
Figura12.	Divisoria de aguas de la csro dentro del mde, generado por surfer 8 que corresponde al área requerida para el modelo. ....	50
Figura13.	(a) esquema de sumidero. (b) corrección de sumidero. (c) esquema modelo d8.....	53
Figura14.	Mapa del mde sin sumideros generado por arcmap (el autor).....	54
Figura15.	Mapa de pendientes sobre la csro generado por arcmap (el autor).....	55
Figura16.	Mapa de dirección de flujo sobre la csro, generados por arcmap (el autor).....	56
Figura17.	Mapa de flujo acumulado y líneas de corriente sobre la csro, generados por arcgis (el autor).....	57

Figura18. Clasificación de pendiente baja, media y alta sobre la csro, generados por arcmap (el autor). .....	58
Figura19. Mapa de clasificación altitudinal según zona climática, generado por arcmap (el autor). .....	59
Figura20. Firma espectral típica de la reflectividad. ....	61
Figura21. Registro fotográfico identificación de vegetación en las diferentes estaciones de muestreo.....	64
Figura22. Registro fotográfico muestreo de suelo en csro.....	66
Figura23. Mapa de tipos de suelo establecido sobre la cuenca del rio de oro [11], [39]. .....	68
Figura24. Mapa de tipos de vegetación establecido sobre la cuenca del rio de oro [11], [39].....	69
Figura25. Mapa de localización de las estaciones utilizadas sobre la csro.....	71
Figura26. Distribución general de información disponible en cada estación.....	73
Figura27. Estación automática instalada en el rasgón.....	74
Figura28. Información disponible en la estación conquistador.....	74
Figura29. Estación de aforo conquistador y equipo. ....	75
Figura30. Mapa con litología de la cuenca tomado de [44] y modificado con arcmap (el autor) .....	78
Figura31. Cuadro resumen de características de las zonas hidrogeológicas en la csro. Tomado de [44].....	79
Figura32. Mapa con zonas hidrogeológicas de la cuenca tomado de [44] y modificada con arcmap (el autor). .....	80
Figura33. Registro fotográfico de la cuenca.....	82
Figura34. Esquema del modelo conceptual en la csro con relación al modelo tetis. ....	84
Figura35. Generación mapa de hu en la csro mediante la superposición de los mapas de suelo, pendiente y vegetación.....	86
Figura36. Resultado final de la generación mapa de hu en la csro mediante el uso de arcmap (el autor). .....	87

Figura37. Generación mapa de ks en la csro mediante la superposición de los mapas de suelo y zonas de interés hidrogeológicas. ....	88
Figura38. Resultado final de la generación mapa de ks en la csro mediante el uso de arcmap (el autor). ....	89
Figura39. Generación mapa de kp en la csro mediante la superposiciones los mapas de la litología y zonas hidrogeológicos.....	90
Figura40. Resultado final de la generación mapa de kp en la csro mediante el uso de arcmap.....	91
Figura41. Periodos de datos a ser tenidos en cuenta para el modelo. Caudales medidos en la estación el conquistador.....	92
Figura42. Ventana de configuración de los ficheros para modelar en tetis.....	94
Figura43. Resultados de calibración evento de invierno.....	99
Figura44. Gráfico de almacenamiento en tanque donde se puede observar un alto nivel del tanque correspondiente al almacenamiento en el tanque que representa el flujo base (h4) .....	100
Figura45. Gráfico del flujo interno que se desplaza verticalmente en el modelo, mostrando que los valores máximos están representados por el flujo de excedencia (x2) y que luego se convierte en escorrentía superficial, .....	101
Figura46. Gráfico del flujo interno que se desplaza horizontalmente en el modelo, mostrando que los valores máximos están representados por el flujo en la estación de aforo y se aprecia claramente la presencia del flujo base (y4) ..	102
Figura47. Mapas del estado de almacenamiento al final del periodo, en los diferentes tanques del modelo, y se puede apreciar que al final del periodo los tanques con mayor capacidad son los del almacenamiento superficial y el flujo base. ....	103
Figura48. Mapas del estado de almacenamiento 22 horas después del pico máximo, en los diferentes tanques del modelo, donde se pueden identificar valores puntuales de almacenamiento. ....	104
Figura49. Grafica de resultados de validación en el periodo de invierno .....	105

Figura50. Grafica de resultados de simulación en el periodo de verano extendido.

106

Figura51. Grafica de resultados de simulación en el evento de lluvia.....107

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	parámetros calculados para determinar el mejor emc. Para el correspondiente método de kriging.....	50
Tabla 2	clasificación general de suelo tomado en la csro. ....	62
Tabla 3	clasificación general de la vegetación tomada en la csro. ....	63
Tabla 4	cuadro localización estaciones de muestreo de vegetación en la csro. ..	65
Tabla 5	cuadro localización estaciones de muestreo de suelo en la csro. ....	67
Tabla 6	cuadro localización estaciones en la csro.....	71
Tabla 7	intervalos de estudio para el modelo. ....	93
Tabla 8	factores correctores determinados para el modelo.....	95
Tabla 9	cuadro comparativo de resultados de calibración y validación. ....	97

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 grafica de datos de estaciones: .....	121
Anexo 2 graficas de resultados de calibración y validación .....	126
Anexo 3 graficas finales del evento observado y simulado.....	127

## RESUMEN GENERAL

**TITULO:** MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO DE ORO. \*

**AUTOR:** JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Modelo hidrológico distribuido; Modelo conceptual; relación precipitación-escorrentía; flujo subterráneo

**CONTENIDO:** La Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) es considerada una reserva hídrica para el Área Metropolitana de Bucaramanga y en especial para el municipio de Piedecuesta, en ella se llevan a cabo una serie de procesos que están condicionados o dependen de factores geomorfológicos, litológicos, estructurales, climáticos, vegetación, suelos, red de drenaje, etc. Sobre la CSRO, se propone la aplicación del modelo hidrológico distribuido TETIS, que quiere explicar algunos fenómenos relacionados con la fase terrestre del ciclo hidrológico. En esta investigación se intenta establecer un modelo conceptual de flujo, como aproximación fundamental para realizar el modelado hidrológico y poder cuantificar las componentes anteriores en forma espacial y temporal. De esta forma se obtiene un acercamiento al conocimiento de las diferentes variables que condicionan el comportamiento del flujo en su fase terrestre y la complejidad de los sistemas montañosos que participan y condicionan el fenómeno lluvia escorrentía en la cuenca, así como identificar la participación del flujo subterráneo y determinar diversos escenarios de impacto en esta cuenca, que permitan la toma de decisiones para mitigar o prevenir los diferentes efectos producidos, de manera que sea una herramienta confiable y apropiada para las diferentes entidades que lo requieran. Adicionalmente con la existencia de este modelo y su constante mejoramiento se podrán proponer diferentes usos y adicionalmente ampliar su atención a otras cuencas cercanas.

---

\* Trabajo de Grado de Investigación

\*\* Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela ingeniería Civil.  
Director (I.C., M.Sc., Ph.D) Sully Gómez Isidro

## GENERAL SUMMARY

**TITLE:** DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL OF THE UPPER BASIN OF THE GOLDEN RIVER.\*

**AUTHOR(S):** JUAN CARLOS FORERO SARMIENTO \*\*

**KEYWORDS:** distributed hydrological model, Model conceptual precipitation-runoff, groundwater flow

**ABSTRACT:** The upper basin of the Rio de Oro (CSRO) is considered a water reserve for the Metropolitan Area of Bucaramanga and especially for Piedecuesta, it carried out a series of processes that are conditioned or dependent on factors geomorphological, lithological, structural, climatic, vegetation, soils, drainage, etc.. On the CSRO, we propose the application of distributed hydrological model TETIS, who wants to explain some phenomena related to the land phase of hydrological cycle. This research attempts to establish a conceptual model of flow, as fundamental approach for hydrological modeling to quantify the above components spatially and temporally. In this way we get closer to the knowledge of the different variables that determine the flow behavior in the terrestrial phase and complexity of mountain systems involved and determine the rainfall-runoff phenomena in the basin, and to identify the share of groundwater flow and determine various impact scenarios in the basin, allowing decisions to mitigate or prevent different effects, so it is a reliable and appropriate for the various entities that require it. In addition to the existence of this model and its continuous improvement may propose different uses and further expand its application to other nearby basins.

---

\* Master's Degree Thesis Work

\*\* Physico-Mechanics Engineering Faculty. School of Civil Engineering.  
Advisor (I.C., M.Sc., Ph.D) Sully Gómez Isidro

## INTRODUCCIÓN

Colombia por su localización en la zona tropical, rodeada de dos océanos y con un sistema montañoso andino, afectado por diversos sistemas de circulación global, cuenta con unas características climáticas y geológicas diferentes a las zonas europeas y americanas, donde generalmente se han desarrollado la totalidad de las investigaciones hidrológicas. Por tal razón los modelos hidrológicos existentes, que han sido la base de investigaciones en estos países, no pueden aplicarse desligados de las condiciones particulares de nuestra región.

En muchos de los proyectos de infraestructura de obras civiles desarrollados en nuestro país, la componente hidrológica representa un papel importante, pero investigaciones al respecto son escasas o aplican metodologías extranjeras que no han sido validadas o que no ofrecen una respuesta confiable o más cercana a la realidad. La poca información hidrológica con la calidad, continuidad y resolución temporal y espacial adecuada, que cumpla con los estándares hidrométricos, no ha permitido el estudio, análisis y comprensión de los principales procesos hidrológicos dominantes en nuestra región.

En los últimos años algunos eventos extraordinarios como el ocurrido en Febrero 12 del 2005 [26] o los que se generaron en las anteriores temporadas invernales (Noviembre del 2008 y 2010), han ocasionado grandes daños y pérdidas a las comunidades aledañas, preocupando a los estamentos gubernamentales encargados de la prevención y atención de desastre.

Los efectos producidos por la deforestación y el cambio de uso del suelo a causa del incremento descontrolado de nuevas zonas de producción agrícola, acompañado de la contaminación de las fuentes hídricas, preocupan la continuidad, cantidad y calidad del recurso hídrico a futuro, que inquieta a las empresas de acueducto quienes deben planificar y proyectar las estrategias necesarias para tratar de mitigar sus consecuencias.

Es así como la “Piedecuestana de Servicios”, entidad prestadora de servicios de acueducto y alcantarillado, del municipio de Piedecuesta, interesada en estudiar y evaluar las características de sus principales fuentes y recursos, se involucra en el desarrollo de actividades investigativas, con la instalación y disposición de la estación de aforo automática y el apoyo permanente con los proyectos adelantados por la U.I.S, principalmente con el grupo GPH y con este proyecto de investigación, el cual le será de gran interés para establecer políticas de proyección y manejo de sus potenciales recursos.

La Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) forma parte de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) donde se encuentran los municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga y otros municipios. La CSRO desempeña un papel muy importante en el abastecimiento del agua para consumo del municipio de Piedecuesta y su zona de influencia y además forma parte de las diferentes actividades dinámicas de los eventos extremos generados por la precipitación. Teniendo en cuenta su importancia, se vé la necesidad de estudiar en forma integral la cuenca para evaluar sus diferentes características hidroclimáticas y geológicas, a fin de establecer la caracterización física del medio donde se suceden las diferentes componentes del ciclo hidrológico.

El modelo conceptual distribuido SHIA (Simulación Hidrológica Abierta) [44] ahora llamo “TETIS”, reconocido en el ámbito nacional e internacional es un modelo que se apoya en la física de los procesos teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca. Se requieren de una cantidad moderada de datos y un conjunto de funciones matemáticas para modelar los procesos de precipitación escurrentía a escala de cuenca.

Los Objetivos generales de esta investigación pretenden, estudiar las variables físicas que permitan identificar los diferentes sistemas de flujo presentes en la Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) y plantear un modelo conceptual que pueda ser representado por un modelo hidrológico distribuido con el fin de analizar diferentes escenarios en la cuenca.

A continuación se resume la estructura general de este trabajo de grado que fue realizado como proyecto de investigación en la maestría de ingeniería civil:

Sección 1: Se describe de manera resumida el estado del arte relacionado con la hidrología y los modelos hidrológicos, como ha sido su evolución hasta llegar a los modelos actuales, en especial sobre el modelo TETIS y cuáles han sido las últimas implementaciones y aplicaciones tanto internacionales como nacionales y regionales.

Sección 2: Se hace una descripción completa del área de estudio en cuanto a su localización general su clima su geología y geomorfología.

Sección 3: En este capítulo se explican las metodologías y procedimientos empleados para la recopilación y revisión de la información requeridos para los diferentes procesos de modelación y su correspondiente adaptación a los formatos exigidos.

Sección 4: En este capítulo, se encuentran las características y criterios tomados para la selección y aplicación de los diferentes eventos de calibración y validación del modelo dentro de la cuenca, con las respuestas encontradas y además se plantean 2 escenarios de simulación particulares.

Sección 5: Se presentan las principales conclusiones y observaciones sobre el trabajo.

## **1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO**

La hidrología se presenta como una ciencia desarrollada para resolver las inquietudes del hombre ante diferentes fenómenos naturales, que presentan retos, ante su incesante deseo de controlar los elementos, por lo que también se requiere de la definición de los diferentes tipos de problemas, con el fin de establecer adecuadamente los elementos necesarios para lograr su objetivo.

Existen problemas relacionados con la conservación o permanencia de los recursos hídricos por lo cual se ve la necesidad de estudiar el comportamiento de los fenómenos no solo en un intervalo de tiempo particular, pues se observa que algunos fenómenos tienen una recurrencia, por lo que a este tipo de estudios se les llamó modelos continuos, pero también se observa que estos fenómenos pueden generar en algunas ocasiones, eventos extremos que ponen en riesgo las estructuras o la seguridad de las comunidades, por lo cual se desarrollaron dentro de estos estudios otros modelos que puedan predecir la ocurrencia de un evento; a estos se les llamaron modelos de eventos.

La hidrología se encuentra asociada con la dinámica, distribución y almacenamiento del agua en diferentes compartimentos. La simulación hidrológica es la representación mediante modelos matemáticos, de uno o más procesos del ciclo hidrológico. En el ciclo hidrológico terrestre, la precipitación, la evaporación y la escorrentía, son los principales procesos, los cuales se encuentran relacionados con el transporte de humedad de una parte del ciclo a otro.

Los modelos hidrológicos son herramientas que permiten abordar soluciones a problemas de calidad y cantidad de agua. Estos modelos, pueden predecir y determinar parámetros hidrológicos, que permiten el buen uso de los recursos hídricos. La evaluación de los modelos hidrológicos se realiza en tres dominios: tiempo, espacio y frecuencia. Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados

como modelos formales, ya que utilizan métodos matemáticos y representaciones físicas del sistema.

Los modelos hidrológicos, están compuestos generalmente por tres elementos básicos, ecuaciones que rigen los procesos hidrológicos, mapas que definen el área de estudio y una base de datos numérica que describe el área de estudio y sus parámetros. Estos elementos se combinan para obtener los resultados requeridos por el modelo.

Los primeros modelos de precipitación – escorrentía se desarrollaron para la obtención de los caudales de crecidas a partir de datos de precipitación de una tormenta.

### **1.1. MÉTODOS TRADICIONALES.**

A finales de los 60 se consideraba que en las crecidas, una gran parte de su caudal era la lluvia que escurría sobre la superficie y basados en este esquema se generaron los primeros modelos con algunas pequeñas diferencias.

La representación de eventos inicia con la determinación de la precipitación neta efectiva, correspondiente a la diferencia entre la precipitación directa y las pérdidas hidrológicas, pero en los modelos originales no se da mucha importancia a la intercepción y el almacenamiento en las depresiones, por lo tanto las pérdidas hidrológicas se le atribuyen principalmente a la infiltración, la cual se ha estimado con el uso de ecuaciones reconocidas que representan un modelo de infiltración como: Horton, índice  $\Phi$  (tasa constante de infiltración), la tasa de pérdidas proporcional a la intensidad de la lluvia (método racional 1851 0 1889) [12] y el número de curva de la SCS [42]. La física del movimiento del agua en el suelo se representa por métodos simples como la onda cinemática [8] y una vez obtenida la precipitación neta promedio, esta debe ser transformada en la respuesta de la cuenca mediante una función de transferencia como es el Hidrograma Unitario.

Obtenido el hidrograma en un punto se procede a analizar el efecto de propagación de la onda de crecida (tránsito) a través del cauce principal, utilizando

las ecuaciones de Saint Venant, la ecuación de onda difusa, la ecuación de onda cinemática o el método de Muskingum.

Algunos de estos modelos que se basan en el procedimiento tradicional para eventos son: El HEC – 1 (1980, 1990, 1992) [31] y su versión mejorada el HEC – HMS (2000) [32], del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y los procedimientos TR-55 y TR-20 del SCS. (1975, 1960's)

HEC-1 considera que cada proceso de la escorrentía ocurre uniformemente y en la escala de subcuenca se considera como modelo agregado, este modelo es quizás el más utilizado en el mundo. La nueva versión HEC-HMS, ofrece una interfaz más amigable y permite la subdivisión de la subcuenca en celdas con mayor variabilidad espacial de sus características.

TR-20 y TR-55 se conocen como Technical Report # 20 y # 55 de la SCS, se basan en la estimación, a partir del número de curva, de la precipitación que se convierte en escorrentía y finalmente se aplica un hidrograma sintético muy simple para obtener el hidrograma. Muy útil en cuencas agrícolas de topografía plana y ondulada, pero en otras cuencas es deficiente.

La debilidad y carencia de los modelos tradicionales, radica en que no responden a los conceptos de la hidrología de cuencas que se ha introducido en los últimos años, pues la escorrentía superficial no siempre es la más importante. Existe una no linealidad de la respuesta que no se tiene en cuenta; Las ecuaciones no son siempre aplicables a la escala de la subcuenca y el tránsito de crecidas no representa adecuadamente la distribución y la forma real de la cuenca.

## **1.2. MODELOS AGREGADOS.**

Los modelos agregados conceptuales son aquellos que se interesan en la respuesta hidrológica de la cuenca o subcuenca, como un todo y se apoyan en la representación conceptual de la misma. Generalmente estos modelos se componen de dos submodelos complementarios, el de producción de escorrentía y el de transferencia escorrentía.

- El submodelo producción de escorrentía determina la cantidad de agua que se convierte en escorrentía y en almacenamiento en distintos procesos.
- El submodelo transferencia de escorrentía determina la simulación del flujo a través de los elementos de la red mientras se desplaza a la salida.

Estos modelos en su mayoría representan la producción de escorrentía en la cuenca mediante una serie de tanques interconectados entre sí.

De los modelos de simulación continua se destaca el modelo Sacramento SMA-NWSRFS [10], por su popularidad, es uno de los modelos agregados conceptuales aplicables a crecidas que pretende representar con sentido físico la cuenca. El modelo utiliza variables globales sobre toda la cuenca para representar los diferentes almacenamientos superficial, subsuperficial y subterráneo y las distintas componentes de la escorrentía; este es un modelo con 16 parámetros donde algunos se calculan por calibración por lo que no es muy atractivo para la modelación distribuida pues para todas las subcuencas se tienen que determinar estos parámetros.

Otros modelos utilizan 4 tanques o más, como el HBV (Japonés), NAM del DHI (Sueco), XINANJANG (Chino), GR- 3J (Francés), SFB (Australiano), etc.

### **1.3. MODELOS SEMI-DISTRIBUIDOS.**

Algunos modelos sin ser planteados como distribuidos tratan de tener en cuenta la estructura de la cuenca y la red de drenaje, además subdividen la cuenca en múltiples elementos para tener en cuenta sus propiedades en el comportamiento de algunos componentes en la respuesta hidrológica.

El modelo TOPMODEL [9], considera que las condiciones de flujo en laderas y a través del suelo, varían con el área drenada según sea su posición y su pendiente. La cuenca se divide en múltiples elementos agrupados según su importancia, basándose en el índice topográfico.

#### **1.4. MODELOS DISTRIBUIDOS.**

Estos modelos representan la estructura de la cuenca como un conjunto de elementos con capacidad de almacenar y/o transportar agua. Divide la cuenca en elementos más pequeños y se estima la escorrentía a lo largo del tiempo. Este modelo considera la variabilidad espacial de la precipitación y algunos elementos de la producción de escorrentía. La transferencia de la escorrentía desde las unidades consideradas, hasta la salida de la cuenca se realiza por: agregación simple, hidrograma unitario distribuido, onda cinemática, o ecuación de onda difusa.

Un ejemplo de este tipo de modelo es el modelo Palacia, fue desarrollado por Francés y Benito (1995) [19], en la Universidad Politécnica de Valencia. En este modelo se representa la cuenca mediante un conjunto de celdas rectangulares, que se consideran las unidades de producción de escorrentía. Este modelo requiere, dos mapas de información: un mapa de isócronas y un mapa con umbrales de escorrentía en cada celda. El mapa de umbral de escorrentía se obtiene con base en los mapas de pendiente, tipo de suelo y vegetación y uso del suelo.

El modelo considera que durante las crecidas la componente más importante del caudal es la escorrentía superficial y que el flujo base y la escorrentía subsuperficial pueden ser despreciadas o incluidas en el embalse lineal.

#### **1.5. MODELOS DISTRIBUIDOS DE BASE FÍSICA.**

Estos modelos representan la física de la fase terrestre del ciclo hidrológico y realizan seguimiento desde su ingreso a la superficie del suelo hasta su salida de la cuenca. La escorrentía en cada elemento es representada mediante ecuaciones de conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento y/o conservación de la energía y algunas ecuaciones empíricas.

La gran carga computacional generada al simular la dinámica tridimensional de la hidrología de la cuenca cuando está el flujo en la zona de suelo parcialmente saturado por la alta no linealidad del proceso, requiere la reducción de la cantidad

de cálculos, por esto se deben de adoptar diferentes simplificaciones como en el caso del modelo SHE – Systeme Hydrologique Europeen [50] (TETIS), que considera que el flujo en la zona no saturada del suelo es un proceso principalmente vertical.

Este modelo no tiene ninguna restricción en cuanto a la resolución temporal de la información meteorológica, el problema son las condiciones del equipo para efectuar los cálculos y el tiempo de ejecución.

Un modelo completamente distribuido permite obtener simultáneamente los caudales en diferentes puntos de la cuenca, además de esto el modelo permite considerar: la variabilidad espacio temporal de la tormenta, caracterizar geomorfológicamente la cuenca, la variabilidad espacial de las características del suelo, la estructura de la red de drenaje, la variabilidad espacial de los cauces tanto en geometría como en la hidráulica.

Los modelos globales distribuidos permiten una gran variabilidad espacial y natural, con probabilidad de interacción horizontal como infiltración en laderas o cauces, saturación, control de flujo en cauces, niveles freáticos, con gran posibilidad de explorar la información espacial existente y con resultados en cualquier punto de la cuenca; además es posible analizar problemas de eventos con condiciones iniciales de humedad en la cuenca, con solución continua y balance.

Algunos de estos modelos de este tipo son el Simpa del CEDEX (1994) pero a escala mensual y no representan eventos de crecientes, el modelo TETIS del DIHMA- UPV (2001) de libre distribución y cuya base primaria fue el SHIA [50], HL - RMS de Koren (2003) y el TACD de Uhlandrook (2004).

## **1.6. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO**

Un modelo conceptual es una representación aproximada del fenómeno que se quiere simular, basado en la lista descriptiva de objetos y elementos asociados a dicho fenómeno.

El modelo conceptual hidrológico debe brindar información sobre los diferentes procesos que transforman y regulan la respuesta hídrica así como su origen y movimiento en un espacio de control determinado. Estos “procesos de transformación”, están condicionados o dependen de factores climáticos, meteorológicos, geomorfológicos, litológicos, estructurales, químicos, vegetación, suelos, red de drenaje, etc.

La respuesta hidrológica de una cuenca es la integración de los procesos hidrológicos que ocurren tanto en superficie como en la subsuperficie y que deben ser estudiados y explicados en forma integral. La interrelación compleja entre las componentes: atmosférica, superficial y subsuperficial (zona no saturada y saturada) requieren que se haga uso de diferentes disciplinas del conocimiento para poder entender el movimiento del agua en la cuenca. La resolución espacial y temporal de análisis a su vez conlleva nuevos retos en la hidrología haciendo que la ocurrencia de los procesos hidrológicos deba ser vista mínimo en 4 dimensiones (espacio, tiempo) [29], [47].

Para la representación de los procesos hidrológicos en la cuenca, el modelo se compone de dos submodelos conceptuales, uno de producción de escorrentía y el otro de traslación. El primer submodelo se encarga de representar la producción de las distintas componentes de la escorrentía (cualquiera que sea su naturaleza) a nivel local (celda, ladera o subcuenca). El segundo submodelo trata de representar el viaje de la escorrentía (producida a nivel local), que se va agregando aguas abajo en la red de drenaje, hasta que llega a los distintos puntos de interés.

Para la producción de escorrentía, algunos esquemas conceptuales consideran tres componentes asociadas al tiempo de respuesta y se refieren a escorrentía rápida, intermedia y lenta [47], [44]. Otros esquemas se refieren a los distintos caminos que puede tomar el agua: flujo superficial, interflujo, flujo subsuperficial y flujo base [44], [29].

En el modelo de traslación se tiene en cuenta las características del flujo, de los cauces y de la cuenca (su variabilidad espacial y temporal), la información que se

puede tener sobre todos estos elementos y las posibilidades de modelación a la escala de interés, se definen unos conceptos básicos que constituyen los puntos de partida para la formulación del modelo.

### 1.7. MODELO SHIA (SIMULACIÓN HIDROLÓGICA ABIERTA)

El modelo hidrológico utilizado, denominado SHIA (TETIS) [47] desarrollado inicialmente por el Profesor Jaime Ignacio Vélez U. como su tesis doctoral y corresponde como esquema general a un modelo hidrológico conceptual distribuido que se apoya en la física de los procesos teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca. Ha sido usado en: [21], [22], [45], [46], [49], [50], [51], [53], [54], [55].

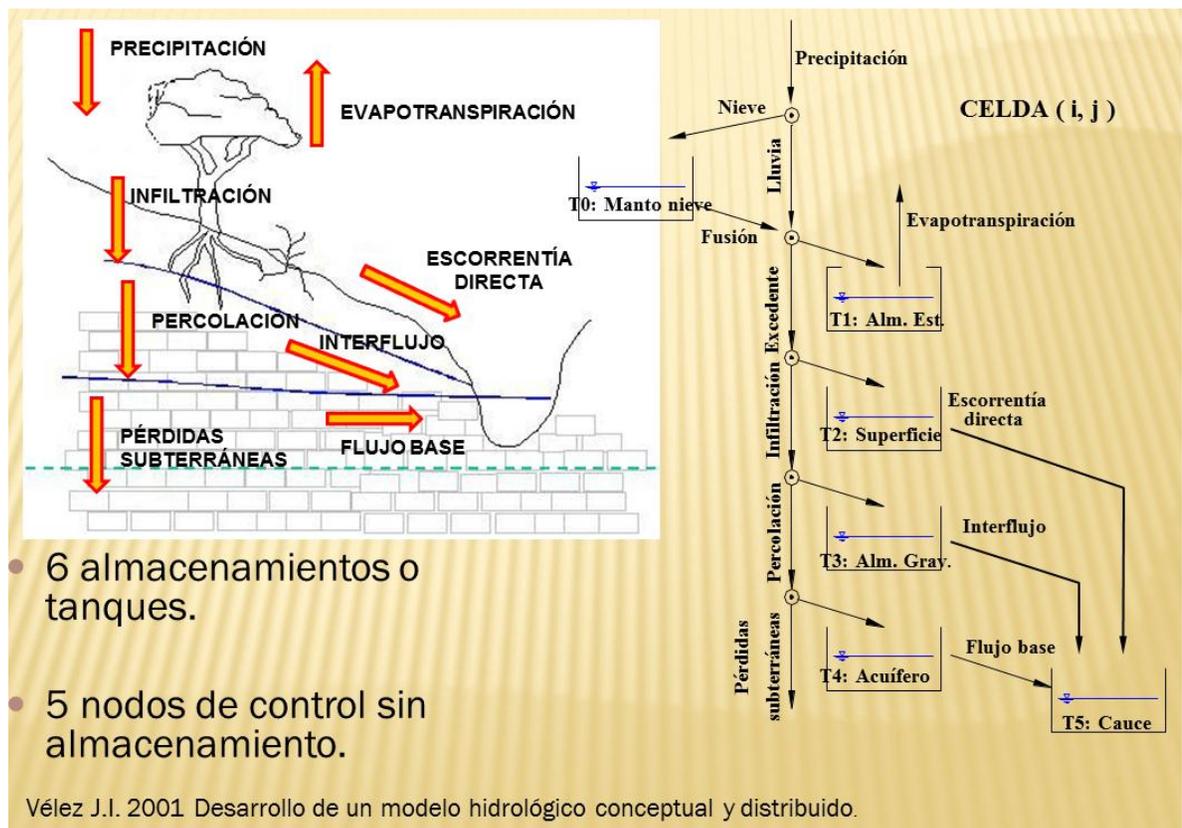


Figura1. Esquema General de representación del modelo TETIS [47]

Los procesos determinantes de la producción y transferencia de escorrentía se presentan mediante la ecuación de continuidad y unas expresiones conceptuales o empíricas para cada uno de los modelos. Para ello se divide la cuenca en celdas cuadradas donde cada una de las celdas representa una unidad de respuesta hidrológica (URH), y cada una de las celdas posee un conducto distribuidor el cual mediante ecuaciones elementales de transferencia de flujo define la cantidad de agua que se mueve hacia los diferentes tanques.

El modelo, considera que los procesos determinantes en la producción y transferencia de escorrentía, en una columna de suelo (interceptación, detención, infiltración, evaporación y evapotranspiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los cauces de la red de drenaje) se pueden representar por un sistema de cinco tanques o elementos de almacenamiento, conectados entre sí y con los de otras celdas, respecto a cada una de las posiciones jerárquicas.

Cada tanque está representando una parte del ciclo terrestre de la siguiente forma:

**1.7.1. Primer tanque (T1);** Representa el almacenamiento estático o capilar, es decir, el agua que se almacena en la capa superior del suelo por capacidad de campo y la que se almacena en la cobertura vegetal por efecto de interceptación, tiene influencia hasta la zona de raíces. De este elemento sólo es posible la salida del agua mediante la evapotranspiración.

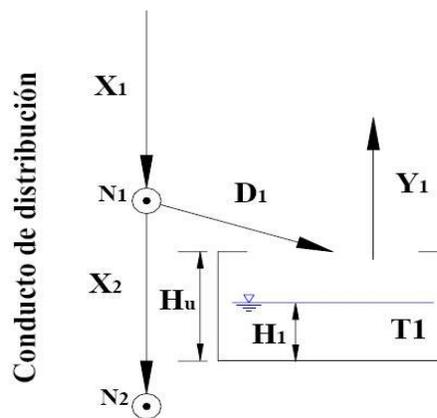


Figura2. Esquema del almacenamiento estático TETIS [50]

**1.7.2. Segundo tanque (T2);** Representa el agua que luego de la lluvia no se infiltra y se aloja en la superficie mientras fluye sobre la ladera como escorrentía superficial a través de los surcos de la topografía de la zona hasta su ingreso a un cauce en la red de drenaje con el punto de control como destino final. De este elemento se deriva la componente de la escorrentía superficial directa sobre la ladera.

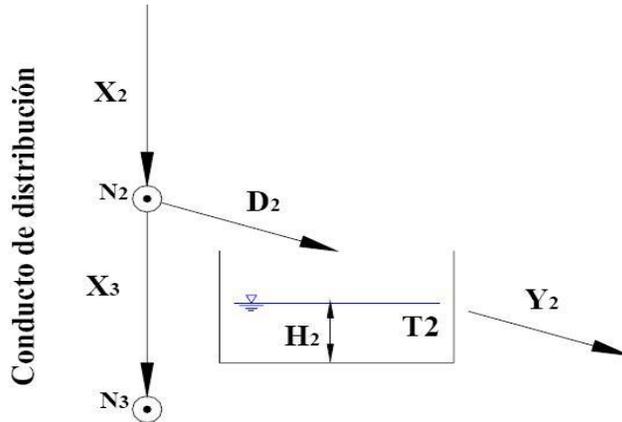


Figura3. Esquema del almacenamiento sobre la superficie de la ladera cuando se presenta escorrentía superficial TETIS [50]

**1.7.3. Tercer tanque (T3);** Representa el agua gravitacional infiltrada que se almacena en la zona saturada de la capa superior del suelo mientras fluye como flujo subsuperficial.

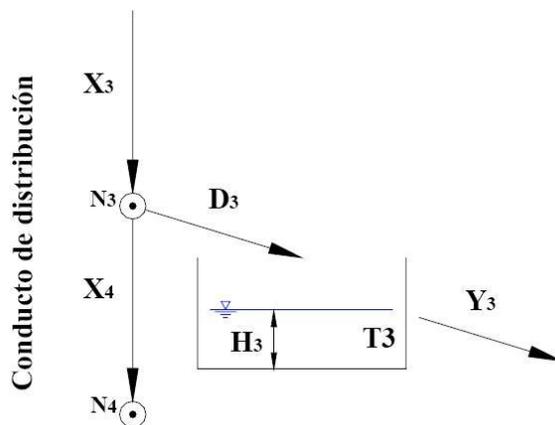


Figura4. Esquema del almacenamiento gravitacional en la capa superior del suelo donde se tiene flujo subsuperficial TETIS [50]

**1.7.4. Cuarto tanque (T4):** Representa el agua gravitacional almacenada en la parte inferior del suelo que produce el flujo base.

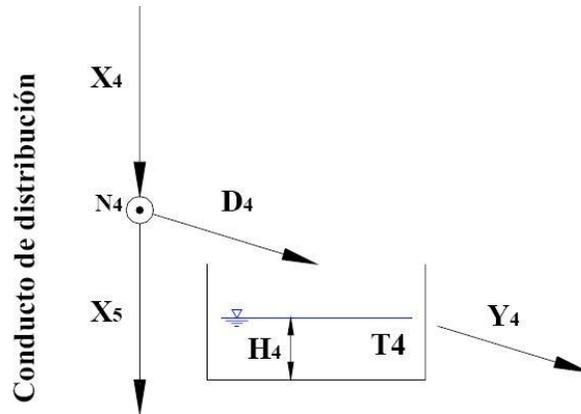


Figura5. Esquema del almacenamiento de agua gravitacional en la parte inferior del suelo TETIS [50]

**1.7.5. Tanque de almacenamiento de nieve (T0);** Representa el almacenamiento de nieve y determina la cantidad de agua líquida producida por el derretimiento de nieve que esta acumulada en la superficie.

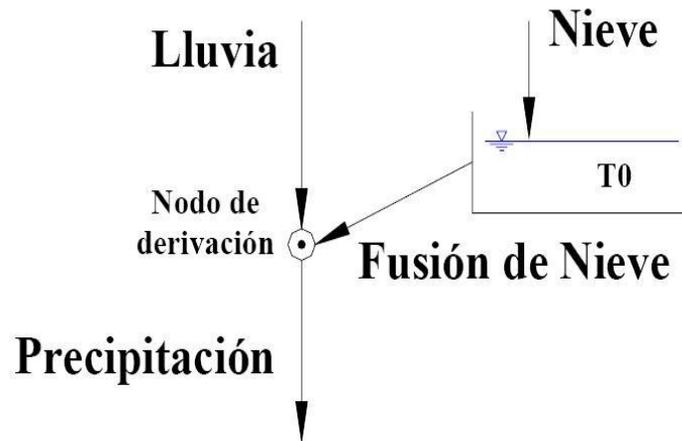


Figura6. Esquema del almacenamiento de nieve TETIS [50]

Teniendo en cuenta el tipo de cobertura y las condiciones iniciales de humedad del suelo, el agua de precipitación puede pasar a incrementar la humedad del suelo o puede ser excedente para hacer parte de la escorrentía directa, fluir a

través del suelo en forma de flujo subsuperficial o percolar a los almacenamientos subterráneos de donde una fracción de ella puede hacer parte del flujo base.

Para interconectar los diferentes tanques, el modelo utiliza un conducto distribuidor al cual entra el agua de precipitación y es conducida por el conducto distribuidor que va saliendo hacia los tanques a través de los nodos de derivación. El primero es el encargado de representar las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad, permeabilidad), regulando el flujo entre los tanques. Por su parte los nodos de derivación se ubican en la entrada de cada tanque y es allí donde se realiza el balance de agua, una parte de esta continua por el conducto distribuidor y sigue descendiendo, la otra ingresa al tanque y quedará allí almacenada [28].

El desarrollo del modelo TETIS forma parte de los productos obtenidos por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (G.I.M.H.A.) del Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (I.I.A.M.A.) de la Universidad Politécnica de Valencia, aportando al área de la investigación un gran número de implementaciones y desarrollos afines, aplicados en diferentes áreas académicas y profesionales, con un gran número de productos como artículos en revistas científicas, tesis doctorales y trabajos de investigación de Maestría y pregrado [46], [49], [50], [51], [53], [54], [55].

Dentro de los primeros desarrollos realizados a partir del el modelo SHIA, se encuentra el mejoramiento del modelo con la calibración automática que incorpora al modelo una metodología basado en el algoritmo de evolución y barajado de complejos, desarrollado por la Universidad de Arizona “Shuffled Complex Evolution – University of Arizona”, (SCE-UA) y que permite mejorar la precisión de los eventos de crecidas en tiempo real [50], [52]. El modelo ha sido probado satisfactoriamente en diversos climas con una amplia gama de áreas en cuencas de España, Italia, Francia y Colombia. [21], [22], [45], [46], [49], [50], [51], [53], [54], [55].

También se han desarrollado aplicaciones e implementaciones del modelo en el campo geomorfológico que han permitido por una parte establecer unos parámetros de referencia para el suelo y la implementación en el modelo de un

módulo de erosión que amplía las posibilidades de uso del modelo TETIS. [35], [38].

En Colombia gracias a la labor investigativa que desarrollan desde cada uno de sus grupos [47] , [50] han creado un grupo de trabajo y desarrollo que implementa y aplica las bondades del modelo TETIS al entorno de nuestra topografía y nuestra región, desarrollando aplicaciones en la geografía Antioqueña, Cordobesa y otras. [4], [17], [48].

En la UIS desde la creación del grupo GPH el modelamiento ha sido una de sus principales temas de estudio, desarrollando diferentes proyectos de investigación que le permitido innovar en este campo. Los modelos SHIA [47] y NAM (1999) [27] despiertan el interés por su implementación por parte de algunos expertos [28], con el desarrollo de diferentes proyectos investigación y particularmente con el desarrollo de la CERS (Cuenca Experimental del Río Sucio) [15], [28], [29].

## 2. ZONA DE ESTUDIO

En esta sección se hará una descripción general de la zona estudiada, con las principales características relacionadas con la ubicación, relieve, clima, vegetación, hidrografía, geología y principales fallas presentes en la cuenca.

### 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

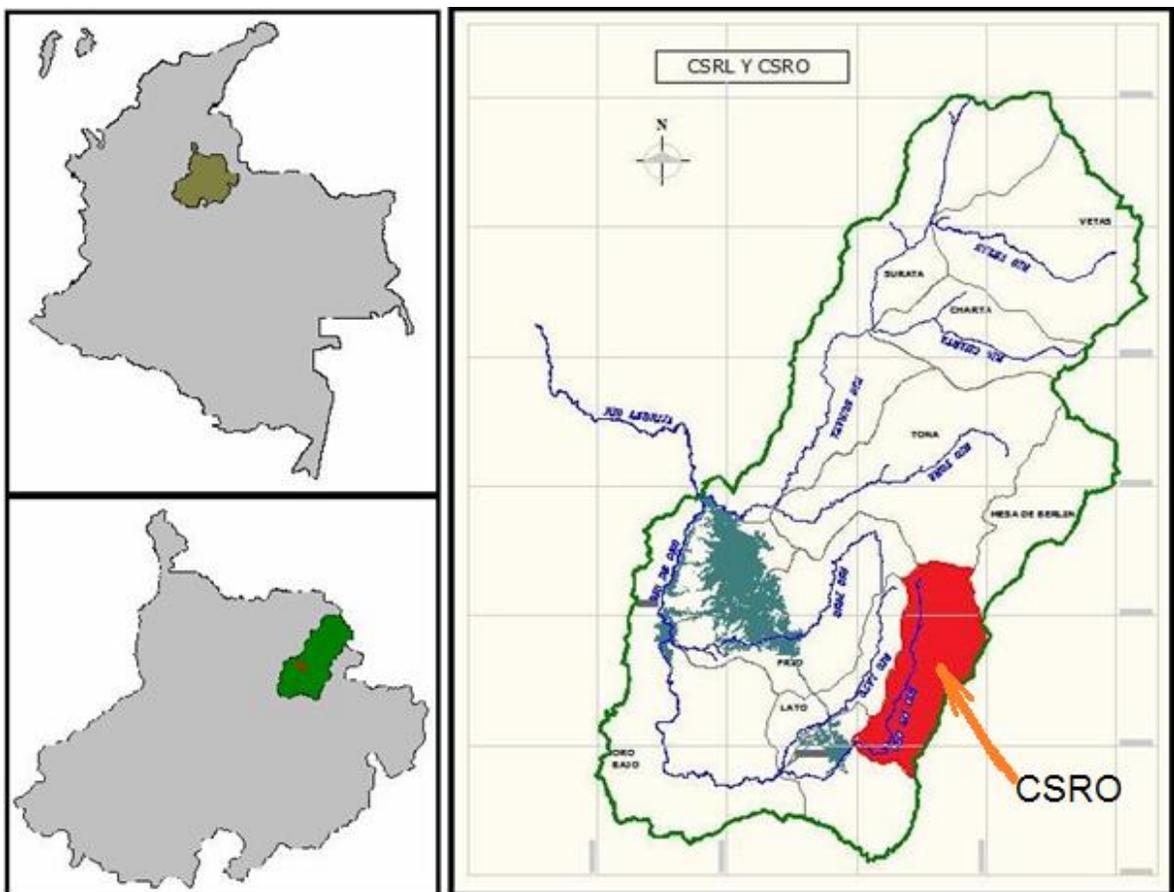


Figura7. Localización general de la Cuenca Superior del Río de Oro. (CSRO)

La Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) forma parte de la Cuenca del Río de Oro y se encuentra enmarcada hidrológicamente por la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), esta se encuentra localizada sobre el Macizo de Santander,

conformado por rocas ígneas metamórficas, preferencialmente por el Neis de Bucaramanga, el cual se encuentra altamente meteorizado por los efectos del sistema de la Falla de Bucaramanga - Santa Marta. [11], [25], [40].

Una de las principales corrientes es el Río de Oro, que corre inicialmente al sur por la CSRO, gira en forma de u, cambiando su dirección al norte aguas abajo del área urbana del municipio de Piedecuesta, el río recibe a la quebrada Grande, Sorata y el río Lato. En la zona del municipio de Girón recibe las aguas del río Frio, quebrada la Iglesia, Chimita y las corrientes de la escarpa de la meseta de Bucaramanga; para luego unirse con el Río Suratá para formar el Río Lebrija. [28], [34].

El relieve de la CSRL presenta un sector nororiental montañoso con paisaje de cordillera y fuerte pendiente, separado por la falla de Bucaramanga, de una zona suroccidental conformada por plataformas con topografía suave y ondulada en estado avanzado de erosión. Este relieve montañoso y variado crea una gran cantidad de microclimas, siendo la altura promedio 1735 m.s.n.m., la temperatura media es de 18°C, y la precipitación media multianual; de acuerdo a la distribución de isoyetas de 1475 mm. Se presentan dos unidades climáticas dentro de la cuenca: Selva nublada, que corresponde a un bosque muy húmedo montano alto, entre los 1500 y 3400 metros, con temperatura relativamente fría y con alta pluviosidad, se caracteriza por tener una vegetación muy densa con tapiz de musgo y algas que disminuye considerablemente la acción de la escorrentía. Bosque premontano, corresponde a la zona baja que son más secas, con menor presencia de vegetación y mayor pendiente dando lugar a efectos de erosión por efectos de la escorrentía superficial. [34]

En la zona se presenta un sistema bimodal de lluvia con dos periodos secos y dos periodos húmedos, intercalados durante el año, fuertemente influenciado por el movimiento de la zona de convergencia intertropical. El periodo seco inicia a finales de Diciembre y termina a finales de Marzo, mientras el segundo inicia a finales de Junio y finaliza a mediados de Septiembre. La precipitación es de tipo orográfica y convectivo. Las masas de nubes viajan desde el valle del Magdalena

Medio hacia el oriente donde la mesa de Lebrija (1100 m.s.n.m) actúa a manera de cortina ocasionando que únicamente las masas altas de nubes saturadas logren superarlo. Estas masas de nubes al encontrarse con la cordillera oriental, producen mayor pluviosidad, mientras que la zona inferior del Río de Oro permanece seca. [2], [26], [40]

**2.1.1. Localización de la CSRO;** La CSRO se localiza en el extremo norte del departamento de Santander, sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental, al sur del Área Metropolitana de Bucaramanga y al oriente del municipio de Piedecuesta, entre las coordenadas Gaussianas 1'115.000 a 1'125.281 Este y 1'262.761 a 1'278.305 Norte con origen en Bogotá , (Figura 7). Posee alturas sobre el nivel del mar que van desde los 3500 m.s.n.m. en el alto el Picacho hasta los 1100 m.s.n.m en la estación Conquistador sobre el Río de Oro. Limita al norte con la micro cuenca del Río Tona, al nororiente con la mesa de Berlín y el Río Manco, al sur occidente con la subcuenca del Río Oro Medio y al occidente con las micro cuencas de Río Frio y Lato. La micro cuenca tiene un área aproximada de 74 km<sup>2</sup> y constituye la base principal de suministro de agua para el municipio de Piedecuesta. [34], [40]

**2.1.2. Vías de acceso;** La zona cuenta con algunas vías de acceso que recorren la cuenca desde la parte alta a la parte baja con algunas variantes que comunican los diferentes sectores de zona; todas estas vías se encuentran en afirmado y con bajo nivel de servicio, por donde transitan generalmente vehículos de doble tracción y camiones que transportan los productos de la región.

Una de sus principales vías recorre la cuenca de manera longitudinal desde la parte baja sobre la autopista de Piedecuesta, pasando por el corregimiento de Sevilla y terminando sobre la vía a Cúcuta en el kilómetro 40; otras vías alternas comunican los sectores de Planadas y Cubin.

**2.1.3. Hidrografía de la CSRO;** El Río de Oro nace a una altura de 3500 m.s.n.m y recorre la cuenca en una longitud aproximada de 22.5 km, con aportes de las micro cuencas de la Quebrada Santa Rita, Colepato, Rasgón y Sevilla. Sobresale como punto de referencia (divisoria de aguas) el sitio conocido como El Picacho, localizado en el km. 50 de la vía Bucaramanga – Pamplona. [26], [40], [2].

**2.1.4. Geología;** Para el modelo hidrogeológico en la CSRO, se requiere identificar todos los aspectos geológicos, estructurales y morfológicos que actúan en la región y que son indispensables para la identificación y ubicación de acuíferos y zonas de recarga que condicionan el modelo hidrológico.

**2.1.4.1 Geomorfología;** La geomorfología representa las características más generales del área estudiada y su análisis puede revelar rasgos sobre el patrón de escorrentía, los ámbitos morfológicos relacionados con áreas dispuestas para la recarga, tránsito y descarga del agua subterránea.

Dentro de nuestra zona de estudio encontramos en la zona de El Picacho la depresión sinclinal de El Picacho, que es un pliegue muy amplio cuyo eje tiene una dirección NW-SE y el núcleo lo constituye areniscas cuarzosas de la formación Los Santos. De igual forma se puede observar una cima anticlinal donde se evidencia un pliegue constituido por las areniscas compactadas de la misma formación. [7], [11], [16], [37], [44].

En la zona de El Picacho se exhiben escarpes con pendientes abruptas, casi verticales, relacionados con fallamientos muy activos regionalmente.

Se identifican facetas de falla que muestran la presencia de fallas como son la Falla Sevilla y la Falla Río de Oro. La presencia de la silla de falla sobre la vereda Granadillo, identifica el trazo de la falla Mensulí.

En el sector del Peaje del Picacho (Kilometro 48 sobre la vía Bucaramanga Berlín – Cúcuta) se identifican zonas de depresiones cársticas sobre la formación Rosablanca. Sobre la misma zona se pueden encontrar pendientes denudacionales, con un alto grado de disolución de la formación Rosablanca. [44], [34], [25], [11], [16].

**2.1.4.2 Litoestratigrafía;** Sobre la zona de la CSRO se encuentran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades que se han reportado desde el Precámbrico hasta el Cretácico inferior, este conjunto se encuentra cubierto parcial y discontinuamente por depósitos sedimentarios de edad reciente y origen diverso. Las rocas metamórficas comprenden el Neis de Bucaramanga considerado de edad proterozoico y la Formación Silgara de edad paleozoica; las rocas intrusivas son preferiblemente cuarzomonzonitas (La Corcova y Santa Bárbara) del jurásico y cortan la secuencia metamórfica. El conjunto de rocas sedimentarias comprende la formación Girón del Jurásico Tardío y las formaciones cretácicas: Los Santos y Rosablanca. [44], [56].

**2.1.4.2.1 Neis de Bucaramanga (pEb);** Constituye la parte basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y origen sedimentario, consiste en rocas de alto grado de metamorfismo que abarcan fundamentalmente tres tipos composicionales: Neis biotítico, Neis anfibólico, en menor grado Neis cuarzofeldespatico y migmatitas. En nuestra cuenca podemos encontrar Neis cuarzofeldespático, hacia el sector SW a la altura de la vía Piedecuesta – Sevilla. En el Neis de Bucaramanga sobresalen sus pendientes abruptas y un patrón de drenaje subdendritico a subparalelo. El grado de meteorización de estas rocas es variable pero las de tipo cuarzofeldespatico muestran un grado medio de meteorización, este tipo de roca produce niveles meteorizados de tipo arenoso. [37]

**2.1.4.2.2 Formación Silgará (pDs);** Corresponde a una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada. La formación Silgará se presenta en la zona norte de nuestra cuenca limitada por las fallas Río de Oro y Sevilla como fajas discontinuas con orientación NS y se distinguen por presentar una estructura esquistosa bien definida y muy fina. En el sector de la quebrada el Rasgón se encuentra altamente meteorizada, presentando perfiles de suelo, con colores que varían de rojo a naranja; este proceso de meteorización produce perfiles de suelo con una textura fina y estructura esquistosa. A partir de esta formación se desarrolla un tipo de suelo arenoso arcilloso de color amarillo a naranja y el espesor de suelo puede alcanzar hasta 20 cm. [16]

**2.1.4.2.3 Cuarzomonzonita de la Corcova (JTRcg);** Aflora en la vereda de Granadillo del municipio de Piedecuesta en dirección NS, donde presenta una topografía de pendiente moderada en esta zona se observan afloramientos de roca cuarzofeldespática de color claro, con un grado alto de meteorización, producto de meteorización mecánica y química, lo que origina la formación de minerales de arcilla, los perfiles de suelo originados por la meteorización, presentan una textura de tipo arenosa. [44]

**2.1.4.2.4 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs);** Es de color rosado, rosado naranja a gris violáceo, equigranular. Se presenta hacia la parte alta de la cuenca del Río de Oro, sobre la zona límite con el Páramo de Berlín, esta unidad de roca está afectada por meteorización esferoidal y desarrolla suelos residuales arenosos espesos muy susceptibles a la erosión hídrica. [44]

**2.1.4.2.5 Formación Girón (Jg);** Se localiza hacia la parte alta de la cuenca del Río de Oro, en el Picacho sobre la vía a Bucaramanga. Esta formación se describe y define por rasgos geomorfológicos y estratigráficos, debido a que en la zona no se presentan afloramientos que permitan definir mejor su unidad. La formación Girón se encuentra constituida por areniscas de grano medio

intercalado por limolitas violáceas. Texturalmente se distingue por ser una arenisca mal calibrada, de granos subangulares a redondeadas, muy compacta y con baja porosidad. La formación Girón reposa discordante sobre la formación Silgará y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. [44]

**2.1.4.2.6 Formación los Santos (Kils);** Se encuentra en el alto el Picacho, compuesto principalmente por cuarzoareniscas blancas, ligeramente gravosa y conglomeráticas de grano muy grueso a fino, muy compactas con superficies de oxidación en la zona intermedia. También aflora hacia el sector de Llano Adentro, presentándose en contacto fallado por la formación Rosablanca y Silgara, y discordante con la cuarzomonzonita de Santa Bárbara. [16]

**2.1.4.2.7 Formación Rosablanca (Kir);** Se presenta en el sector del Alto del Picacho y Llano Adentro. Las calizas de la Formación Rosablanca presentan niveles fosilíferos, con conchas fragmentadas distribuidas aleatoriamente, estratificación plano paralela y venas de calcita, intercalados con shales negros carbonosos hacia el tope. Debido a la composición química, tanto de la roca como del agua se observan zonas de alta disolución en las pendientes estructurales ubicada en el sector del Peaje. Igualmente se ubica, en los alrededores del sector del picacho sobre una topografía de considerable altura formando escarpes en algunas zonas y paisajes cársticos en otras. La meteorización es de grado medio – alto, dando como resultado suelos residuales con espesores de materia orgánica de hasta 40 cm. [44]

**2.1.4.2.8 Depósitos Coluviales o de ladera (Qd);** Son depósitos acumulados, por lo general en la base de escarpes, provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes debido a la acción de la fuerza de gravedad. En el sector del Picacho (Kilometro 48 de la vía Bucaramanga – Berlín – Cúcuta) se origina un depósito coluvial localizado hacia la parte baja de las pendientes estructurales, que forman la formación los Santos. En este sector los bloques son

angulares, con un diámetro de hasta 2 m, sostenidos por una matriz de tamaño de grano, arena gruesa a grava, con espesor aproximado de 15 m. [44]

**2.1.4.3 Sistema de fallas;** La falla de Bucaramanga es el rasgo más evidente debido a que separa geomorfológicamente, las provincias geológicas del Valle Medio del Magdalena y el Macizo de Santander.

Dentro de la CSRO podemos encontrar algunas fallas identificadas:

**2.1.4.3.1 Falla Río de Oro;** Es una falla de tipo inverso con el bloque E levantado, poniendo en contacto rocas metamórficas de edad Paleozoicas de la formación Silgará con rocas ígneas Jurásicas de la Cuarzomonzonita de la Córcova. El lineamiento de esta falla es paralelo al trazo de la falla Río Frio y sigue el curso del Río de Oro, con una longitud aproximada de 21 km. Desde la falla de Bucaramanga hasta chocar con la falla la Cocalina.

**2.1.4.3.2 Falla Sevilla;** Esta estructura tiene una longitud aproximada de 20 km, y una dirección N20°E. Se desprende de la falla de Bucaramanga, entre los Curos y Piedecuesta y sigue el curso de la quebrada Sevilla. En la zona del Picacho corta la formación Rosablanca. En el sector de la quebrada Colepato define el contacto entre la formación Silgara y la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, comportándose como una falla verticalizada. En los alrededores de el corregimiento de Sevilla la falla define el contacto entre el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova, como una falla inversa con el bloque E levantado.

**2.1.4.3.3 Falla Mensulí;** Esta falla es precedente al sistema de fallas inversa de Bucaramanga y Río Frio ya que es cortada y desplazada por esta última. Se comporta como una falla vertical pero corta a las rocas del Neis de Bucaramanga y las pone en contacto con las rocas ígneas de la Cuarzomonzonita de la Corcova. La meteorización relacionada con los factores ambientales y el tiempo, disgrega y descompone los minerales de que conforman la roca dando origen a mantos de alteración muy variados, condicionando la abundancia de arcillas que influyen directamente sobre la permeabilidad de los niveles superficiales. El fracturamiento, está relacionado con la presencia de diaclasas, fallas o diques que pueden permitir la circulación del agua a través de ella. En nuestra cuenca estos dos aspectos representan una gran importancia para definir la dinámica presente y condicionan la permanencia, transporte y salida del agua.

### **3. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA MODELACIÓN EN TETIS**

La aplicación del modelo hidrológico TETIS, requiere de una serie de elementos, que representan de forma aproximada, todas las componentes que participan en la fase terrestre del ciclo hidrológico.

Para la aplicación del modelo sobre la CSRO, se requiere de la recolección y procesamiento de los parámetros geomorfológicos, hidrológicos y de composición de la cuenca, que participan en la fase terrestre del ciclo hidrológico. Es así como en esta sección, se describirán y relacionaran todos los elementos utilizados para la adquisición de la información, los pasos y procesos exigidos y las características finales que se deben dar para ser aplicados en el modelo.

Los temas relacionados con la información requerida, corresponden a las características morfológicas de la cuenca, en cuanto a los detalles relacionados con el modelo digital de elevación (MDE), pendiente del terreno, dirección del flujo, líneas de corriente; por otra parte, también se requiere de la información hidrológica y de caudal que influye en la cuenca y por último la composición y caracterización del terreno donde se involucran los aspectos de vegetación, uso del suelo, geología y estado de fracturación y meteorización.

#### **3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN**

Un modelo digital de elevación es una estructura discreta de datos que representa la distribución espacial de una variable, que puede ser cualquier variable que pueda representarse espacialmente, cuando la variable hace referencia a la elevación de la superficie del terreno el modelo digital de elevación se puede llamar modelo digital del terreno.

La finalidad del modelo digital de elevación es modelar una variable distribuida y continua en el espacio mediante un arreglo de valores discretos que permitan el tratamiento numérico de los datos a través de algoritmos matemáticos y represente adecuadamente la superficie del terreno.

**3.1.1. Creación del modelo digital de elevación.** La generación del modelo digital de elevación se desarrolla a través de una serie de pasos que permitirán que el modelo final se ajuste de manera adecuada a la realidad del terreno, de lo contrario se podrán presentar algunos errores que perjudican la calidad final del modelo. Los pasos a seguir son:

- Recopilación de datos.
- Selección del tipo de estructura del modelo.
- Selección del tipo de interpolación.
- Validación del modelo.

#### **3.1.1.1 Recopilación de datos;**

Para el desarrollo del modelo digital de elevación de la CSRO se utilizó información indirecta basada en las planchas cartográficas del IGAC a escala 1:25000 (figura 8) que fue digitalizada y forma parte de la información suministrada por el GPH, la cuadrícula que lo conforma son: 109-IV-C, 109-IV-D, 111-III-C, 120-II-A,B,C,D, 121-I.A,C, 120-IV-A,B y 121-III-A.

Para el uso de esta cartografía es necesario un proceso de depuración de la información, mediante la eliminación de toda información diferente a las curvas de nivel, como texto, bloques, líneas de coordenadas, vías, zonas de urbanismo etc. Finalmente el archivo depurado solo contendrá las polilíneas correspondientes a las curvas de nivel, localizadas sobre su correspondiente cota de elevación.

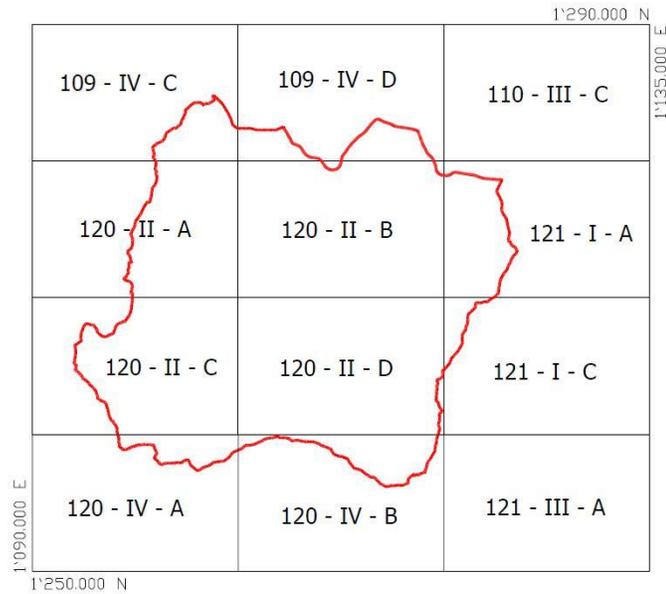


Figura8. Esquema de las diferentes planchas que conforman la cartografía existente del IGAC. a escala 1:25000 para la zona de proyecto.

Este archivo es procesado en AutoCAD y posteriormente exportado en formato básico de AutoCAD.DXF; para disminuir el tamaño de la información suministrada se redujo la ventana de información a las coordenadas: Este mínima = 1111000, máxima = 1135000, Norte mínima = 1261000, máxima = 1288000.

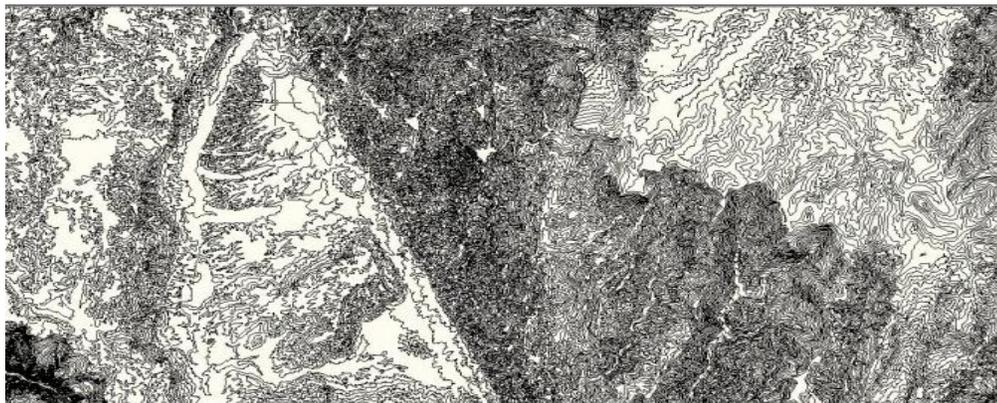


Figura9. Cartografía digitalizada a escala 1:25000 del IGAC, con las curvas de nivel cada 50 metros de altura, sobre la ventana de estudio.

**3.1.1.2 Selección del tipo de estructura del modelo;** La estructura como se procesa la información del modelo digital de elevación puede expresarse de dos formas: vectorial y ráster.

Para la definición de la estructura del modelo aplicado en este proyecto, el requerimiento del modelo digital de elevación es de tipo ráster, por las características propias de la implementación del programa TETIS; teniendo en cuenta que la cartografía digital está en formato vectorial se requiere de la transformación a ráster, mediante la aplicación de programas de transformación y algoritmos matemáticos apropiado.

La resolución espacial del MDE será definido mediante la valoración de la estructura de las curvas de nivel, ya que se tiene que tener en cuenta que para tener una resolución optima, es necesario tener un equilibrio al momento de aumentar o disminuir el pixel, para que la morfología del terreno no tenga cambios considerables. Uno de los primeros aspectos a contemplar es el tamaño de la celda, cuando se trabaja con curvas de nivel como base para la elaboración de un MDE, se debe tener en cuenta que el tamaño del pixel no debe exceder de la separación que existe entre las curvas de nivel, para nuestro caso esta separación es de 50 metros, esto con el fin de evitar la pérdida de información altimétrica en las zonas donde las curvas son demasiado cercanas. Teniendo en cuenta estos aspectos se manejó un tamaño de 30 X 30 metros, que corresponde al tamaño dado en la resolución de la señal de satélite tipo Landsat ETM+, que será utilizado para la generación de los mapas de cobertura vegetal y de suelo del presente estudio y además que para la escala dada en la cartografía es el tamaño mínimo recomendado cuando se tienen diferencias de curvas de nivel de 50 metros.

**3.1.1.3 Selección del tipo de interpolación;** Para la generación del modelo en formato ráster se utilizaran como herramientas de procesamiento

los programas: Surfer 8 de uso comercial distribuido por la compañía Golden Software, Inc. y Spell de uso académico desarrollado por el GPH.

A partir del archivo cartográfico ya depurado y en formato DXF, se procede a convertir la información correspondiente a cada uno de los puntos de la cartografía en un formato de texto, que identifique cada uno de los puntos de las poligonales o líneas existente, “según sea el caso”, con coordenadas X,Y,Z. Esta transformación se realiza con el uso del programa Spell. El resultado de este proceso es compatible para ser abierto y trabajado en el programa Surfer 8.

A través del programa Surfer se procede a generar el modelo digital de elevación, definiendo en el programa las coordenadas límites del modelo y el tamaño de la celda, las cuales determinan la configuración del modelo y tendrá que ser coincidente con los otros mapas que se desarrollaran posteriormente para la aplicación del modelo TETIS. En este punto del programa Surfer se selecciona el tipo de interpolación que se desee efectuar; para este estudio se generaron los diferentes MDE con los diferentes métodos de interpolación disponibles en el programa.

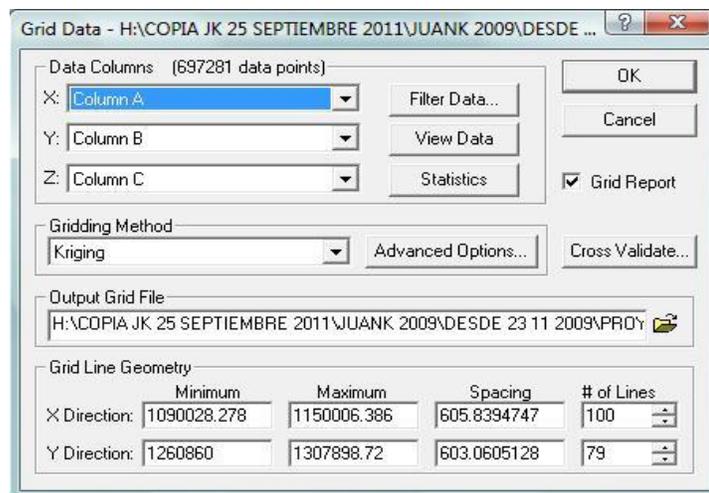


Figura10. Ejemplo de ventana para la generación del MDE mediante el programa Surfer 8.

Para el MDE de la CSRO se utilizaron los métodos de interpolación de: inverso de la distancia, kriging, local polinomial, triángulos con interpolación lineal, vecino más cercano y vecino natural, para de estos definir cuál es el más adecuado según como se encuentre la información de entrada para el modelo.

**3.1.1.4 Validación del MDE;** Para el caso de la cartografía utilizada se utilizaron los diferentes métodos de interpolación disponibles en el programa Surfer, pero de estos, no todos permiten desarrollar un modelo apropiado.

Con los modelos desarrollados se debe seleccionar aquel que proporcione un acercamiento mejor a la superficie real del terreno, por lo tanto se debe evaluar o comparar los datos correspondientes a cada modelo con el correspondiente valor real que tiene el terreno en la correspondiente coordenada.

Una de las formas para comparar o validar la calidad del MDE es la utilización de puntos de referencia con coordenadas y cotas conocidas y confiables, que presenten una baja diferencia con el valor interpolado para la celda común.

En la elaboración del MDE se utilizaron varios métodos de interpolación, de los cuales se debe optar por uno de ellos para el modelamiento, siendo necesario evaluar la correlación de cada MDE. Una medida del error en la correlación sería el error medio (EM), que relaciona los puntos iniciales tomados como reales con los puntos interpolados. Sin embargo, como las desviaciones pueden ser aleatoriamente positivas o negativas se anularían, por lo tanto el EM no es una medida válida de la calidad del MDE.

Lo más habitual es utilizar el error medio cuadrático, EMC, ya que tiene en cuenta todas las desviaciones como una sumatoria de valores del mismo signo, se calcula de la siguiente forma:

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \delta_{Z_i}^2}$$

Formula del error medio cuadrático

Al final el MDE que se elige para modelar es el de menor error medio cuadrático ya que ese es el que posee el mejor ajuste y representa mejor la topografía de la zona de estudio

A continuación se muestran los diferentes modelos interpolados y un cuadro resumen con los resultados del cálculo del error medio cuadrático.

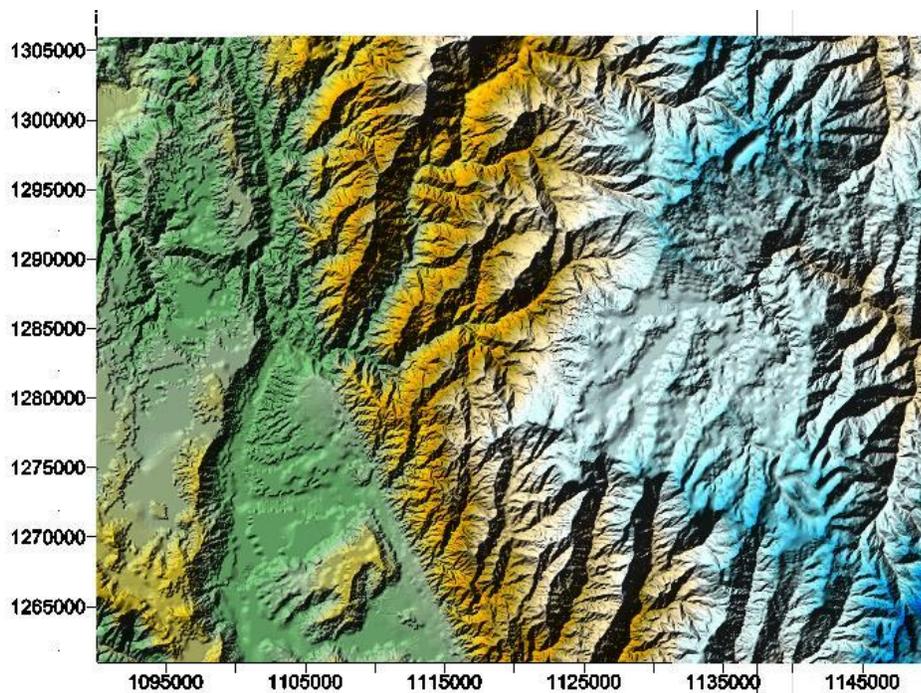


Figura11. MDE de la zona de influencia de la CSRL generado por el programa SURFER 8 con la aplicación del método de interpolación de Kriging.

Para cada modelo se determinó el error medio cuadrático teniendo como referencia los puntos generados por la cartografía, los cuales representan el valor más confiable de referencia sobre el terreno.

kriging			
Numero de datos	662817		
Sumatoria	6495281.89	EMC	<b>3.1304</b>
Mínimo	2.6522E-21		
Máximo	23054.8304		
Median	1.6484086		
Desviación estándar	57.4949943		

Tabla 1 Parámetros calculados para determinar el mejor EMC. para el correspondiente método de Kriging.

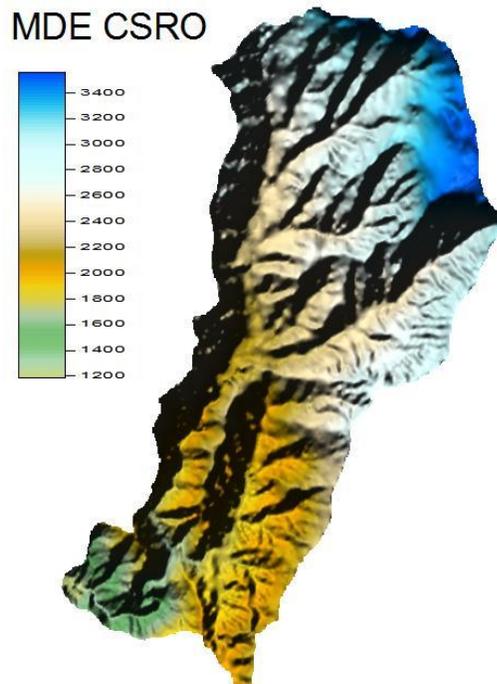


Figura12. Divisoria de aguas de la CSRO dentro del MDE, generado por SURFER 8 que corresponde al área requerida para el modelo.

Dentro de los diferentes modelos desarrollados para el presente estudio se pudo encontrar el menor error en el generado por el método de interpolación de Kriging, el cual será tomado como MDE para el presente estudio.

Adicionalmente se ha aprovechado la aplicación que tiene el programa Surfer 8 para reducir el tamaño del archivo ráster, recortando la máscara generada por la línea que describe la cuenca de estudio como se puede observar en la figura 12

### **3.2. MAPA DE PENDIENTE, DIRECCIÓN DE FLUJO Y FLUJO ACUMULADO**

Los mapas de pendiente, dirección de flujo y flujo acumulado son generados a partir de herramientas como ArcMap u otro sistema similar, los cuales facilitan la generación y transformación de los parámetros, con la ayuda de algunos comandos especiales que nos permite transformar de diferentes formas, formatos y características cada uno de los elementos de la información requerida.

**3.2.1. Software ArcMap;** Es la herramienta de sistemas de información geográfica (SIG) más extendida en el mundo por sus avanzadas capacidades de visualización, exploración, consultas y análisis de información de datos geográficos, además de las numerosas herramientas de integración de datos desde todo tipo de fuentes y herramientas de edición. Igualmente, este software se considera de gran utilidad para estudiantes de diversas especializaciones y para profesionales que manejen información georeferenciada y que deban representar dentro de un entorno espacial georeferenciado la información propia de sus trabajos de investigación o consultoría.

En particular ArcMap permite realizar las siguientes funciones:

- Explorar y administrar la información geográfica en múltiples formatos.
- Visualizar y consultar la información geográfica y alfanumérica.
- Crea y maneja los metadatos de la información cartográfica.
- Crear el modelo de datos apropiado a las necesidades de cada usuario.
- Realizar todo tipo de edición gráfica y alfanumérica gracias a su potente y avanzado entorno de edición.
- Realizar tareas de análisis avanzado tanto de los datos geográficos como los alfanuméricos.
- Producir cartografía de muy alta calidad.
- Permitir una personalización rápida y sencilla del entorno de trabajo.
- Acceder a funciones de geoprocésamiento mediante distintos entornos
- Gestionar las propiedades de etiquetado de un mapa desde un entorno centralizado.

**3.2.2. Corrección de los Sumideros (Pits);** Uno de los pasos previos que se tiene que contemplar antes de generar estos mapas es el análisis de sumideros (Pits), ya que son uno de los problemas en la asignación de direcciones de flujo. Un sumidero consiste en una celda o grupo de celdas con una cota determinada en el MDE, que están rodeadas por celdas de cota mayor (Modelo D8). Es claro que en estos casos no se tiene ninguna dirección de pendiente hacia abajo en ninguna de las celdas y por lo tanto la asignación de una dirección de drenaje no puede hacerse directamente. Para la corrección de los sumideros encontrados en el MDE se empleó el software Spell Map y el ArcMap, en los cuales por medio del modelo D8, iguala en primera instancia la cota de la celda problema con la cota de la

celda de menor valor a su alrededor y adiciona una fracción de 1/10000 en las respectivas unidades de altura del MDE a la celda en cuestión, para así garantizar el drenaje.

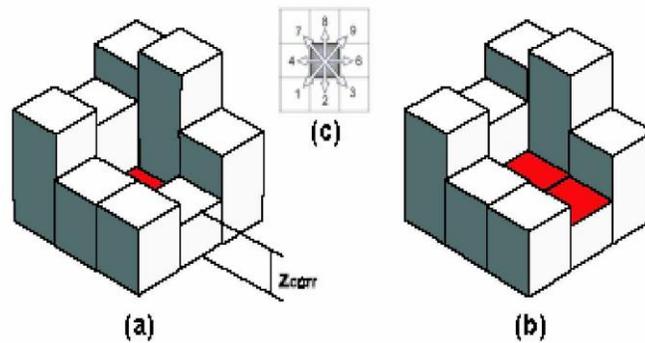


Figura13. (a) Esquema de sumidero. (b) Corrección de sumidero.  
(c) Esquema modelo D8.

Corregidos los sumideros en el MDE se generan los diferentes mapas de pendientes, dirección de flujo y flujo acumulado, por medio del programa ArcMap.

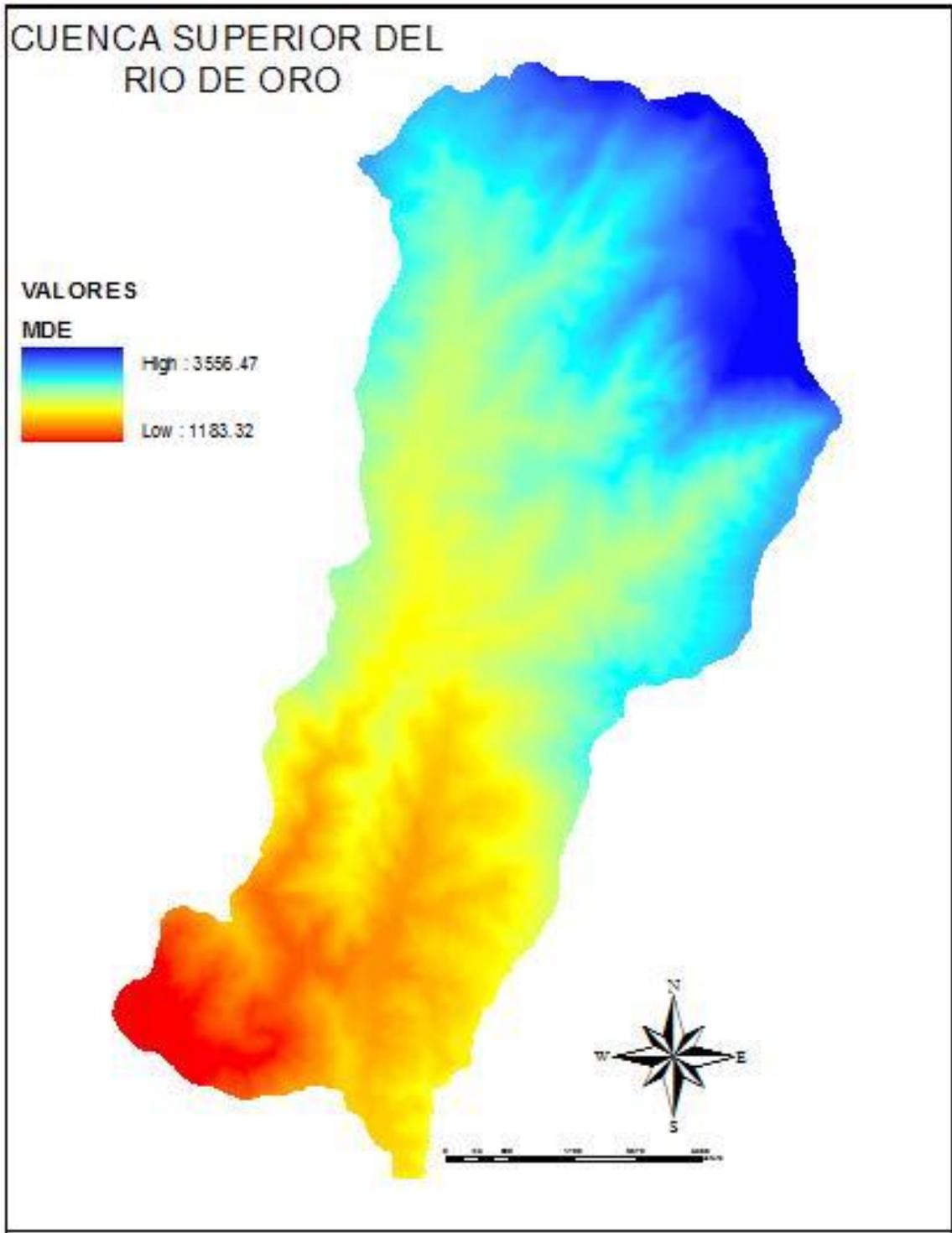


Figura14. Mapa del MDE sin sumideros generado por ArcMap (El Autor).

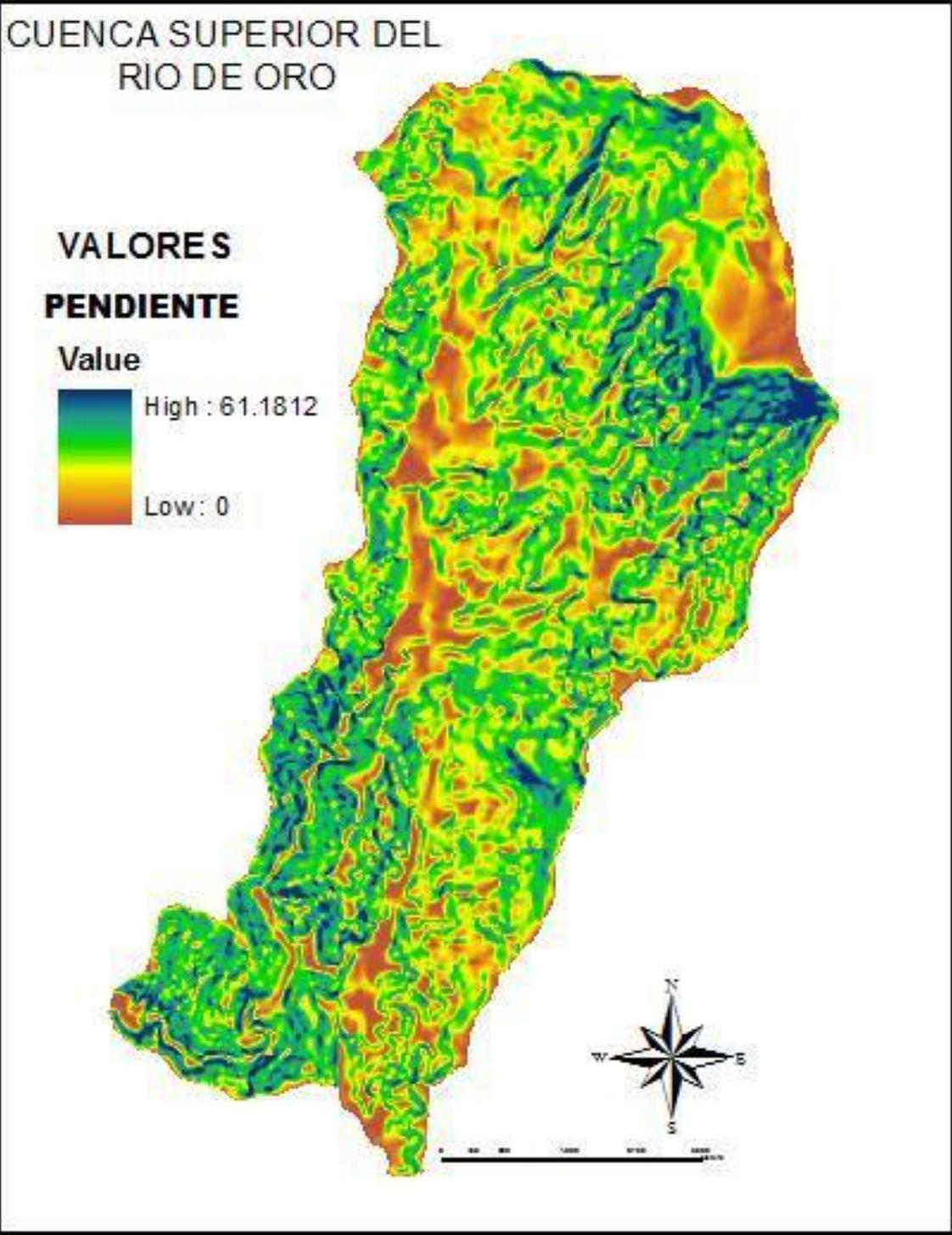


Figura15. Mapa de pendientes sobre la CSRO generado por ArcMAP (El Autor).

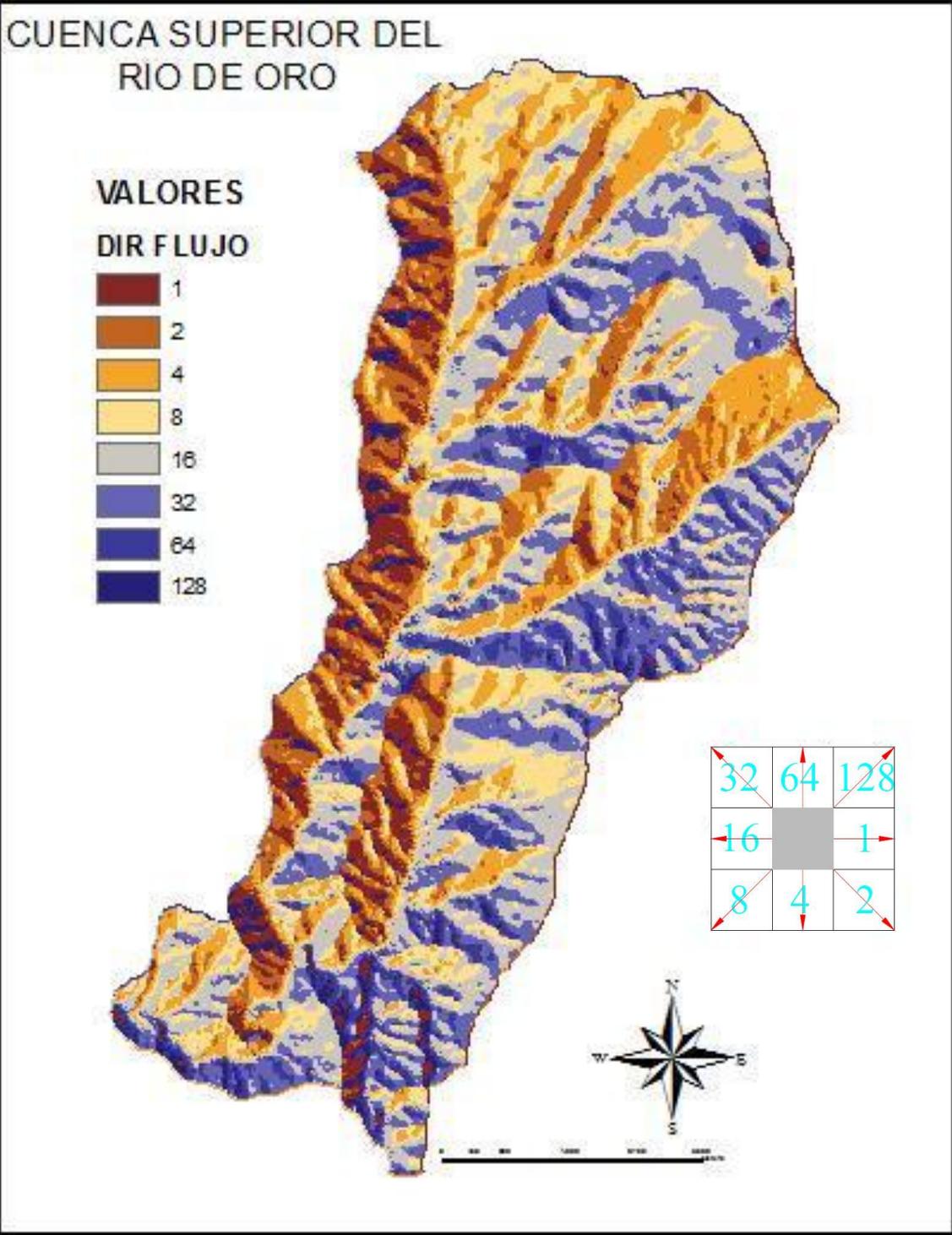


Figura16. Mapa de dirección de flujo sobre la CSRO, generados por ArcMap (El Autor).

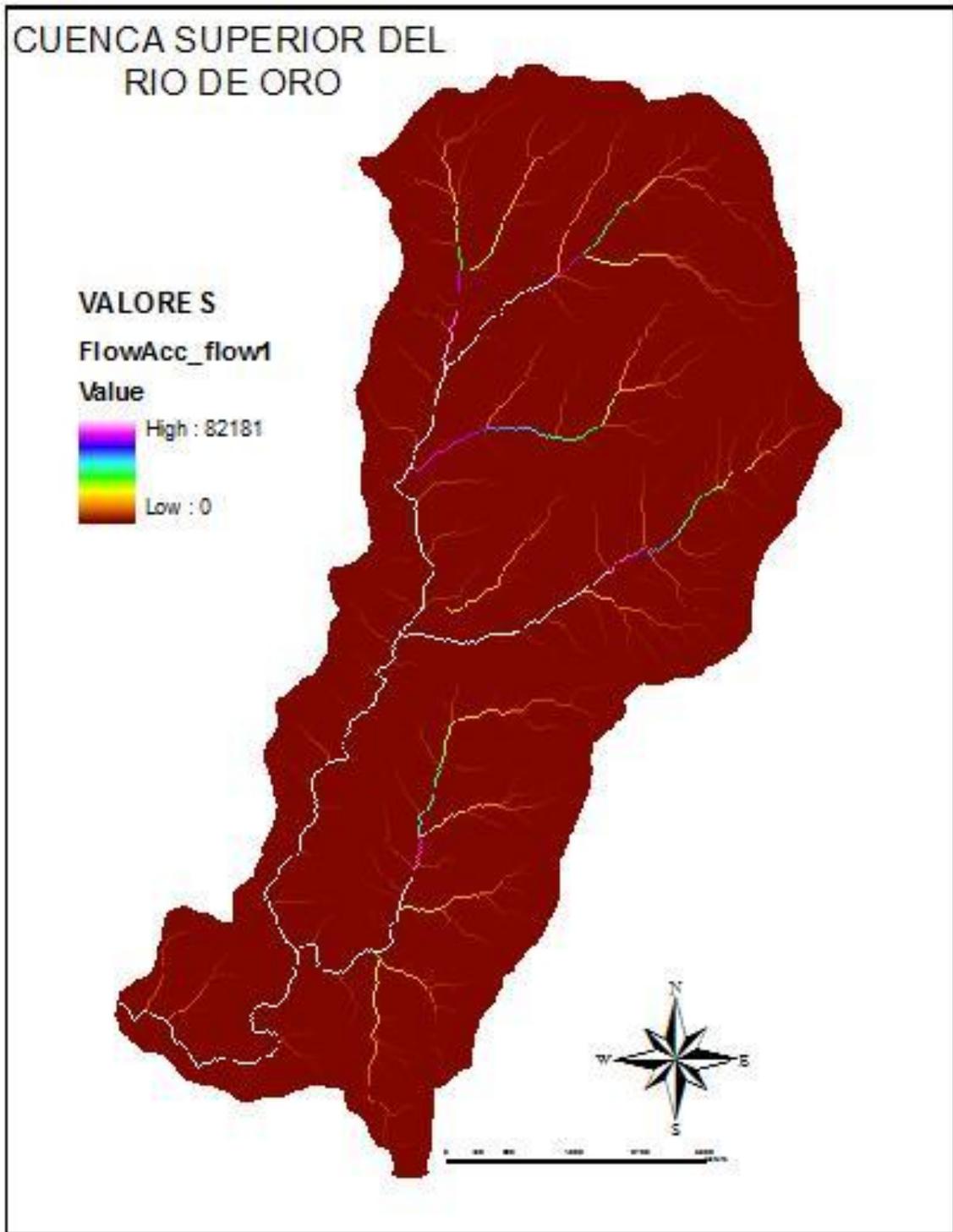


Figura17. Mapa de flujo acumulado y líneas de corriente sobre la CSRO, generados por ArcGis (El Autor).

Otros mapas generados adicionalmente corresponden a una clasificación de la pendiente y de la cota para diferenciar zonas de baja, media y alta pendiente ( $0 < \text{Baja} < 15$ ,  $15 < \text{Media} < 30$ ,  $30 < \text{Alta} < 62$ )

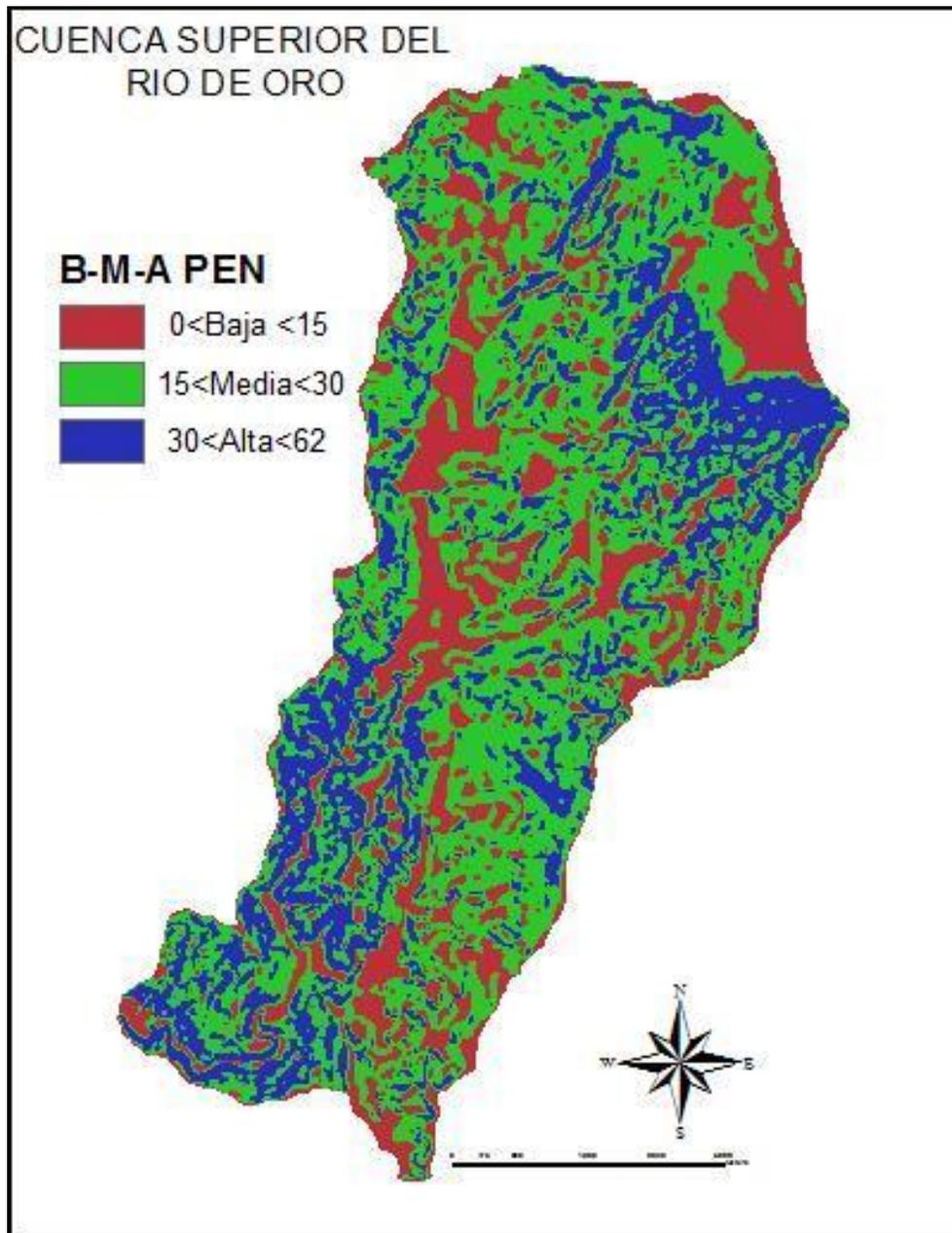


Figura18. Clasificación de pendiente baja, media y alta sobre la CSRO, generados por ArcMAP (El Autor).

Y diferencia altitudinal según zonas climáticas (880-1950 bosque premontano y seco, 1950-2720 bosque montano bajo, 2720-3650 bosque montañoso).

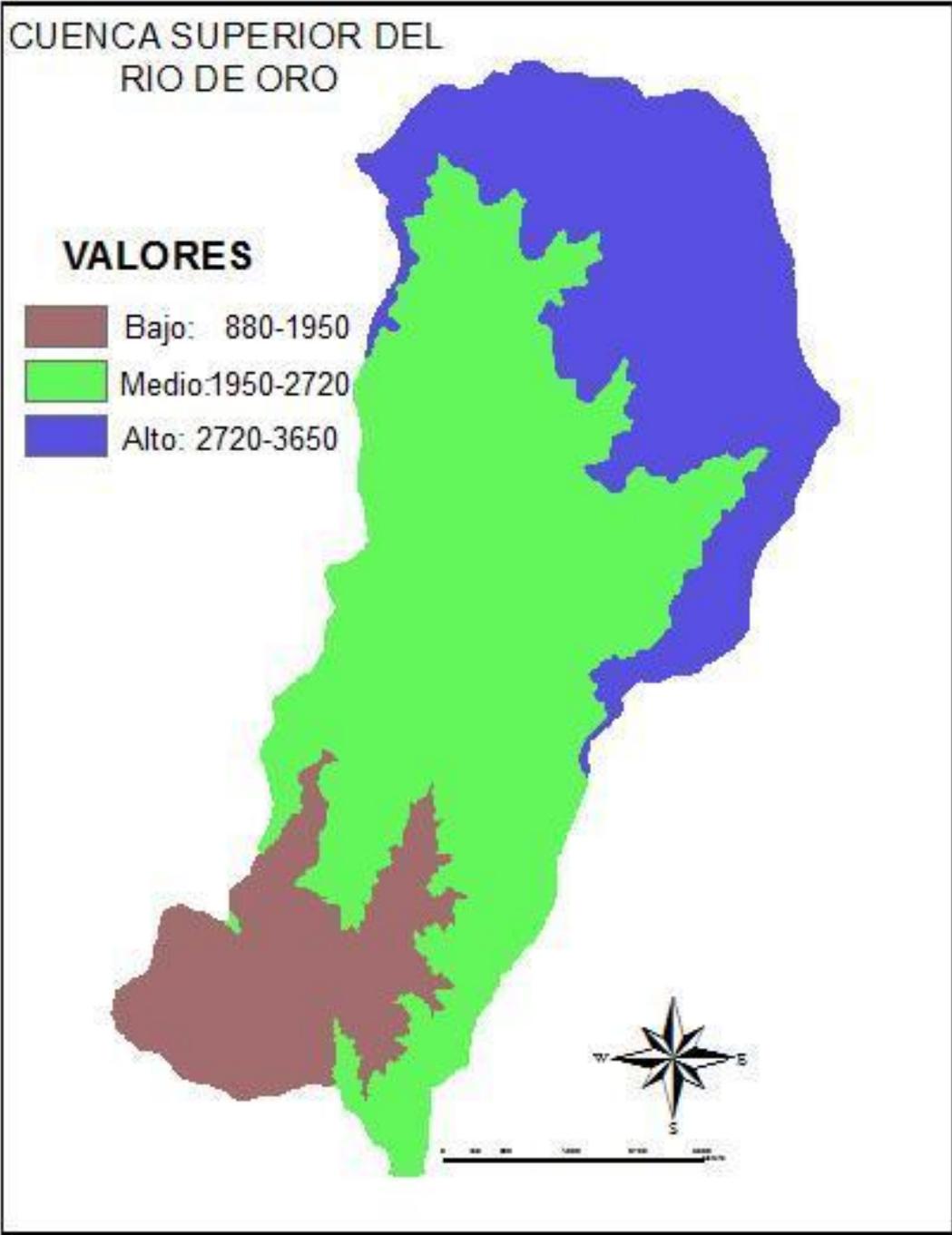


Figura19. Mapa de clasificación altitudinal según zona climática, generado por ArcMap (El Autor).

Estos últimos mapas serán posteriormente utilizados para desarrollar la composición de otros parámetros en el modelo.

### **3.3. MAPAS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN**

Las características de la conformación del suelo y la cobertura vegetal son dos aspectos importantes en el estudio de las cuencas, por su variada composición y distribución.

En este numeral se presentara un breve resumen de la técnica y el procedimiento utilizado para la elaboración de estos mapas, que fue desarrollado para la CSRO y adicionalmente para la cuenca del Río Lato, por un grupo de estudiantes de Ing. Civil que formaron parte del grupo GPH y que desarrollaron este trabajo de grado en la modalidad de investigación. [11], [39].

**3.3.1. Clasificación supervisada de cobertura vegetal y uso actual del suelo;** La clasificación es el proceso de extracción de información en imágenes para reconocer patrones y objetos homogéneos. La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía (cuantos). Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente, lo que permitirá distinguirlo de los demás, si medimos la radiación reflejada. Se puede definir cualquier tipo de energía dando su longitud de onda o frecuencia ya que el espectro electromagnético es una sucesión continua de estos valores, aunque conceptualmente se divide en bandas, en las que la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

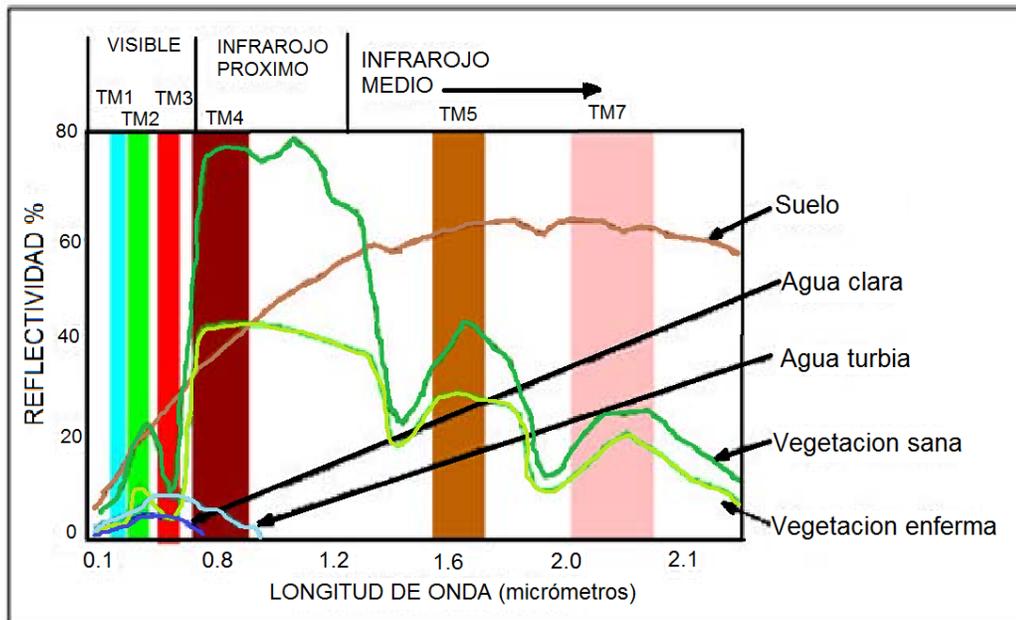


Figura20. Firma Espectral Típica de la reflectividad.

El software que se utilizó en esta etapa del proyecto se llama SPRING, permite realizar diferentes tipos de clasificación en este caso utilizamos la opción Supervisada en la cual previamente se deben seleccionar muestras de cada clase consecutiva. Esas zonas serán conocidas como zonas de entrenamiento, serán procesadas para calcular sus estadísticas: media, rango, desviación típica, etc. en todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Para la clasificación de la vegetación existente en la Cuenca Superior Río de Oro se adoptó la tabla de clasificación de COBERTURAS Y USO ACTUAL DE LAS TIERRAS de la CDMB [57], que integra metodologías utilizadas en los últimos diez años por IGAC/CIAT, UNESCO, CORTOLIMA, Instituto ALEXANDER VON HUMBOLDT. Esta metodología fue elegida debido a que es el sistema que más conviene para la investigación ya que se trata de una clasificación para efectos de un plan de manejo ambiental de reforestación y mantenimiento de la cobertura vegetal para el área de la cuenca en estudio.

Además también fue tomada la cartografía referida al uso actual de la tierra disponible desde el 2003 en la CDMB.

Dentro de la clasificación elaborada se encontraron e identificaron las siguientes clasificaciones de suelo y vegetación para nuestra área de estudio:

<b>Zona</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DEL SUELO</b>	<b>SÍMBOLO</b>
A	Arena mal gradada y limosa propios de bajas temperaturas, semipermeable con alta resistencia al corte.	<b>SP-SM</b>
B	Arena mal gradada y arcillosas, propias de clima frío moderadamente húmedo, semipermeable con resistencia media al corte.	<b>SP-SC</b>
C	Arena mal gradada propia de clima frío semihúmedo, permeable con alta resistencia al corte.	<b>SP</b>
D	Arena arcillosa, semipermeable con resistencia media al corte propio de clima Frio Medio- Húmedo	<b>Sc1</b>
E	Arena arcillosa, semipermeable con resistencia media al corte propio de clima Medio Súper-Húmedo	<b>Sc2</b>
F	Arena arcillosa, semipermeable con resistencia media al corte propio de clima Medio Moderadamente Húmedo	<b>Sc3</b>
G	Arena arcillosa, semipermeable con resistencia media al corte propio de clima Medio Semi- Húmedo	<b>Sc4</b>

Tabla 2 Clasificación general de suelo tomado en la CSRO.

<b>zona</b>	<b>CLASIFICACIÓN de VEGETACIÓN</b>	<b>SÍMBOLO</b>
1	Bosque Secundario	<b>BS</b>
2	Cultivo pasto y rastrojo	<b>CPR</b>
3	Cultivos Semipermanentes	<b>CSP</b>
4	Pasto natural	<b>PN</b>
5	Rastrojo	<b>R</b>
6	Vegetación especial	<b>VE</b>
7	Vegetación páramo	<b>VP</b>

Tabla 3 Clasificación general de la vegetación tomada en la CSRO.

Para la realización de la clasificación se realizaron una serie de actividades de campo, donde se tomaron muestras de suelo y localizaron las zonas más generales que describen la vegetación en la cuenca como se puede apreciar en el siguiente registro fotográfico.



Figura21. Registro fotográfico identificación de vegetación en las diferentes estaciones de muestreo.

ESTACIÓN	COORDENADAS		RESULTADO CLASIFICACIÓN
	N	E	
1	1119100	1276167	Cultivos Pastos Rastrojo
2	1119457	1276467	Cultivos Pastos Rastrojo
3	1119306	1276144	Cultivos Pastos Rastrojo
4	1119381	1275947	Bosque Secundario
5	1119600	1274757	Vegetación de Páramo
6	1119699	1273780	Cultivos Pastos Rastrojo
7	1119505	1272697	Cultivos Pastos Rastrojo
8	1119893	1270333	Cultivos Pastos Rastrojo
9	1119671	1270105	Cultivos Pastos Rastrojo
10	1119551	1269386	Cultivos Pastos Rastrojo
11	1119341	1266852	Cultivos Semipermanentes
12	1119358	1266448	Cultivos Pastos Rastrojo
13	1119045	1271619	Cultivos Semipermanentes
14	1118771	1270643	Bosque Secundario
15	1118160	1269212	Cultivos Pastos Rastrojo
16	1117600	1268092	Bosque Secundario
17	1116994	1266960	Bosque Secundario

Tabla 4 Cuadro localización estaciones de muestreo de vegetación en la CSRO.



Muestra 2



Muestra 3



Muestras 4



Muestra 5



Muestra 6

Figura22. Registro Fotográfico Muestreo de Suelo en CSRO.

Muestra #	COORDENADAS PLANAS	
	Norte	Este
1	1275224	1123786
2	1276457	1119457
3	1270333	1119893
4	1266448	1119358
5	1271598	1119041
6	1268092	1117600

Tabla 5 Cuadro localización estaciones de muestreo de suelo en la CSRO.

Con la clasificación y la localización más la aplicación del programa SPRING se desarrollaron los mapas correspondientes de vegetación y suelo.

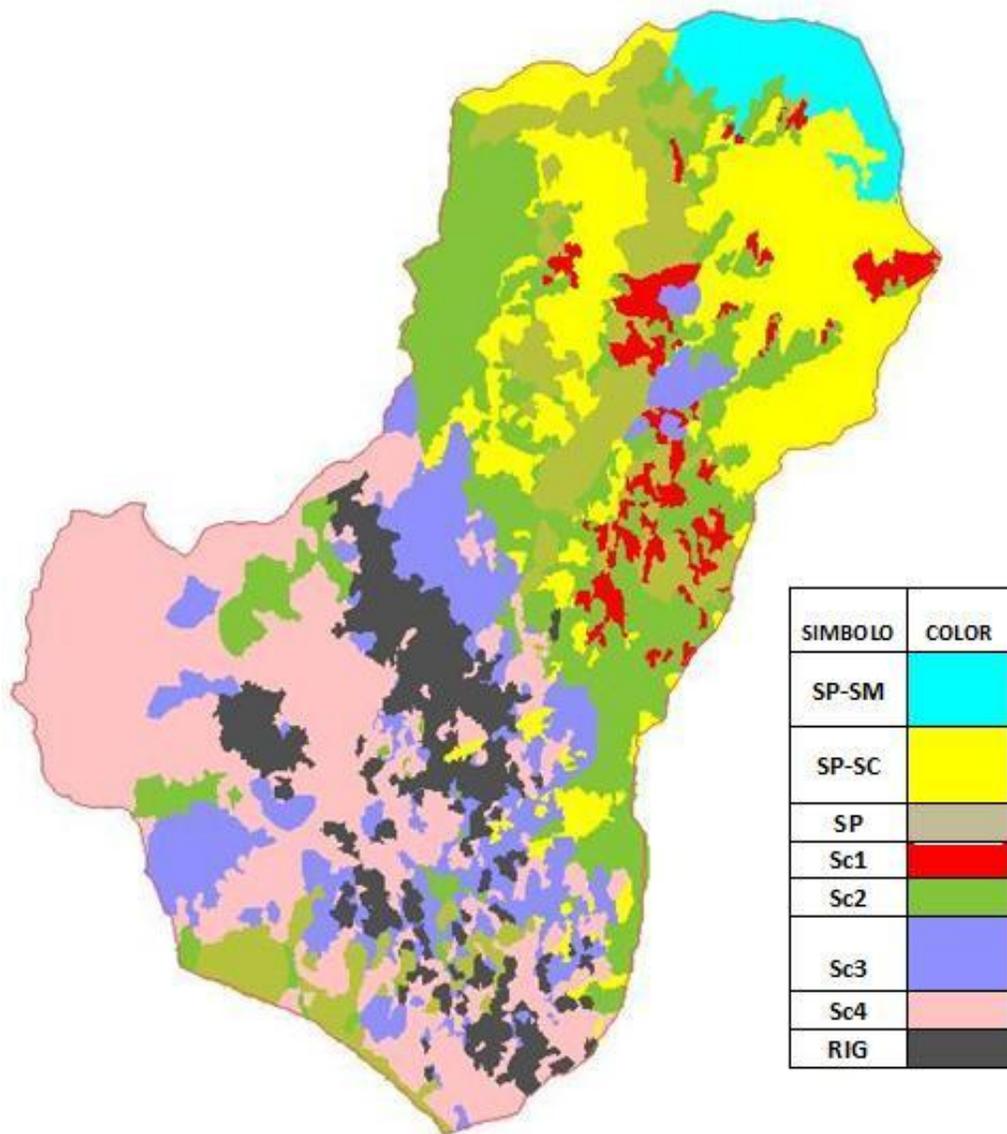


Figura23. Mapa de tipos de suelo establecido sobre la cuenca del rio de oro [11], [39].

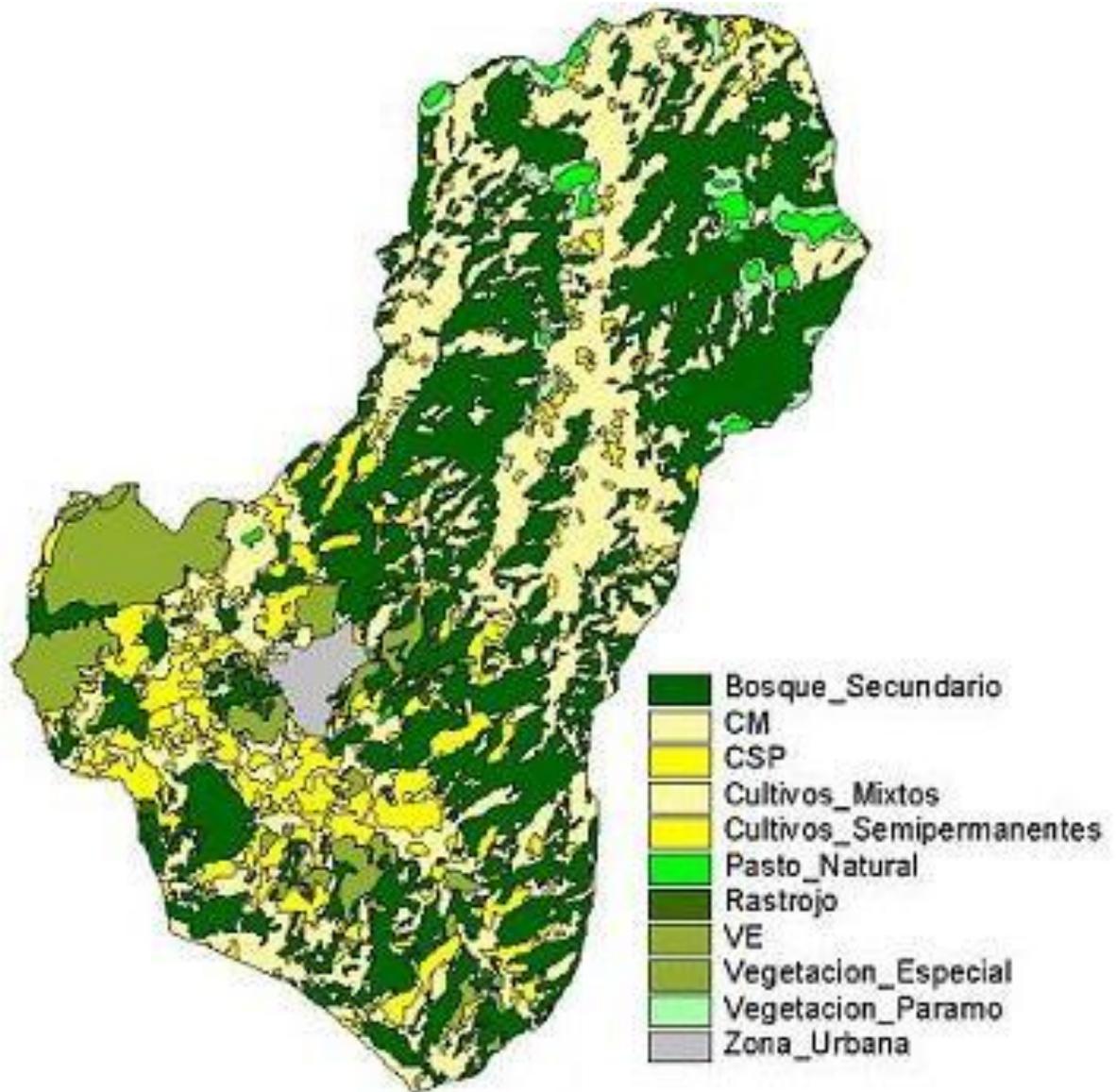


Figura24. Mapa de tipos de vegetación establecido sobre la cuenca del río de oro [11], [39].

Con el resultado final de estos mapas de vegetación y uso del suelo se procede a recortar la máscara correspondiente a la cuenca apropiada para que coincida con los anteriores mapas y posteriormente ser montados en el programa ArcMap con el correspondiente arreglo de tamaño de celda.

### 3.4. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

Para la implementación del modelo se requiere de información hidrológica de precipitación en la cuenca y de caudal sobre uno o más puntos de control. En este numeral, se describirá la información recopilada para tal fin, sus condiciones y disponibilidad y las características de los equipos utilizados y método de recolección y cálculos.

**3.4.1. Estaciones Hidroclimáticas;** En la cuenca superior del Río Lebrija se localizan un importante número de estaciones de diferente tipo y administradas por diferentes entidades como la CDMB, AMB, IDEAM y otras. La red pluviométrica de la cuenca superior del Río Lebrija está compuesta por una serie de estaciones que registran variables climatológicas, como información de precipitación, mediante el uso de instrumentos en la mayoría análogos, con resoluciones temporales mínima de 10 minutos en los pluviografos y diaria en los pluviómetros. La red de medición de la precipitación está basada fundamentalmente en registros pluviométricos operados manualmente.

Para la aplicación del modelo en la CSRO se han seleccionado por vecindad las siguientes estaciones:

- Estación el Rasgón (CDMB)
- Estación Berlín (IDEAM)
- Estación la granja Piedecuesta (IDEAM)

NOMBRE ESTACIÓN	PROPIETARIO	TIPO	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	PERIODO DE DATOS
Berlín	IDEAM	Pluviográfica	1133945	1286396	01/01/2009 a 01/01/2010
Rasgón	CDMB	Pluviográfica	1119912.75	1270294	08/01/2009 a 01/07/2009
Rasgón automática	UIS	Pluviográfica electrónica	1119912.75	1270294	06/04/2009 a 30/06/2010

La granja	IDEAM	Pluviográfica	1111958	1264897	01/01/2009 a 01/05/2010
U.P.B.	U.P.B	Pluviográfica electrónica	1111329.5	1270157	16/04/2009 a 30/06/2010
Conquistador	UIS	Limnímica electrónica	1115127.2060	1265218.3	11/02/2009 a 30/06/2010

Tabla 6 Cuadro localización estaciones en la CSRO.

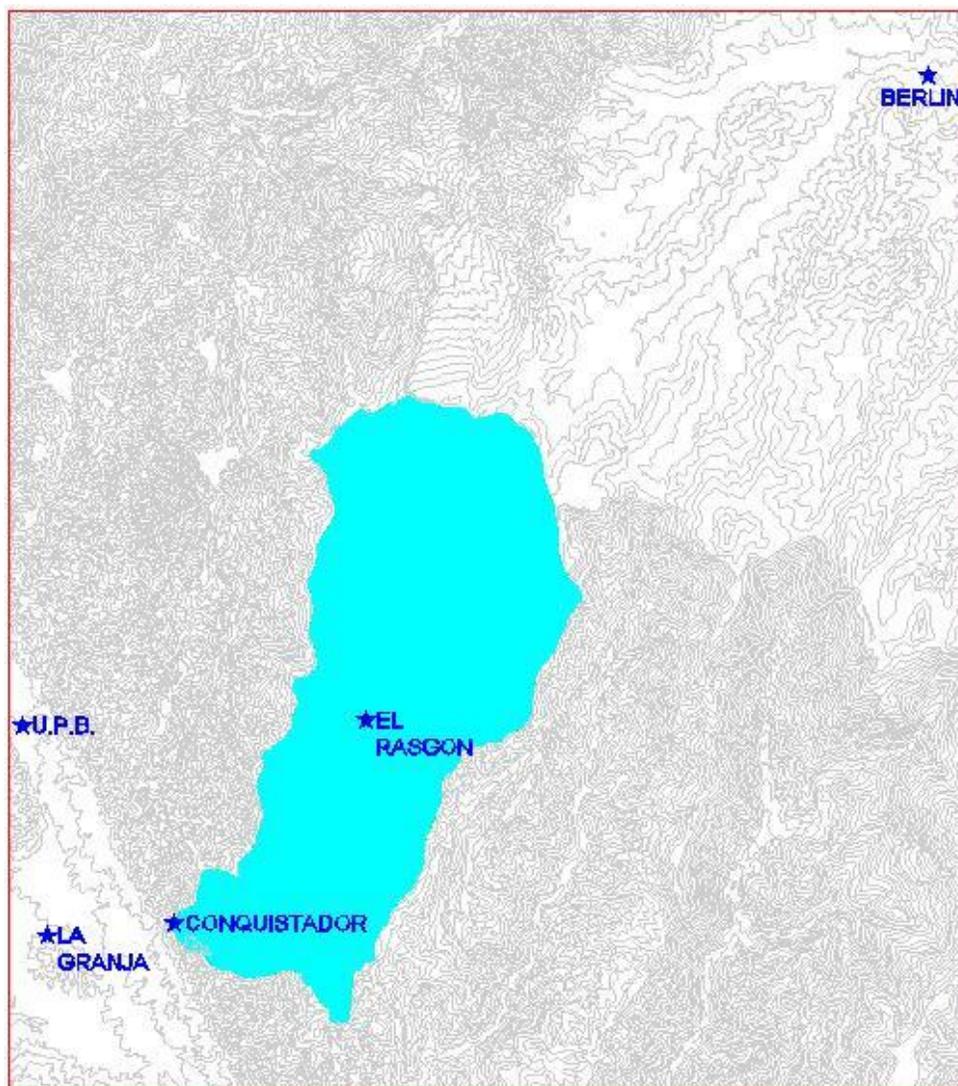
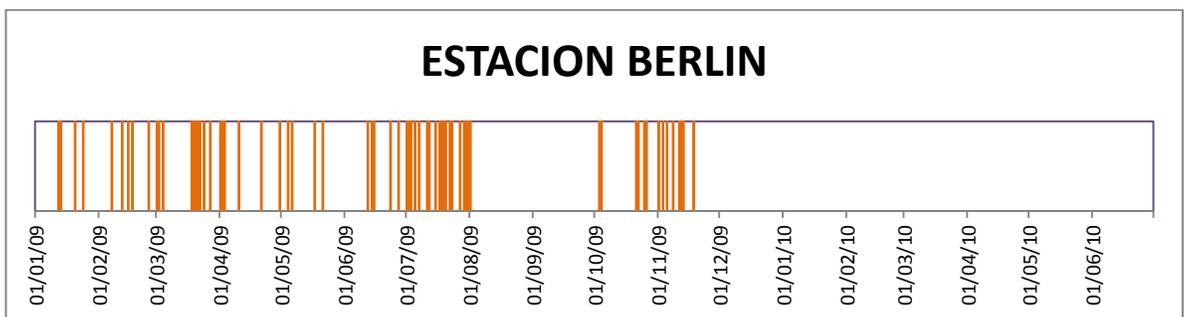
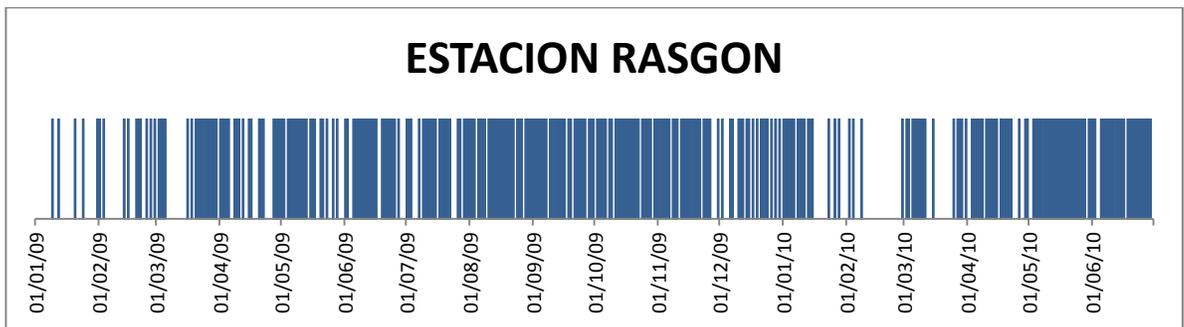


Figura25. Mapa de localización de las estaciones utilizadas sobre la CSRO.

Estas estaciones, recopilan información pluviográfica y sus respectivos pluviogramas son almacenados de forma física por cada entidad en sus archivos. La resolución temporal de las estaciones del Rasgón y de Berlín es de 10 minutos, a diferencia de la estación La Granja Piedecuesta que tiene una resolución mínima de 30 minutos.

Para la realización del presente estudio se requirió de la transformación de la información de estas estaciones, del formato de grafica en papel, a formato digital, por lo que se requirió de un proceso de digitalización gráfica y manipulación manual para ser procesada y tabulada en sus respectivos archivos.



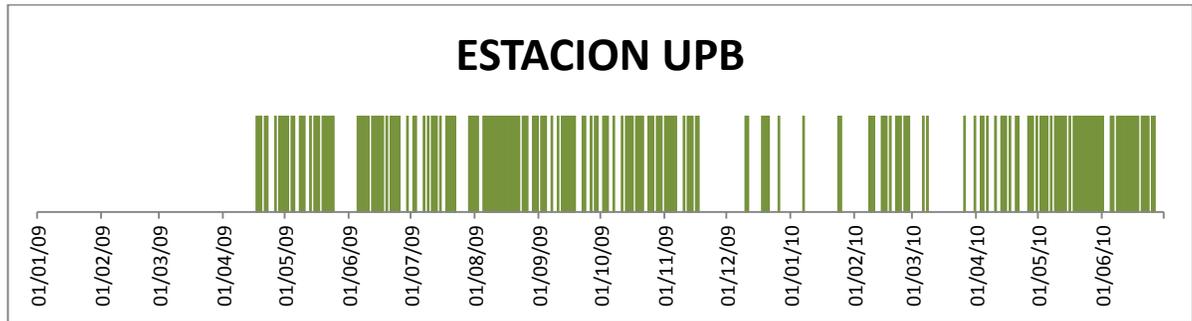


Figura26. Distribución general de información disponible en cada estación.

Adicionalmente a las anteriores estaciones, se implementaron dentro del área de influencia de la CSRO, unas estaciones climatológicas automáticas y de medida de caudal que permitieron la toma de información con una escala temporal menor y con mayor continuidad. Estas estaciones se identificaron como:

- Estación automática el Rasgón (UIS)
- Estación automática UPB (UPB)

En cuanto a la estación pluviométrica automática utilizada, de marca Daivis, permiten la toma de datos con una resolución temporal hasta de un minuto, pero el almacenamiento de la información puede ser en determinado momento una limitante para su manejabilidad, por lo que se debió contemplar estos aspectos para hacer eficiente y tener una buena cobertura de información tomando los datos cada 10 minutos.



Figura27. Estación automática instalada en el Rasgón.

**3.4.2. Estación automática de aforo;** Para la toma de datos de caudal sobre la corriente del Río de Oro se utilizó la información suministrada por la estación de aforo instalada por intermedio del convenio realizado entre la UIS y la Piedecuestana de Servicios. [18], [30], [20], [3].



Figura28. Información disponible en la estación conquistador.



Figura29. Estación de aforo Conquistador y equipo.

Teniendo en cuenta la información existente y los aforos desarrollados se estableció la ecuación de aforo.

$$Q = 1.40503E^{-4}H^{2.4342}$$

Ecuación final de calibración Conquistador

Definida la ecuación de calibración se procede a tabular los datos y a generar los archivos de los registros de precipitación y caudal de las estaciones, las gráficas de los datos están adjuntos en el anexo 1.

Uno de las consideraciones tomadas para finalmente establecer el conjunto de archivos que conformaran la información hidrológica del modelo es el intervalo de tiempo a tomar ya que este no es homogéneo en ninguno de los datos suministrado:

- Estación Rasgón y estación Berlín; Corresponde a una estación análoga con un intervalo mínimo de tiempo de 10 minutos.
- Estación La Granja Piedecuesta; Corresponde a una estación análoga con un intervalo mínimo de 30 minutos.

- Estación de aforo El Conquistador; Corresponde a una estación automática con una configuración de toma de datos cada 3 minutos.
- Estación climatológica Rasgón y UPB; Corresponden a estaciones automáticas marca DAVIS con una configuración de almacenamiento de datos cada 10 minutos.

Como se puede apreciar la configuración temporal de la información varia de 3 minutos a 30 minutos, lo cual requería de una transformación de la información a un intervalo común y que genere la mínima variación a la información; El intervalo final definido para transformar la información fue de 30 minutos ya que permitía el ajuste de la información sin una alteración significativa a la información inicial, más allá de acumular sus valores para el caso de la precipitación o de realizar un promedio para el caudal.

#### **4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS**

La implementación del modelo, requiere además de la información exigida por el programa, el reconocimiento e identificación de las características particulares de la cuenca y que estarán interviniendo en los procesos que desarrolla el modelo, como es la fase terrestre del ciclo hidrológico.

En esta sección se plantearán, el modelo conceptual, las componentes exigidas por el modelo, los eventos calibrados y validados y los correspondientes resultados obtenidos para cada caso, al igual que otros eventos no reales, simulados.

##### **4.1. Modelo conceptual.**

El modelo conceptual que se presenta corresponde a un modelo preliminar que intenta explicar los principales fenómenos que ocurren en la CSRO.

La interacción clima, vegetación y geología de la cuenca ha desarrollado procesos de meteorización asociados al alto fracturamiento presente debido a las diferentes fallas, principalmente por la fallada Bucaramanga y al conjunto de fallas que se evidencian en la región. La cuenca presenta altas pendientes que van desde 0 a más o menos el 60 grados, las cuales influyen en la distribución de la vegetación y el espesor del suelo con su caracterización propia; los cauces están alineados por las principales fallas regionales las cuales permiten la comunicación entre las diferentes formaciones y los diferentes niveles y estratos, como ocurre con la falla del río de oro que recorre y comunica la cuenca a nivel superficial, desde la parte alta con las formaciones silgara y la corcova hasta la parte baja con el neis de Bucaramanga. Para el planteamiento del modelo conceptual de flujo se tendrán en cuenta la geología y las características hidrogeológicas de la cuenca que se muestran a continuación.

#### 4.1.1. Mapas de Litología e Hidrogeología.

Partiendo de la información antes establecida en el capítulo 2 sobre la geología presente en la CSRO, como también de las diferentes clasificaciones hidrogeológicas [44], [7], se desarrollaron los correspondientes mapas de geología y mapa de zonas hidrogeológicas homogéneas, como se pueden observar en las siguientes figuras.

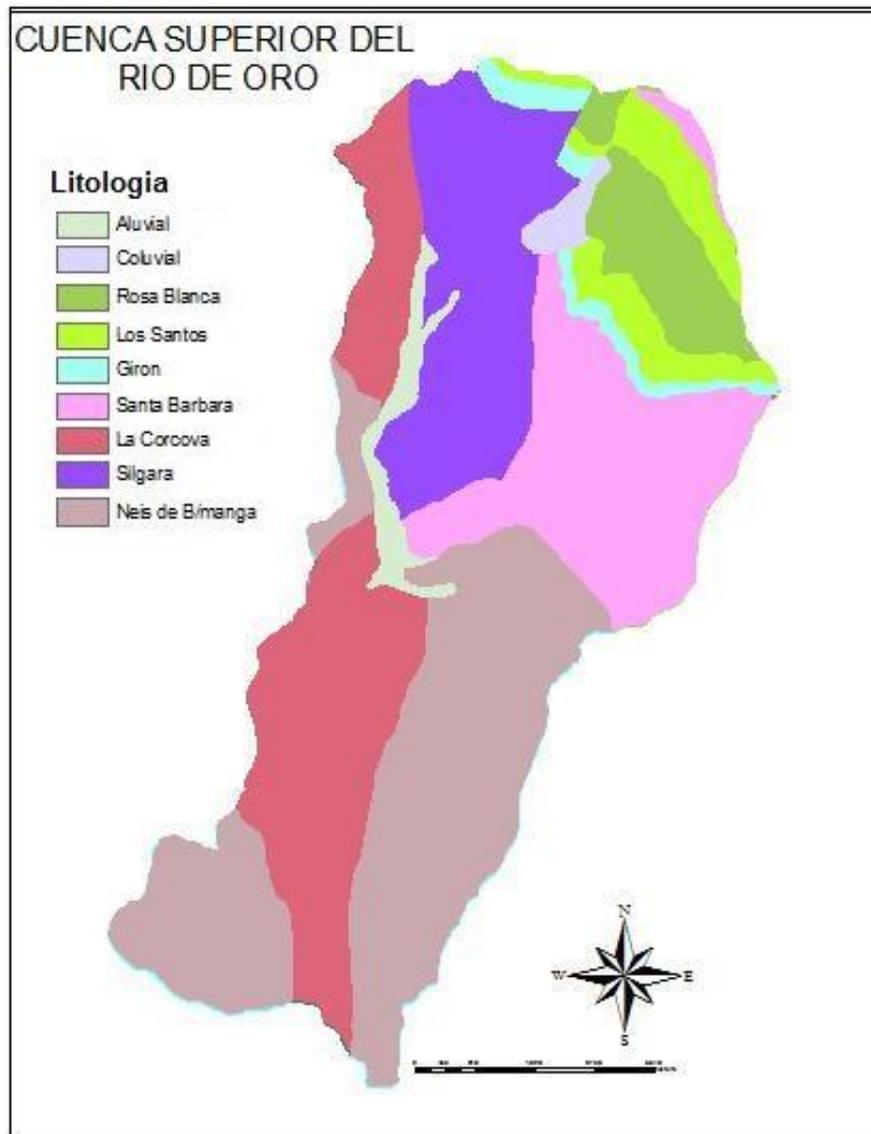


Figura30. Mapa con Litología de la cuenca tomado de [44] y modificado con ArcMap (El Autor)

Zona	Unidades De Roca	Densidad Diaclasami	Descripción Tipo de Meteorización	Espesor Aprox Meteorizac	Tipo de Porosidad
Zona II	Rocas cuarzofeldespáticas de la Cuarzomonzonita de La Corcova y el Neis de Bucaramanga	Media	Niveles areno limosos de color beige - amarillo claro, se forma carcavamiento de hasta 15 cms de apertura	20 - 25 m.	Primaria y Secundaria
Zona III	Rocas cretácicas, silíceas y calcáreas	Alta	Niveles de meteorización incipiente, de textura arenosa y en las rocas calcáreas se genera disolución pudiéndose observar fracturas abiertas de hasta 2m, dolinas en la zona de Picacho y Llano Adentro	< a 1 m	Secundaria y Primaria
Zona VI	Neis de Bucaramanga, Cuarzomonzonita de la Corcova, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara	Medio	Afloramientos de color amarillo - rojizo, de textura limo arcillosa, carcavamiento con una apertura de 15 cm	3 m.	Secundaria
Zona VII	Esquistos biotíticos y cloríticos de la Formación Silgará.	Baja	Niveles arcillosos de color naranja. Café claro	2 m.	-

Figura31. Cuadro resumen de características de las zonas hidrogeológicas en la CSRO. Tomado de [44]

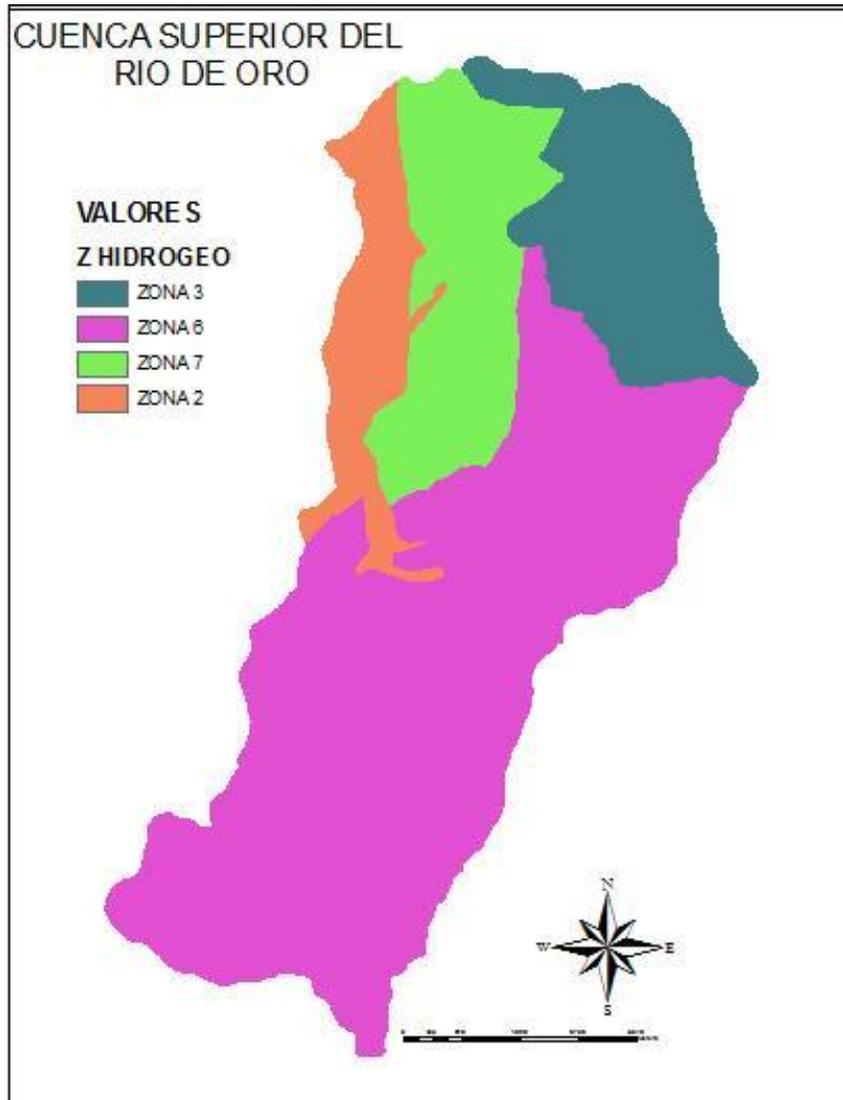


Figura32. Mapa con zonas hidrogeológicas de la cuenca Tomado de [44] y modificada con ArcMap (El Autor).

#### 4.1.2. Modelo conceptual propuesto para la CSRO.

En la región superior de la CSRO sobre la zona del picacho, en los nacimientos de la quebrada Coladepato y la Mocita se pudieron encontrar turberas y zonas con alta retención de flujo superficial, que permiten afloramientos muy ligados a la composición geológica de la formación Rosablanca con depresiones cársticas y zonas de dilución que facilitan los

procesos de transporte; igualmente se detectaron zonas de afloramiento sobre las laderas aledañas a la cuenca del río Lato, que pueden provenir de la parte alta de la ladera.

Los procesos de transporte presentes en la CSRO se desarrollan de dos posibles maneras: superficial y subsuperficial; ayudados por una parte por la aun existente cobertura vegetal que en la mayoría de la cuenca se conserva y en algunas partes en condiciones de bosque nativo y la restante en zonas de cultivo y pastizales; Por otra parte, la influencia de la falla de Bucaramanga genera que en la roca, predominen más la permeabilidad secundaria con la abundancia de diaclasas y fracturas, que permiten mayor permeabilidad y mayor meteorización de la roca sana, con la presencia de capas más gruesas de suelo meteorizado (entre 2 y 25 metros), ampliando la posibilidad del transporte de flujos subsuperficial y subterráneos, que aportan o dan soporte a las zonas de recarga, manteniendo el caudal base de las corrientes principales de la cuenca.

En las fotografías “a, b y c” del registro fotográfico de la figura 33 se puede apreciar la zona alta de la cuenca donde la vegetación de paramo y su geología permiten zonas donde la retención del flujo es mayor. En las fotografías “d, e y f se pueden observar zonas de afloramiento que evidencian la presencia de comunicación entre la zona alta y las zonas de ladera.



Figura33. Registro fotográfico de la cuenca.

Por último en las fotografías “g, h, e i” se observan los altos perfiles de meteorización y la espesa vegetación en la zona que conllevan a mantener el buen aporte y permanencia del flujo en los cauces.

Para el planteamiento del modelo conceptual se tuvo en cuenta la conformación geológica y sus características hidrogeológicas que permiten identificar sobre la zona de estudio, la presencia de zonas de recarga y afloramiento.

Esto nos permiten suponer que la dinámica de los flujos superficiales está muy marcada por la pendiente y la retención que se da sobre la capa superficial del suelo y la vegetación abundante en las zonas altas, mientras que en las zonas de baja pendiente, el flujo encuentra las condiciones adecuadas para hacer parte del flujo sub superficial y posteriormente aportar al caudal base de las corrientes.

En la zona alta de la cuenca, se presentan zonas de retención que regulan los aportes subsuperficial desde la parte alta a la zona media de la cuenca y los afloramientos presentes en la parte alta pueden ser evidencia de aportes de la cuenca o cuencas vecinas que junto a la presencia de la roca meteorizada y su alto nivel de fracturación son propicios para establecer redes de transporte del flujo en la cuenca.

La propuesta del modelo conceptual, permite representar los diferentes aportes y los correspondientes caminos que se dan sobre la cuenca y dentro del subsuelo con el suelo meteorizado y la roca fracturada que permiten que los cauces mantengan un flujo permanente a lo largo de todo su recorrido.

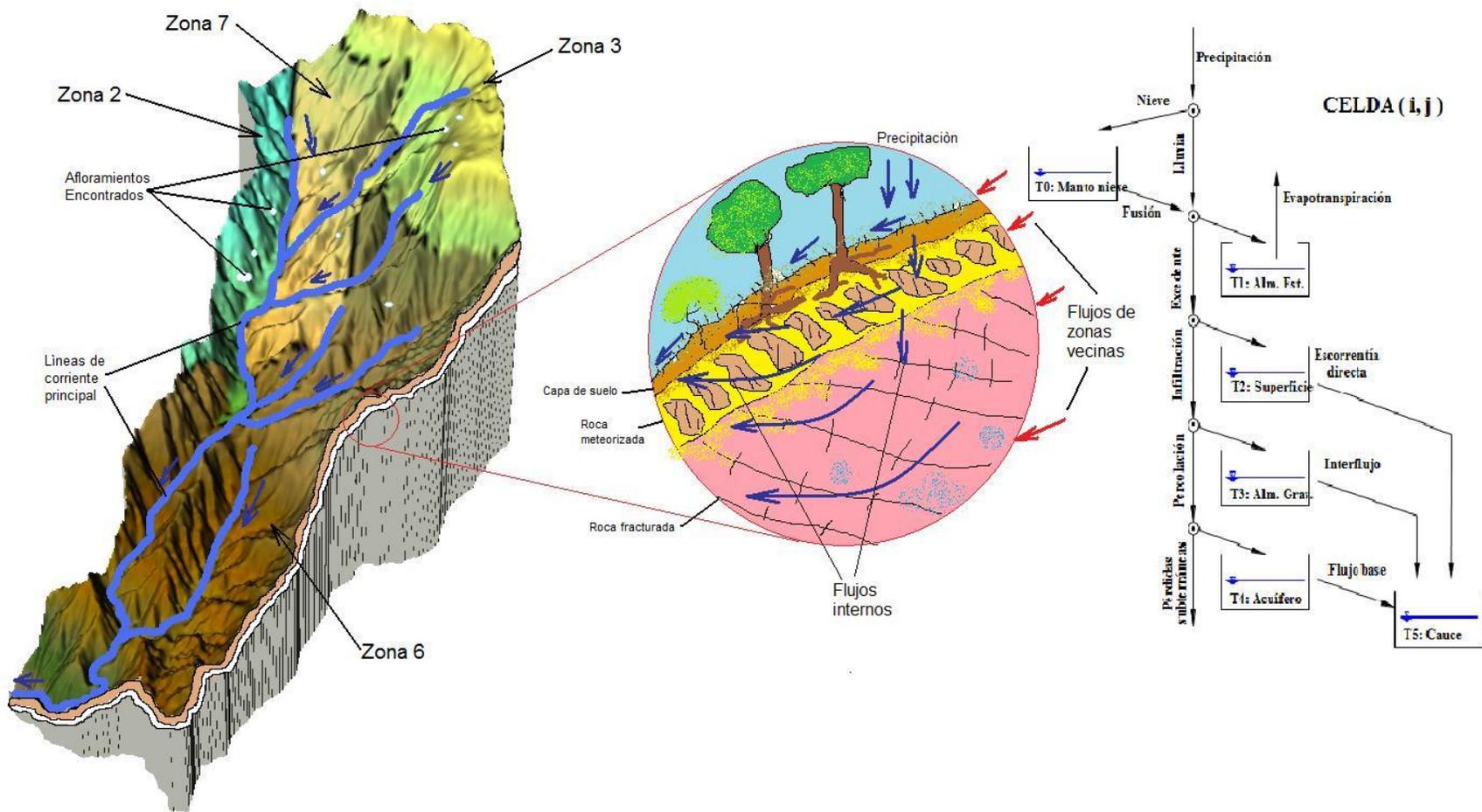


Figura34. Esquema del Modelo conceptual en la CSRO con relación al modelo TETIS.

## 4.2. Mapas de Hu, Ks, Kp.

Para la implementación del modelo se requiere de la descripción de 3 componentes importantes que participan directamente en los procesos de transporte, y que se describen como los mapas de: capacidad máxima de almacenamiento estático “Hu.”, conductividad hidráulica saturada del suelo “Ks.” y conductividad hidráulica saturada del sustrato “Kp.”.

Para la estimación de estos parámetros se utilizó la información existente sobre la cuenca y adicionalmente los valores de referencia [38], con el cual se describe de manera general cuales son los valores correspondientes para cada una de las estructuras y además establece los rangos de valores máximos y mínimos para cada caso.

### 4.2.1. Mapa de almacenamiento estático Hu.

El almacenamiento estático corresponde a la capacidad que tiene el suelo de almacenar agua y que puede ser aprovechado por las plantas, la cual se da en mm. y se calcula a partir de la fórmula:

$$Hu = \frac{\rho_b * P * (H_{cc} - H_{pmp})}{\rho_w * 100}$$
$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t}$$

Almacenamiento de agua en el suelo Hu en mm.

$\rho_b$  = Densidad aparente del suelo seco.

$M_s$  = Masa de la muestra de suelo.

$V_t$  = volumen de la muestra de suelo.

$H_u$  = contenido de agua útil.

$H_u$  = contenido de agua útil.

$H_{CC}$  = contenido de humedad a capacidad de campo %.

$H_{pmp}$  = contenido de humedad en el punto de % marchitez permanente.

$P$  = Profundidad del suelo m.

Partiendo de estas expresiones y para cada una de las clasificaciones de suelos establecidos en la cuenca, se definen los valores correspondientes de  $H_u$ .

El almacenamiento estático se encuentra influenciado por la vegetación que contenga y la pendiente del terreno, ya que su condición incide en el espesor de capa y la exposición en que se encuentran; teniendo en cuenta estos aspectos se realizó la superposición de los mapas de suelo, pendiente y vegetación, para definir las áreas y los correspondientes valores de  $H_u$ .

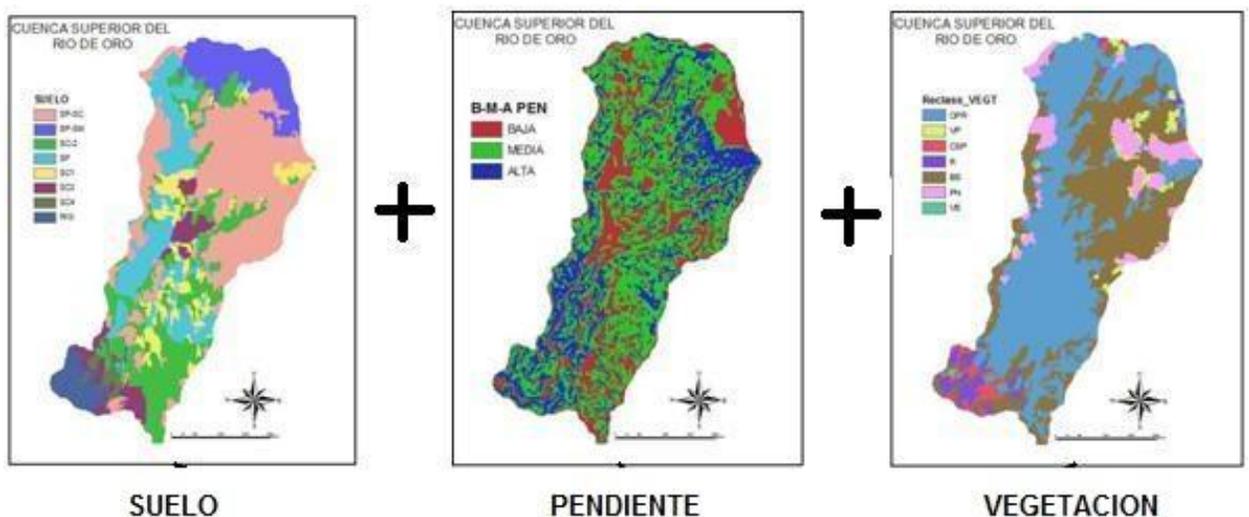


Figura35. Generación mapa de  $H_u$  en la CSRO mediante la superposición de los mapas de suelo, pendiente y vegetación.

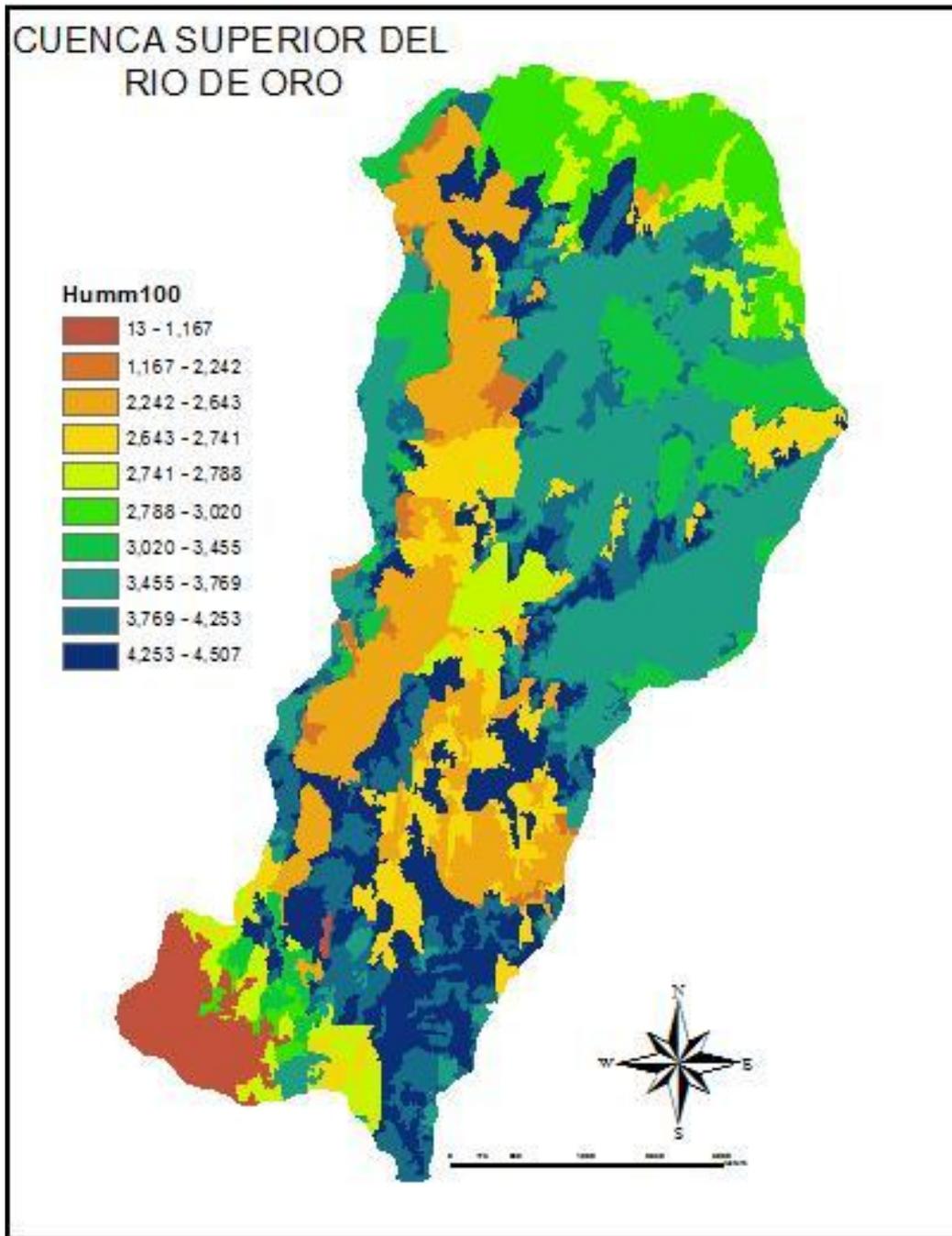


Figura36. Resultado final de la generación mapa de Hu en la CSRO mediante el uso de ArcMap (El Autor).

#### 4.2.2. Mapa de conductividad hidráulica del suelo Ks.

La conductividad hidráulica reemplaza al término de coeficiente de permeabilidad del terreno. Este término es el empleado para referirse a la cualidad de los materiales del terreno para transmitir el agua de un punto a otro en términos cuantitativos. La conductividad hidráulica es uno de los parámetros de la ecuación de Darcy. Sus unidades son de velocidad; comúnmente m/d; darcys; y menos frecuentemente cm/h.

La conductividad de suelo Ks en este caso se caracteriza por la condición de suelo presente y la característica hidrogeológicas presentes en la conformación geológica quienes son los que definen las diferentes combinaciones presentes de Ks.

Se superpusieron los mapas de las zonas de interés hidrogeológicas y el tipo de suelo en la cuenca, generando el correspondiente mapa de Ks.

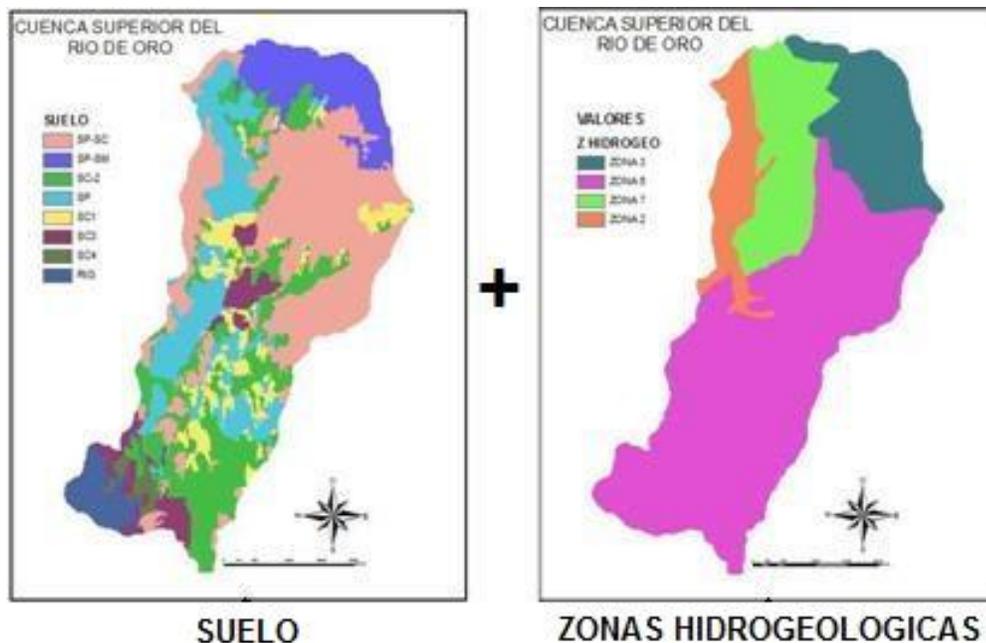


Figura37. Generación mapa de Ks en la CSRO mediante la superposición de los mapas de suelo y zonas de interés hidrogeológicas.

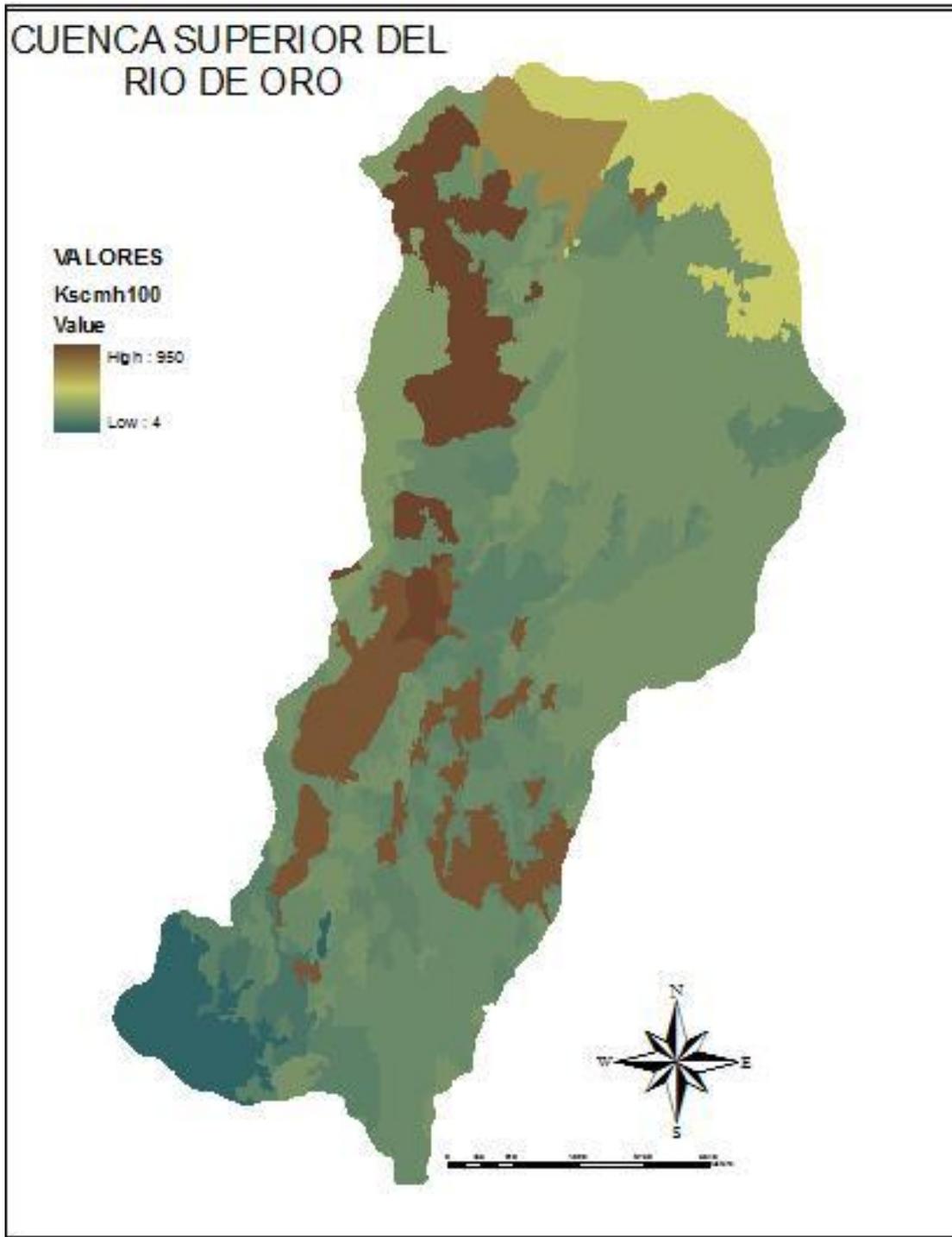


Figura38. Resultado final de la generación mapa de Ks en la CSRO mediante el uso de ArcMap (El Autor).

#### 4.2.3. Mapa de conductividad hidráulica del substrato Kp.

La conductividad de la roca esta relaciona con las características propias de la roca y su estado de fracturación y meteorización, lo cual indica la disposición que tiene la roca para el paso o retención del flujo. Para la determinación de este mapa se combinaron los mapas de la litología y las zonas hidrogeológicas y se determinaron los valores de referencia correspondientes.

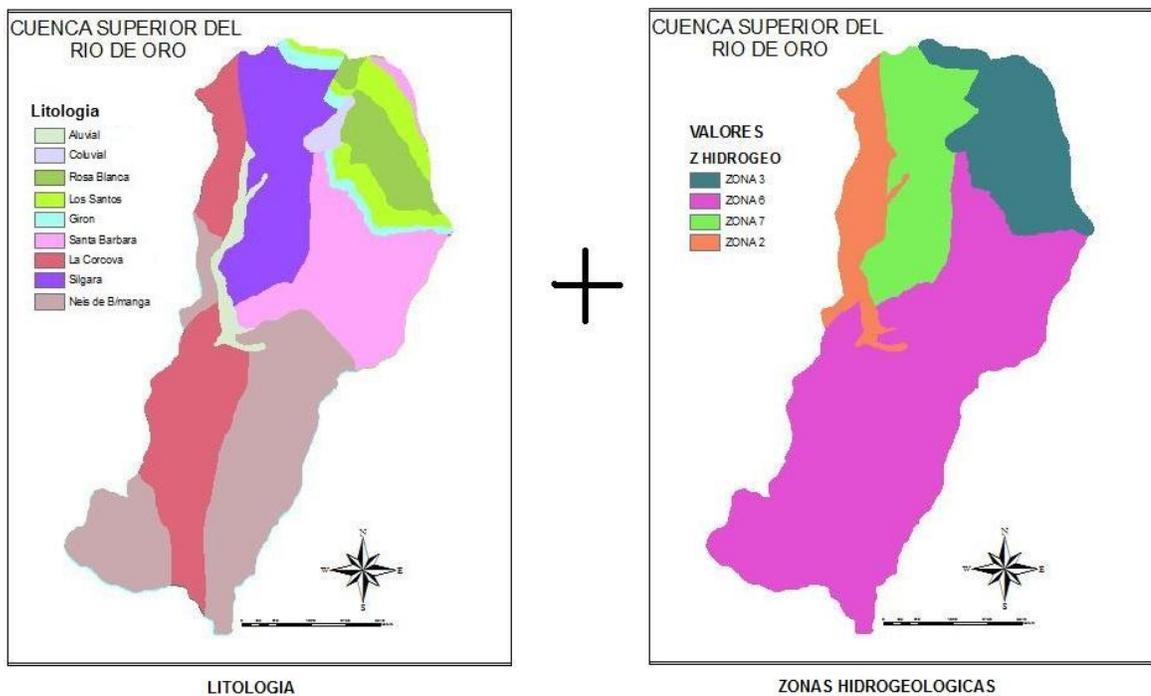


Figura39. Generación mapa de Kp en la CSRO mediante la superposiciones los mapas de la litología y zonas hidrogeológicas.

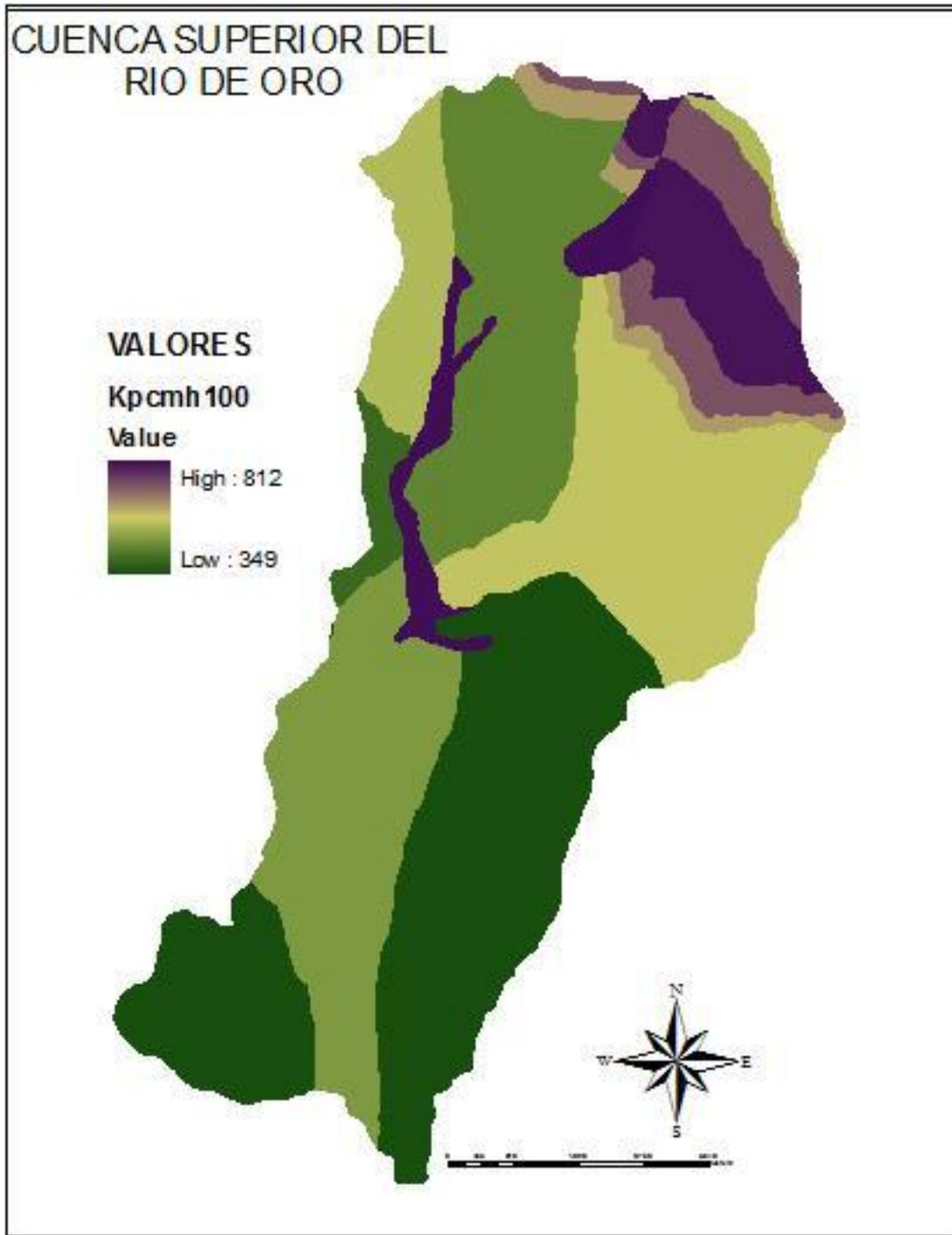


Figura40. Resultado final de la generación mapa de Kp en la CSRO mediante el uso de ArcMap.

### 4.3. DEFINICIÓN DE EVENTOS Y PERIODOS DE ESTUDIO.

En el desarrollo de la etapa de recolección y tabulación de la información se encontraron los diferentes periodos presentes en todas las estaciones, para ser tenidos en cuenta durante el proceso de aplicación del modelo. Para la selección de los diferentes periodos, se tendrá en cuenta que el periodo para validar corresponda a un periodo con las mismas características pero con un intervalo menor al de calibración.

Los intervalos pertinentes para tener en cuenta, en este estudio y considerando la disponibilidad de datos, se seleccionaron según periodos y eventos que pudieran marcar temporadas de fuertes lluvias y periodos secos, para establecer la respuesta de la cuenca en las dos condiciones.

La totalidad de la información disponible permite considerar una temporada de lluviosa que se extiende desde el 16 de Abril de 2009 al 3 de noviembre del mismo año y una temporada seca desde el 18 de noviembre del 2009 al 25 de abril del 2010 como se aprecia en la figura 38.

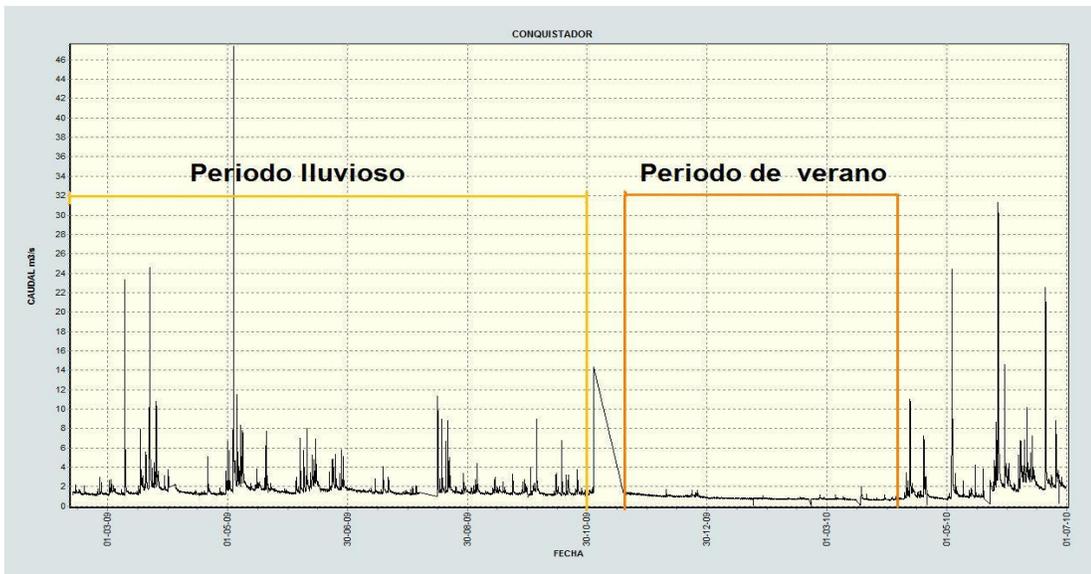


Figura41. Periodos de datos a ser tenidos en cuenta para el modelo. Caudales medidos en la estación el Conquistador.

Dentro de cada periodo se seleccionaron dos intervalos para el proceso de calibración y 2 para la validación del modelo, los cuales corresponden a los siguientes intervalos de tiempo:

	Calibración		Validación	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
<b>E Lluvias</b>	29/04/2009 01:30	10/05/2009 08:30	23/05/2010 10:00	02/06/2010 10:00
<b>E verano</b>	19/04/2009 08:00	29/04/2009 01:30	06/12/2009 00:00	30/12/2009 23:30

Tabla 7 Intervalos de estudio para el modelo.

#### 4.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.

Para la implementación del modelo se transfirieron los mapas construidos y la información existente de las estaciones, según los formatos y características como los requiere el modelo TETIS. Los mapas se convirtieron en formato ASCII con extensión “\*.ASC”. Cada episodio de eventos se crea con el formato columna propuesto por el modelo y se crea según el formato indicado. Los otros archivos que requiere el modelo como la evapotranspiración y los parámetros geomorfológicos que tienen extensión “\*.TXT”. Todos estos elementos se relacionan en la ventana de archivos del modelo con la correspondiente ruta, como se muestra en la siguiente figura 39.

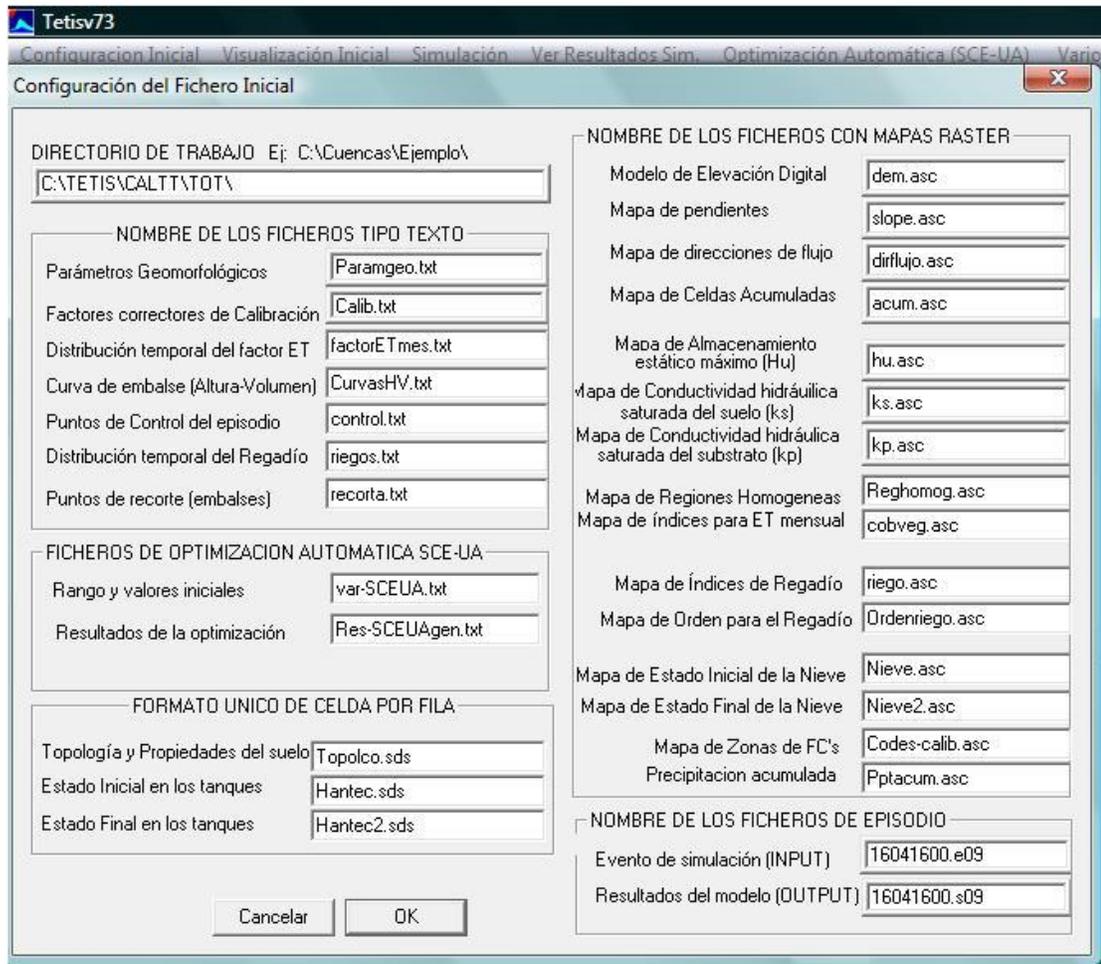


Figura42. Ventana de configuración de los ficheros para modelar en TETIS.

**4.4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN;** Para el proceso de calibración se asignaron los correspondientes valores de los factores de calibración según criterio y respuesta encontrada en cada desarrollo del modelo, permitiendo encontrar el mejor ajuste y los mínimos valores recomendados de cada parámetro.

Los parámetros a tener en cuenta en la estimación del mejor ajuste de los factores de calibración son: RMSE (Error cuadrático medio), NSE (Coeficiente de eficiencia o índice de eficiencia de Nash) y error en el volumen.

El RMSE es un medidor de eficiencia, el cual busca el menor valor posible y relaciona la raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias cuadradas de los caudales medidos y calculados sobre el número total de datos.

El Índice de Nash, [21], [23], [38], es muy usado en la evaluación de modelos ya que involucra la estandarización de la varianza residual y su valor esperado no cambia con la longitud del registro o la magnitud de la escorrentía. Un perfecto ajuste sugiere un valor igual a uno, cuando el valor es cero indica que el modelo no es bueno y valores negativos indica que es peor.

Con el error de volumen se puede observar si los resultados, subestimado o sobrestimado es el modelo según si es positivo o negativo respectivamente. Cuando el error es cero, se tiene el mejor resultado.

Teniendo en cuenta estas características para la calibración se desarrollaron las correspondientes calibraciones y validaciones, para cada uno de los tramos tomados, como se puede observar en la tabla 9, donde se relacionan los diferentes valores de los parámetros de comparación.

Durante el proceso de calibración de invierno, se establecieron los factores correctores más adecuados para el evento de calibración, los cuales se tabulan en la tabla 8.

<b>Factores correctores</b>			
FC-1 Almacenamiento estático	0.0515	FC-6 Flujo subsuperficial	10
FC-2 Evapotranspiración	1	FC-7 Perdidas subterráneas	-0.00981
FC-3 Infiltración	0.0246	FC-8 Flujo base	5
FC-4 Escoorrentía directa	0.0053	FC-9 Velocidad en el cauces	3
FC-5 Percolación	35	Beta – coeficiente de interpolación	0

Tabla 8 Factores correctores determinados para el modelo.

Dentro de la definición de los diferentes factores se pudo encontrar que algunos de estos factores representan mayor o menor alteración en el modelo y algunos otros no implican cambios apreciables.

Dentro de los factores de calibración que no alteran o no están presentando modificaciones en el modelo, encontramos a la Evapotranspiración, que por considerarse un periodo corto del evento, los cambios presentes de este parámetro son constantes; También otro factor que no se considero fue el coeficiente de interpolación de la precipitación.

Los factores de almacenamiento estático, infiltración y escorrentía directa, son considerados dentro del desarrollo del modelo como de alta sensibilidad y muy significativos para sus favorables resultados, mostrando la importancia de estos elementos dentro del modelo.

Los factores de calibración relacionados con la percolación, el flujo subsuperficial, el flujo base y la velocidad del cauce, poseen un nivel de sensibilidad bajo, mostrando cambios poco notorios con alteraciones (mayores a la unidad) fuertes de su valor, indicando que estos parámetros son menos directos en el desarrollo del modelo.

Un factor que mostro un comportamiento particular fueron las perdidas, ya que desde el comienzo del proceso de simulación no se contempló en el modelo, pero se presentó que en los resultados simulados no existía una representación clara de la recesión en el cauce y por el contrario este no se ajustaba a lo requerido; Posteriormente se notó que la existencia de este factor modificaba el comportamiento del caudal, pero fue necesario darle valores negativos para que pudiera representar adecuadamente el evento, Indicando que para nuestro caso, en la cuenca no se presentan salidas de flujo a otras cuencas, si no que de lo contrario existen aportes subterráneos de otras cuencas.

PARÁMETRO	EVENTOS			
	INVIERNO		VERANO	
	Calibración	validación	calibración	validación
Caudal máximo Observado. (m3/s)	47.403	31.295	2.132	1.7320
Caudal máximo simulado. m3/s	43.434	30.359	5.398	1.8020
RMSE	1.7080	1.195	0.171	0.073
Tiempo al pico Observado.	103.0	97.5	55	92.5
Tiempo al pico Simulado.	103.5	97.5	55	91.0
Error Tp %	-0.485	0	0	1.622
Volumen Observado. (Hm3)	3.604	3.393	1.344	1.472
Volumen Simulado. (Hm3)	3.898	3.334	1.416	1.473
Error en volumen %	-8.143	1.75	-5.368	-0.077
Índice de Nash y Sut (R2)	0.765	0.8957	0.8639	0.0529

Tabla 9 cuadro comparativo de resultados de calibración y validación.

Con los factores correctores estimados en el evento de calibración de invierno, se realizó la aplicación en el correspondiente evento de validación encontrándose que los correspondientes valores de chequeo muestran que para el evento de validación, estos valores son más favorables, siendo el índice de Nash más cercano a uno, el error de volumen y el RMSE más cercano a cero, por lo tanto se considera adecuada la calibración y la validación para eventos de verano.

De igual forma se aplican los correspondientes factores a los eventos de verano, para comparar los resultados de calibración, encontrando un buen ajuste en la gráfica y unos valores de chequeo mejores que los calculados para el evento inicial, garantizando la calidad de los factores de corrección.

Para el evento de validación en periodo de verano, se encontraron unos valores de chequeo mejores al de calibración, excepto el índice de Nash que para este caso es muy cercano a cero lo cual no es conveniente pero también se puede apreciar una irregularidad en los datos, que muestran un comportamiento anormal durante los diferentes días, que afecta el resultado del índice.

Para una mejor ilustración de los resultados se muestran a continuación las gráficas de los reportes de calibración dados por el modelo para el evento de invierno y en el anexo 2 y 3 se adjuntan las gráficas de todos los eventos modelados con la correspondiente grafica final del evento simulado.

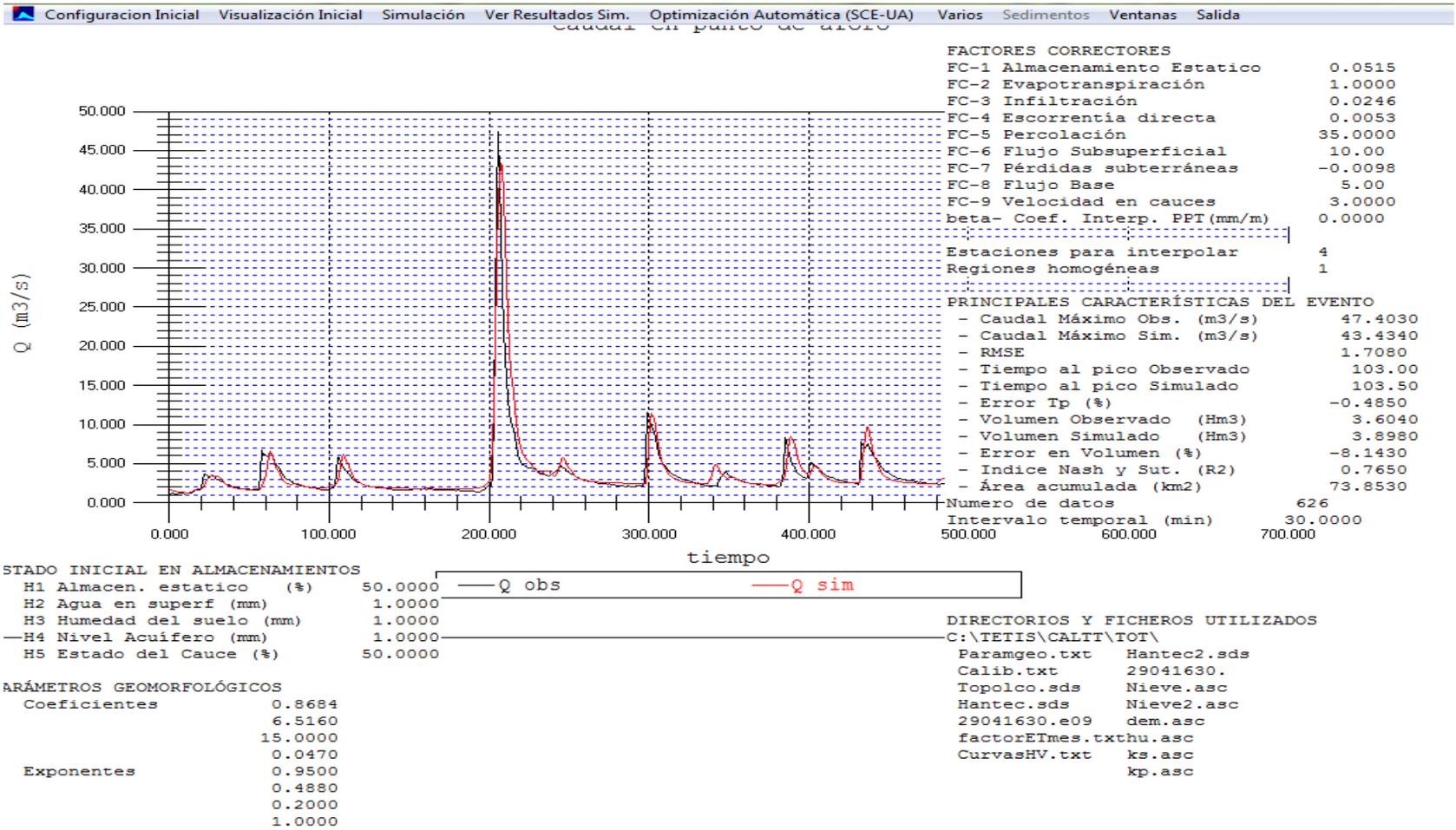


Figura43. Resultados de calibración evento de invierno

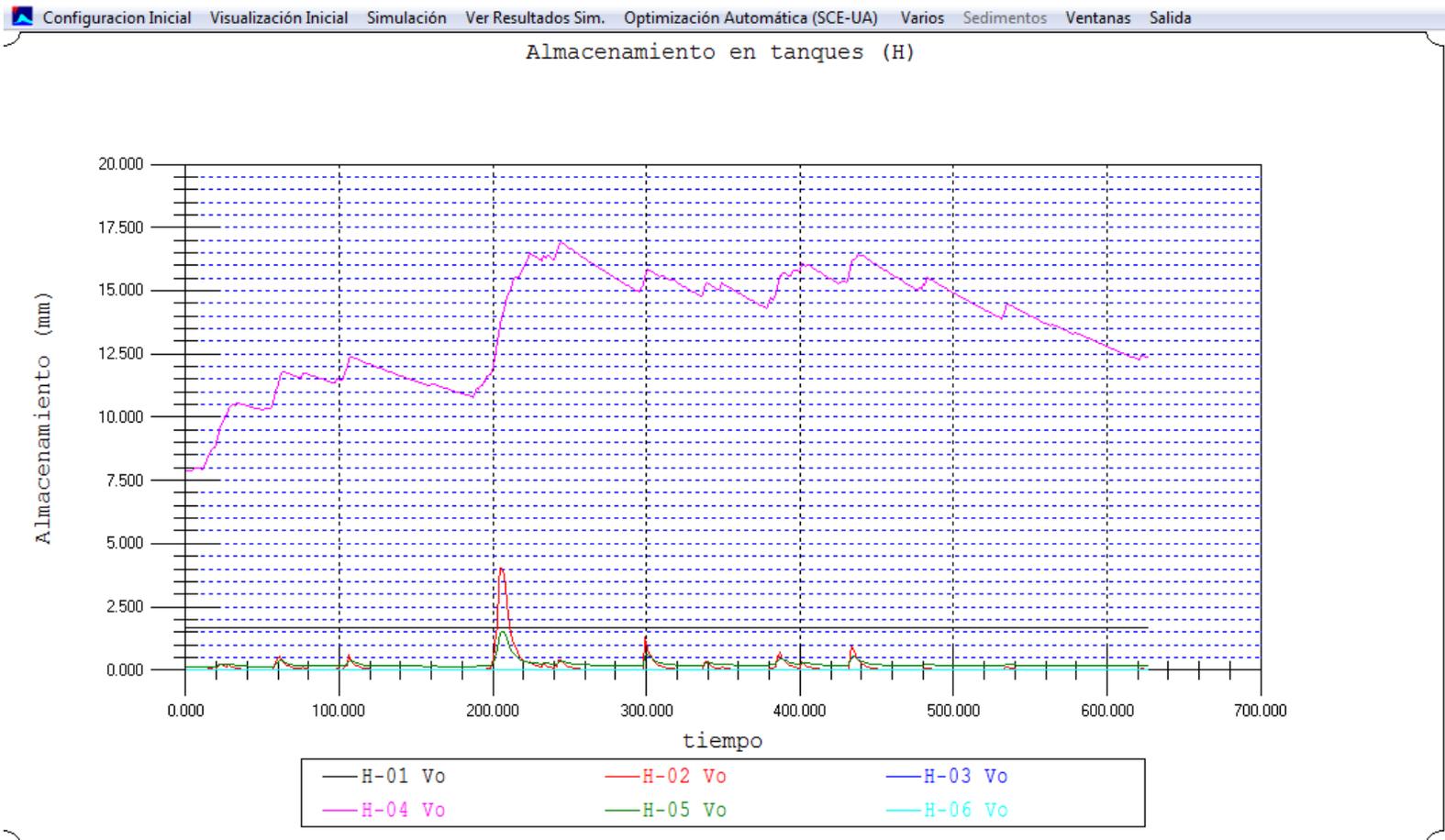


Figura44. Gráfico de almacenamiento en tanque donde se puede observar un alto nivel del tanque correspondiente al almacenamiento en el tanque que representa el flujo base (H4)

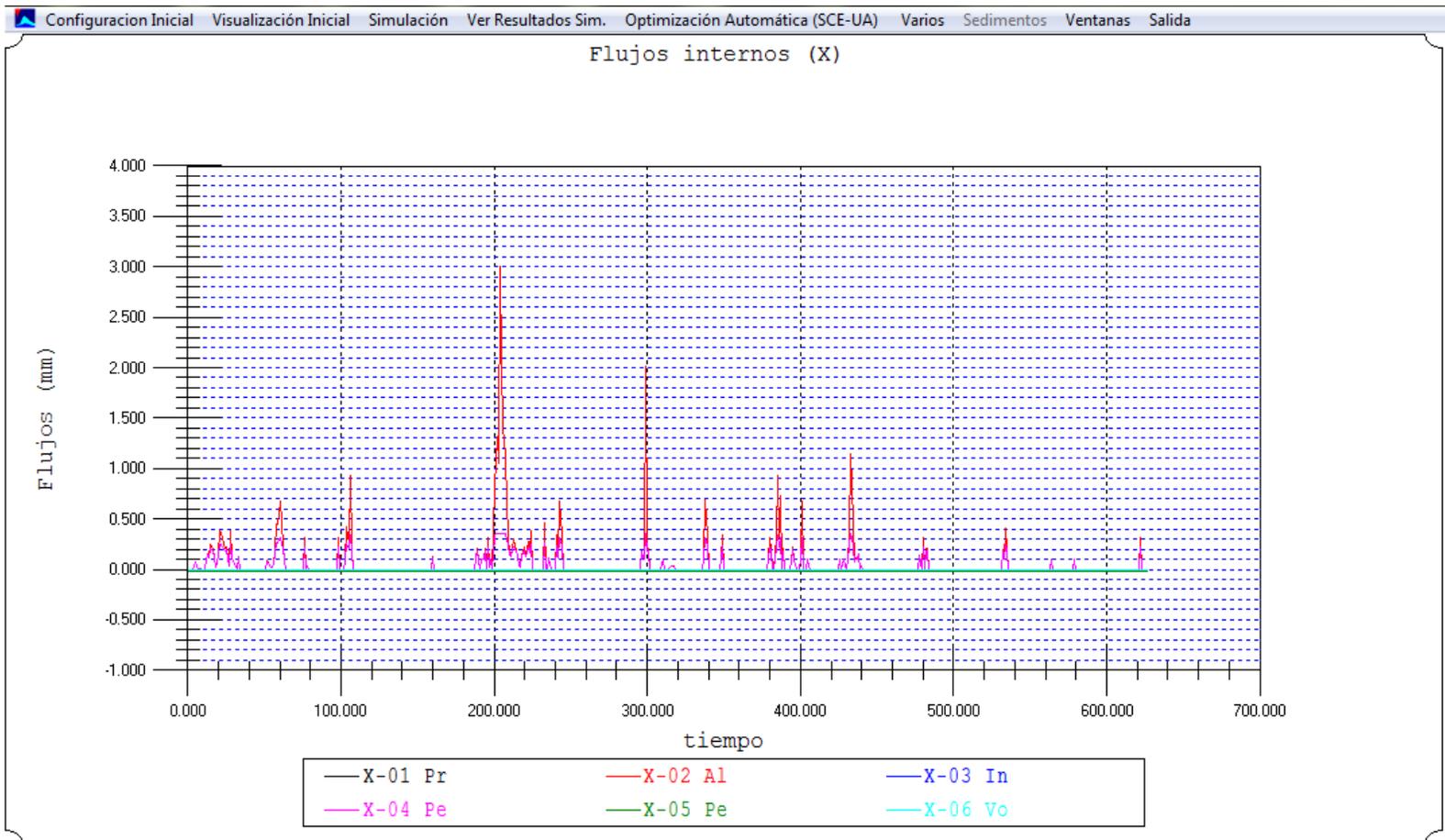


Figura45. Gráfico del flujo interno que se desplaza verticalmente en el modelo, mostrando que los valores máximos están representados por el flujo de excedencia (X2) y que luego se convierte en escorrentía superficial,

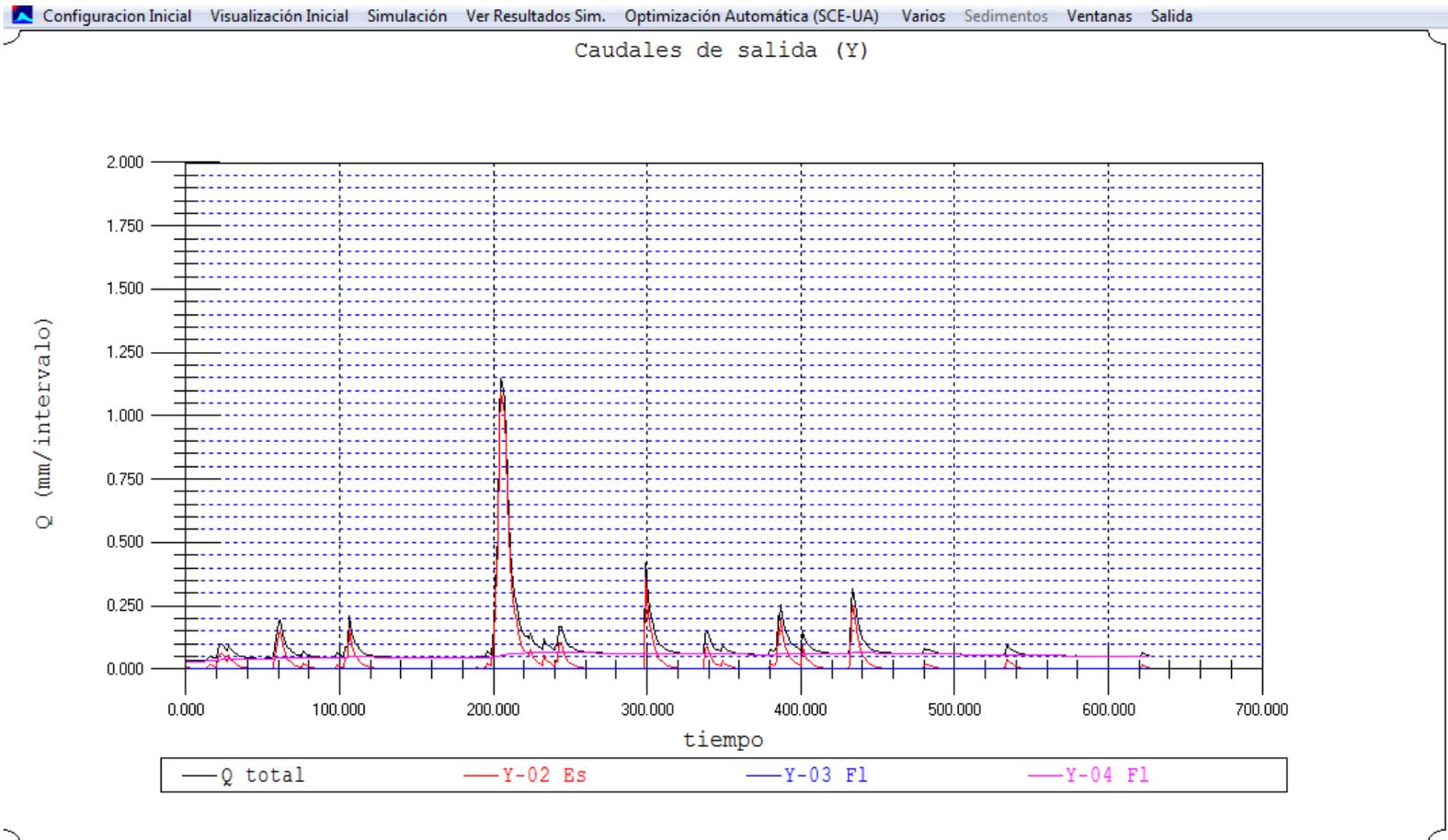


Figura46. Gráfico del flujo interno que se desplaza horizontalmente en el modelo, mostrando que los valores máximos están representados por el flujo en la estación de aforo y se aprecia claramente la presencia del flujo base (Y4)

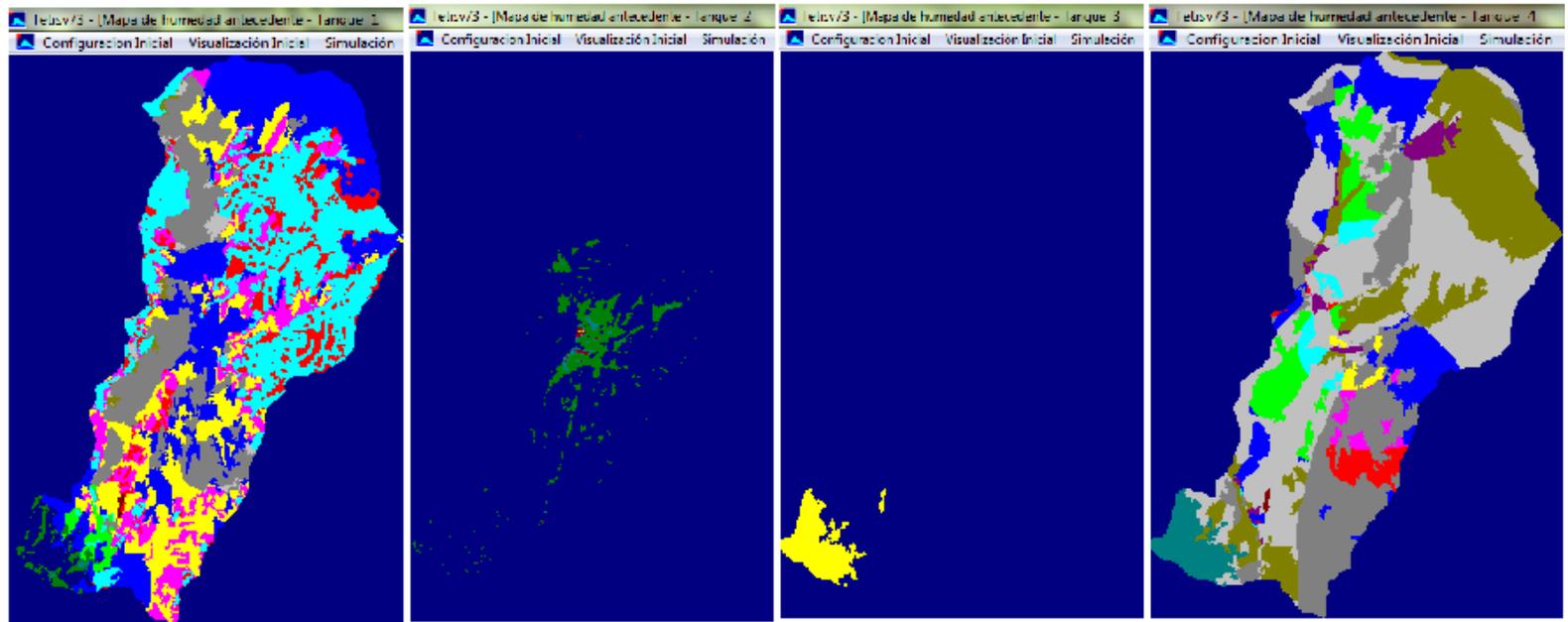


Figura47. Mapas del estado de almacenamiento al final del periodo, en los diferentes tanques del modelo, y se puede apreciar que al final del periodo los tanques con mayor capacidad son los del almacenamiento superficial y el flujo base.

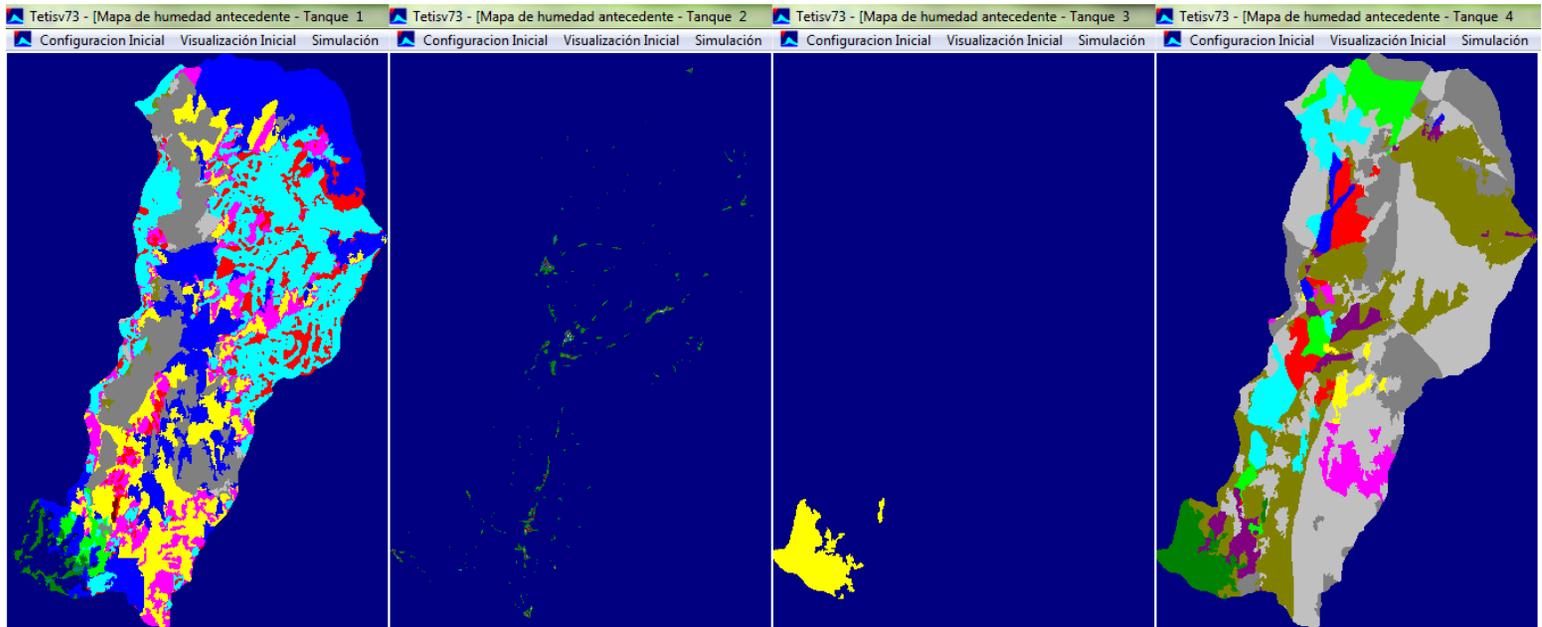


Figura48. Mapas del estado de almacenamiento 22 horas después del pico máximo, en los diferentes tanques del modelo, donde se pueden identificar valores puntuales de almacenamiento.

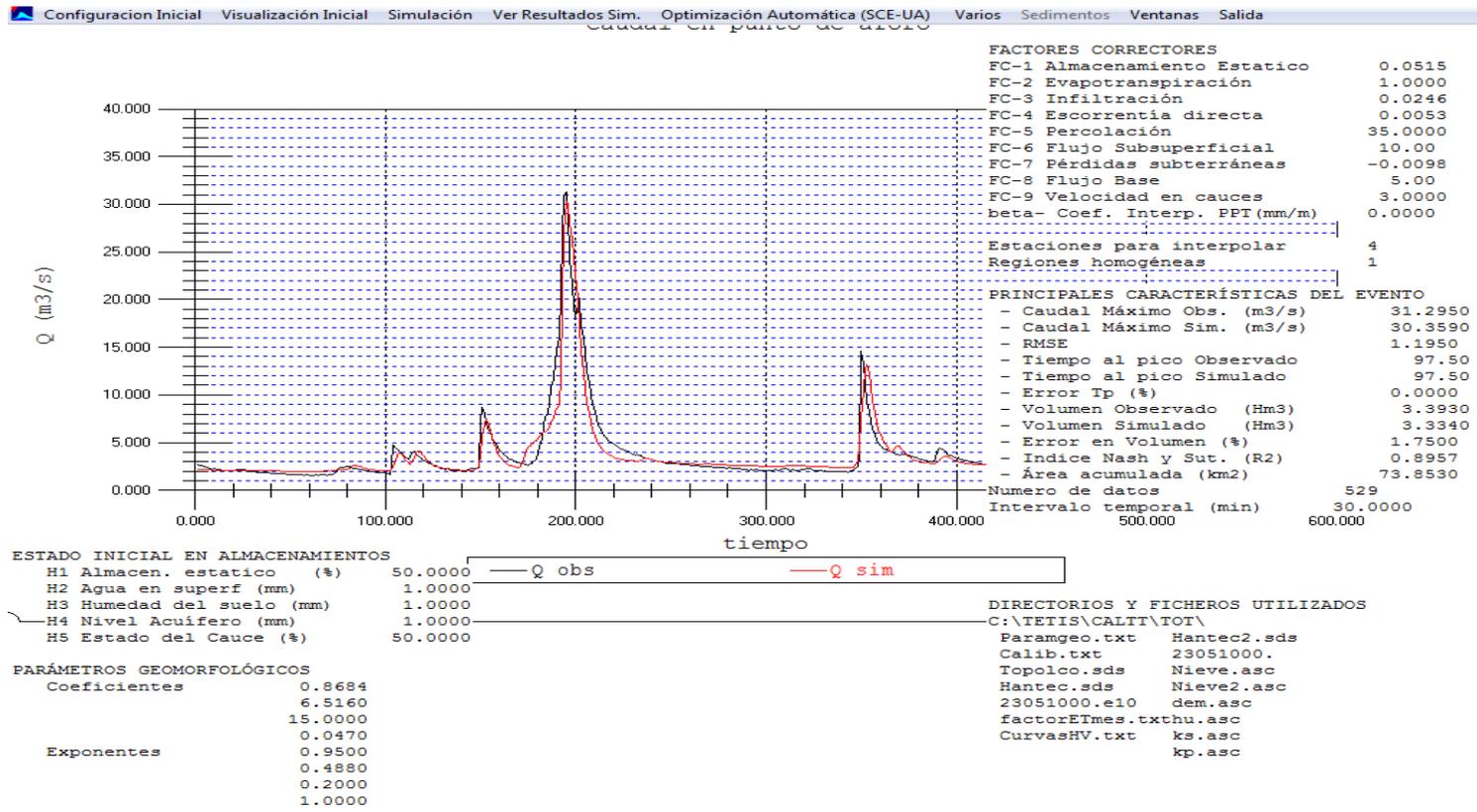


Figura49. Grafica de resultados de validación en el periodo de invierno

**4.4.2. APLICACIÓN DEL MODELO EN OTROS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN;** Partiendo de los resultados generados de la calibración y la validación se proponen dos escenarios extremos de simulación donde se observara la respuesta de la cuenca a un periodo de recesión y a un evento de lluvia extremo.

Para el caso del periodo seco se eliminaron los valores de precipitación a uno de los periodos y se procedió a correr el modelo de forma normal, generando la siguiente grafica de caudal medido en la estación para un periodo de 2 meses.



Figura50. Grafica de resultados de simulación en el periodo de verano extendido.

Esta grafica representa el periodo de recesión de la corriente para este periodo de 60 días.

De igual forma y teniendo en cuenta las características de los eventos medidos dentro de las estaciones localizadas dentro de la cuenca, se estableció un evento probable de lluvia de duración de 6 horas y de

magnitud de 80 mm, que nos estableció la siguiente grafica de respuesta en la estación de aforo.

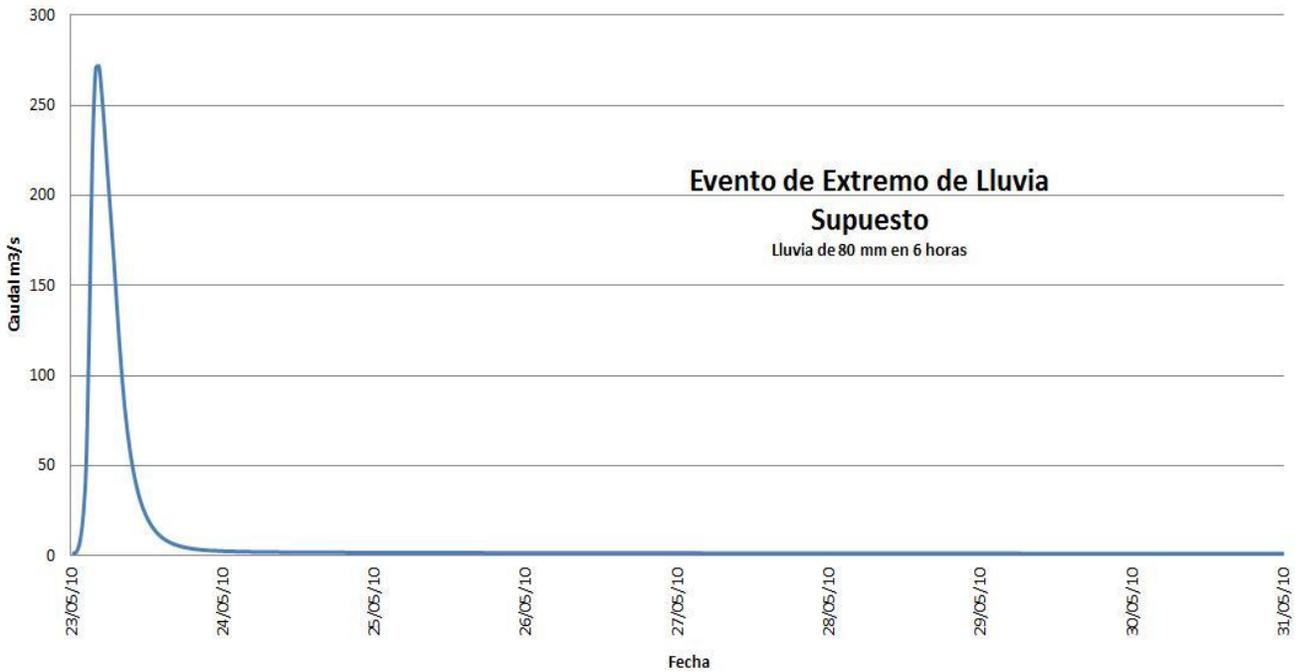


Figura51. Grafica de resultados de simulación en el evento de lluvia.

Para este evento se puede observar la respuesta presentada por la cuenca a un evento de lluvia extremo de 6 horas con un valor máximo al tiempo pico de 271.78 m³/s en 4.5 horas, que corresponde a un evento extremo para un periodo de retorno muy alto.

## **5.1. CONCLUSIONES.**

Finalizada esta investigación, se ha realizado la aplicación del modelo TETIS a un grupo de cuatro periodos, seleccionados especialmente por ser típicos de periodos de invierno y de verano, durante el año 2009 y principios del 2010, con una resolución temporal de 30 minutos, con los cuales se desarrolló el proceso de calibración y posteriormente la validación del modelo, cuyo resultado puede ser implementado para simular eventos extremos de lluvia y de verano.

Se pudo aplicar satisfactoriamente el modelo TETIS a una serie de eventos donde se logra una alta aproximación a los momentos picos de los valores medidos tanto en la calibración como en la validación, siendo muy exactos en el desarrollo del frente de respuesta al evento y que nos genera una confianza muy alta en la aplicación del modelo para dar respuesta a casos que requieran alerta temprana.

El modelo aplicado sobre la CSRO nos permite identificar la distribución del flujo dentro de la fase terrestre del ciclo hidrológico, mostrando comportamientos particulares, de los cuales no se encontraba evidencia probatoria de su existencia. Es el caso de la existencia de aportes de flujo provenientes de otras cuencas que se evidencian en la presencia de un valor negativo del factor de corrección de perdidas, indicando la existencia de aportes de flujo de las cuencas vecinas. En esta investigación no se llegó a confirmar el origen de estos flujos, pero existe la posibilidad de que su procedencia corresponda a flujos subterráneos de la zona de la mesa de Berlín, por la existencia de algunos afloramientos en la parte alta de la cuenca, pero para corroborar estas sospechas, se requiere de otros estudios más específicos, como es el estudio con isotopos y análisis de muestras en la zona.

Dentro del modelo TETIS el valor del factor de corrección al flujo subterráneo, determina la cantidad de flujo que por percolación pasa a ser parte de las pérdidas de flujo subterráneo y no al almacenamiento subterráneo y su signo negativo podría representar la hipótesis de que en el momento de considerarse el estado del tanque subterráneo, además del flujo que viene del tanque subsuperficial también existe un aporte en sentido contrario del flujo de pérdidas, que permite que el flujo base se mantenga por un periodo más largo.

El presente estudio sobre la CSRO, identifico la importancia de contemplar todos los elementos que intervienen en el ciclo hidrológico y principalmente el conocimiento de las características geológicas, litológicas, diaclasas, fracturación y meteorización de la roca, quienes por su distribución espacial y propiedades particulares, muestran una gran participación en los procesos de transporte tanto en el flujo superficial como subsuperficial, identificando zonas de carga y recarga a lo largo de toda la cuenca, principalmente sobre la zona de terreno aluvial y zonas aledañas de la formación Silgara y la Corcova, a lo largo de la parte alta de la falla del río de oro.

El proceso de modelación permitió identificar, que dentro de los diferentes tanques que representan el flujo de la celda en la cuenca, el mayor porcentaje de almacenamiento se da sobre el tanque del flujo base, con valores que alcanzan los 17.5 mm en promedio general en la cuenca y valores puntuales que alcanzan los 32 mm sobre la zona del Rasgón, para la simulación del evento de calibración, luego de 22 horas posteriores al pico máximo medido en la estación de aforo , indicando el grado de importancia que tiene este tanque para la permanencia del caudal en las diferentes corrientes.

Durante el proceso de calibración se determinaron los factores de corrección que permitieron un mejor ajuste, representado en los valores del índice de Nash, error de volumen y RMSE, cuyos valores finales se encuentran dentro

de los límites aceptables recomendados por el modelo. Los resultados del índice de Nash calculados en los diferentes eventos se encontraron con valores mayores a 0.7, los cuales son muy cercanos al valor recomendado de 1.

Se plantearon dos tipos de evento para diferenciar o apreciar el comportamiento de la cuenca en tiempo de verano e invierno, los cuales reflejaron una adecuada respuesta en los diferentes casos, con los mismos factores de calibración, mostrando la conveniencia de utilizar el modelo en periodos de fuertes lluvias y de igual forma para periodos de recesión.

De igual forma se realizó el ejercicio de plantear eventos probables de verano y de fuertes lluvias, los cuales mostraron la aplicabilidad del modelo y la respuesta favorable al comportamiento de la cuenca, ya que con esta aplicación se podrán experimentar cambios y modificaciones posibles en la cuenca que requieran estudio a futuro y que permitirán que el modelo responda adecuadamente para posteriores tomas de decisiones.

Finalmente se puede considerar, que el planteamiento del modelo conceptual representa de manera apropiada la respuesta de la cuenca y se corrobora con los resultados del modelo matemático, que la geología y las características morfológicas forman una parte importante del proceso lluvia escurriente.

Particularmente durante la validación del evento de verano, se presenta un valor de 0.05 en el índice de Nash que; Se tiene que tener en cuenta que en este periodo, los valores del caudal observados, presentan un comportamiento particular dado por las condiciones de lectura del instrumento, afectando el cálculo de este índice, pero se consideró aceptable.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

La aplicación de este tipo de proyectos, abre un abanico de posibilidades de estudio en la región, que se espera aprovechar adecuadamente en otros tipos de investigaciones.

La adquisición de datos para este tipo de proyectos es un aspecto muy importante que se debe complementar mas para desarrollos futuros.

La cantidad, continuidad y mejoramiento de la calidad de la información de las estaciones en la cuenca son aspectos de vital importancia para la aplicación de proyectos similares en la región.

Se logra aplicar este modelo a eventos cuya resolución temporal es de 30 minutos, permitiendo de esta forma disponer de una herramienta que puede ser apropiada para sistemas de alerta temprana o predicciones a corto plazo si se cuenta con una mayor cantidad de equipos de medición en la cuenca.

Para posteriores aplicaciones del modelo se deja abierta la posibilidad de plantear propuestas de investigación que permitan contemplar con mayos certeza el efecto de la variación de la precipitación con la variación de la altura si se contempla un mayor numero de estaciones disponibles y poder determinar su influencia, al igual que queda disponible la posibilidad de estudiar y evaluar zonas de riesgo o vulnerabilidad a deslizamiento, a partir de los resultados de las simulaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell y J. Rasmussen** (1986) An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45 - 59.
- [2]. **Acosta, M.R.** (2006), Aplicación del Modelo Hidrológico Conceptual NAM. Precipitación - Escorrentía en la Cuenca del Río de Oro, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*.
- [3]. **Aguilar, J.J., y Caballero, C.R.,** (2010). Calibración e Instalación de un CTD Diver en la Estación Hidrométrica Automática del Río de Oro. *Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga*.
- [4]. **Amaya, G., Restrepo, C., Vélez, M.V., Vélez, J.I. y Álvarez, O.D.,** (2008). Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño – Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos. Número 19. Octubre de 2008 – Junio de 2009. Páginas 21-38. Medellín. Colombia*.
- [5]. **Arenas, J.P. y J.S. Ruiz** (2005), Estudio de la Variación del Régimen de Lluvias en la Cuenca Superior del Río Lebrija, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*.
- [6]. **Ardila, D.M. y L.C. Calderón** (2006), Generación de Tormenta de Diseño Para las Estaciones Meteorológicas de la Cuenca del Río de Oro, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander*.
- [7]. **Barajas, A.Y., Gómez, A.A.,** (2010). Caracterización Hidrogeológica con Base en Identificación Geomorfológica, Litológica y Estructural en la Cuenca Superior del Río Lato, Piedecuesta, Santander. *Tesis de grado*.

*Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga. Santander. Colombia. 154 páginas.*

- [8]. **Beven, K. J.** (1982) On subsurface stormflow: predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows. *Water Resources Research*, 18(6), 1627 - 1633.
- [9]. **Beven, K. J. y M. Kirkby** (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Bulletin of Hydrological Sciences*, 24 (1), 43 - 69.
- [10]. **Burnash, R. J. C., R. L. Ferral y R. A. McGuire** (1973) A generalized streamflow simulation system - Conceptual modeling for digital computers. U. S. *Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources, March 1973.*
- [11]. **Castellanos, R.L., y Torres D.A.,** (2009). Elaboración de Un Modelo Digital de Elevación y Delimitación del Tipo de Suelo Presente en la Cuenca Superior del Río de Oro. *Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.*
- [12]. **Chow, V. T.** (1959) *Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company. Inc. (5)*
- [13]. **Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays** (1988) *Applied Hydrology. McGraw- Hill Book Company. Inc.*
- [14]. **Chow, V. T.** (1964) *Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill. New York.*
- [15]. **Colegial, J.D., S. Gómez y N. Rojas** (2006), Cartografía Geológica y Caracterización Estructural de la Subcuenca de la Quebrada Río Sucio, Municipio de Tona, Santander, Orientados a Definir un Modelo Hidrogeológico Conceptual, *Boletín de Geología, Vol. 28, No. 2, 49 - 61.*
- [16]. **Coronado, W. & Mejía, C.** (2006) Cartografía geológica y caracterización estructural con fines hidrogeológicos en el sector nor-

oriental de la cuenca del Río de Oro. *Bucaramanga: Tesis de Grado U.I.S.*

- [17]. **Correa, P.L., Vélez, J.I., Smith, R.A., Vélez, A.J., Barrientos, A.E. y Gómez, J.D.**, (2006). Metodología de balance hídrico y de sedimentos como herramienta de apoyo para la gestión integral del complejo lagunar del bajo Sinú. *Avances en Recursos Hidráulicos, Número 14, Octubre de 2006, Paginas 71-86, Medellín, Colombia.*
- [18]. **Díaz W. A. y W. Y. Rincón** (2006) ,Montaje y calibración de una estación hidrométrica automática para medición de niveles en el Río de oro, Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [19]. **Fernández, R. y Francés, F.**, (2010). Modelación Hidrológica Aplicada a la Cuenca del Río Júcar. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre.*
- [20]. **Flórez, W. y Rueda, J.A.**, (2009). Curva de Calibración y Funcionamiento de la Estación Hidrométrica Automática del Río de Oro. *Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.*
- [21]. **Francés, F. y J. Benito** (1995). La modelación distribuida con pocos parámetros. *Ingeniería del Agua, 2(4), 7 - 24.*
- [22]. **Francés, F., Vélez, J.J., Vélez, J.I., y Puricelli, M.**, (2002) Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. *Proceedings Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference. Las Vegas, USA.*
- [23]. **Francés, F., Vélez, J.I. y Vélez, J.J.**, (2007) Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology, 332, pp 226-240.*
- [24]. **García S.F. y J.D.Otero** (2005), Estimación de la Evapotranspiración Real en la Cuenca Superior del Río Lebrija, *Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*

- [25]. **Gómez, E. y C.A. López** (2005), Estimación de la Recarga Mensual en la Parte Alta de la Cuenca del Río Frio Por Medio de un Modelo Hidrológico Distribuido, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander.*
- [26]. **González N.A. y L.C. Sossa**(2005), Eventos Extremos de Precipitación: Caso de Estudio Febrero 12-05 Girón, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.*
- [27]. **Guzman, J.A.**(2003), Runoff Process Simulation in the Hillslope Catchment of Terzierbeek, Limburg, *Master of Science Thesis, International Institute for Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering, IHE, Delft, The Netherlands.*
- [28]. **Guzmán, J.A., A. Anaya. E. Niño. S. Gómez. y J.D. Colegial.**, 2005; Cuenca Experimental del Río Sucio Municipio de Tona. *Informe Técnico. Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.*
- [29]. **Guzmán, J.A., S. Gómez, E. Niño y A. Anaya** (2008), Modelo Hidrológicos en la Cuenca Experimental de Río Sucio, Municipio de Tona, Santander, *Revista UIS Ingenierías, vol. 7 # 1 págs. 23-39, Bucaramanga.*
- [30]. **Hernández, L.I. y D.A. Saltarín** (2007), Montaje, Operación y Calibración de la estación Hidrométrica Automática Para Medición de Niveles en el Río de Oro, Estación Conquistador Alto, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander.*
- [31]. **Hydrologic Engineering Center** (1990) HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual, Computer Program Document No. 1 A.
- [32]. **Hydrologic Engineering Center** (2000) HEC-HMS Technical Reference Manual. *Documento en Internet:*  
[http://www.hec.usace.army.mil/publications/pubs\\_distrib/hechms/technical/technical.html](http://www.hec.usace.army.mil/publications/pubs_distrib/hechms/technical/technical.html)

- [33]. **Jaramillo M.**(2003), Estudio de la Interacción Acuífero-Río Como Soporte Metodológico en la Estimación de Caudales Mínimos, *Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.*
- [34]. **López W.G. y R.M. Osorio** (2005), Modelo Digital de Elevación para la Cuenca del Río de Oro, *Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.*
- [35]. **Montoya, J.J., Vélez, J.J., Francés, F.,** (2004). Desarrollo del Módulo Geomorfológico Para el Modelo Hidrológico Distribuido TETIS. *Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia. España. 77 páginas.*
- [36]. **Orozco, I., Francés, F., López, J. y Barrios, M.I.,** (2010). Modelación Hidrológica Distribuida en Cuencas de Alta Montaña Utilizando el Modelo TETIS. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre.*
- [37]. **Osorio, L. & Salazar, O.** (2006) Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca del Río Tona, macizo de Santander, con fines hidrogeológicos. *Bucaramanga: Tesis de Grado U.I.S*
- [38]. **Puricelli, M.,** (2003). Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente 436p.*
- [39]. **Salazar, J.L., y Quitian, D. O.,** (2009). Elaboración de Un Modelo Digital de Elevación y Delimitación del Tipo de Vegetación Presente en la Cuenca Superior del Río de Oro. *Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.*
- [40]. **Serrano, A.M., y Balaguera, G.,** (2006). Separación de Flujo Base en la Estacion Café Madrid (C.S.R.L.). *Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.*

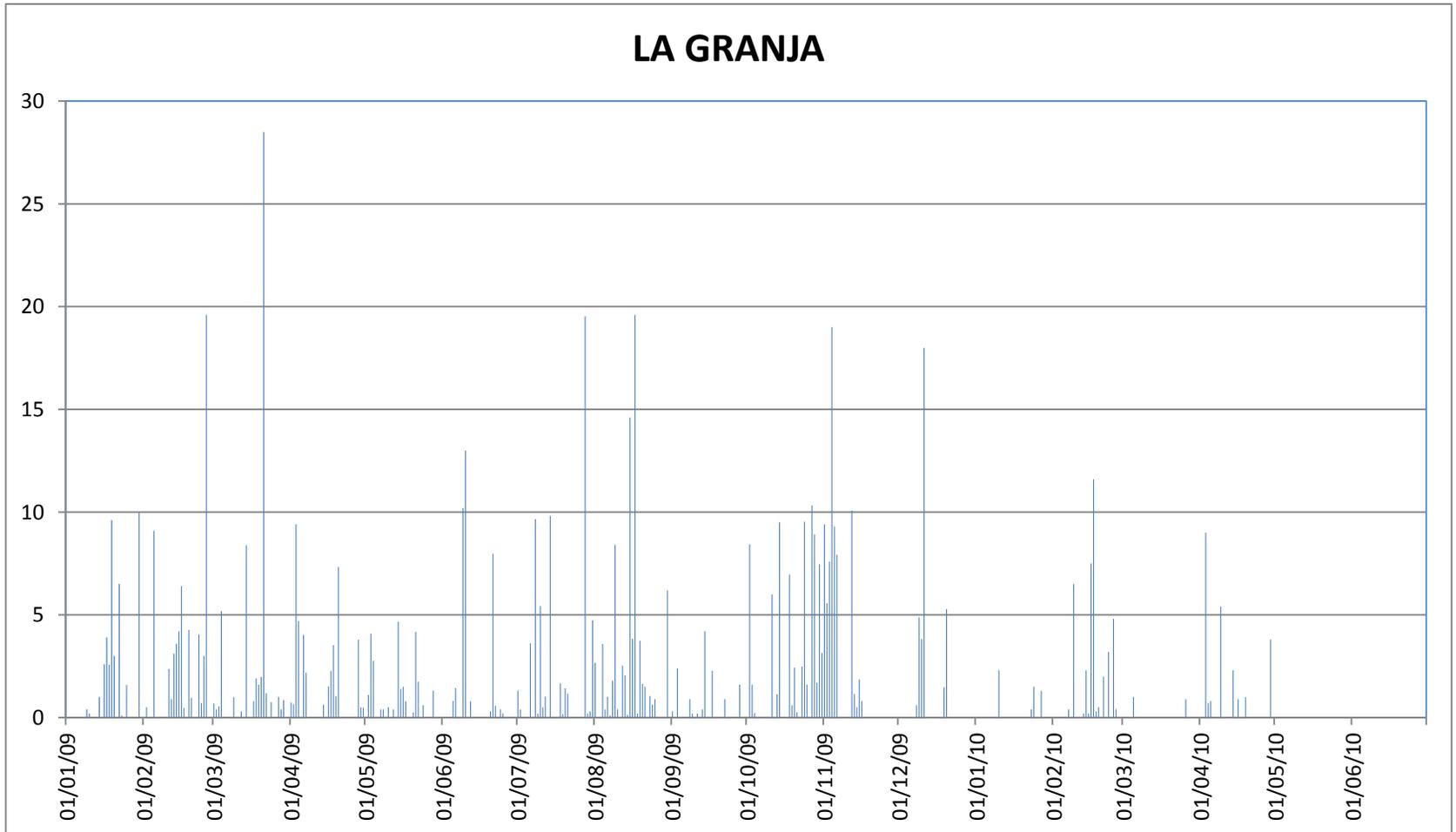
- [41]. **Singh, V. P.** (1988) Hydrologic Systems, Vol. 1. Rainfall-Runoff Modeling. *Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.*
- [42]. **Soil Conservation Service** (1972) Hydrology. National Engineering Handbook. Section 4, *U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.*
- [43]. **Soil Conservation Service** (1986) Urban Hydrology for Small Watersheds, *U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, Technical Release 55, June 1986.*
- [44]. **Ulloa, A. M. & Gómez, S.** (2007). Proyecto de investigación, Geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander. *Bucaramanga: INGEOMINAS. U.I.S.*
- [45]. **Va ková, I., Francés, F. y Vélez, J.J.,** (2004). Empleo de la modelación distribuida en el estudio de los recursos hídricos del País Vasco. *Proceedings 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz, Portugal. Febrero 3-7.*
- [46]. **Valencia, M.,** (2008) Modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual como elemento para ordenación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas. Caso de estudio: Cuenca Hidrográfica del río la Miel, Caldas, Colombia. *Tesis. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.*
- [47]. **Vélez, J.I.** 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. *PhD. Dissertation. Universidad Politécnica de Valencia. 266p.*
- [48]. **Vélez, J.I., Restrepo, C. y Correa, P.L.,** (2010). Aplicaciones de un Modelo Hidrológico Agregado en Colombia. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre.*
- [49]. **Vélez, J.I., Vélez, J.J. y Francés, F.,** (2002). Modelo distribuido para simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas. *Proceedings XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.*

- [50]. **Vélez, J. J.**, (2003). Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas. *Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.*
- [51]. **Vélez, J.J. y Francés, F.**, (2004). Sensibility analysis of a conceptual distributed model during flood events. *In Proceedings I General Assembly European Geosciences Union. Nice France. Abril 26-30. Ed. Geophysical research Abstracts. CD Format.*
- [52]. **Vélez J.J., Francés, F.**, (2008), Calibración automática de las condiciones iniciales de humedad para mejorar la predicción de eventos de crecida, *Avances en Recursos Hidráulicos, Numero 18, Octubre de 2008, Paginas 25-35 Medellín Colombia.*
- [53]. **Vélez, J.J., Lopez Unzu, F., Puricelli, M. y Francés, F.**, (2008). Parameter extrapolation to ungauged basing with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences, In press. www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/909/2007*
- [54]. **Vélez, J.J., Vélez, J.I. y Francés, F.**, (2002). Simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas mediante el uso de la modelación distribuida. *Proceedings 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Ed. UPV. Valencia, España. Febrero 7- 8, pp. 1682 – 1687.*
- [55]. **Vélez, J.J., Vélez, J.I., Puricelli, M. y Francés, F.**, (2002.). Hydrologica simulation of flood events at large basins using deistributed modelling. *Proceedings XXVII general Assembly Europeasn Geophysical Society. Niza, Francia. Abril 21- 26. Ed Geophysical Research Abstracts. Poster.*
- [56]. **Ward, D, et al**, (1997). Geología de los cuadrantes H12 Bucaramanga. *Ingeominas Boletín Geológico Vol. XX N. 13.*

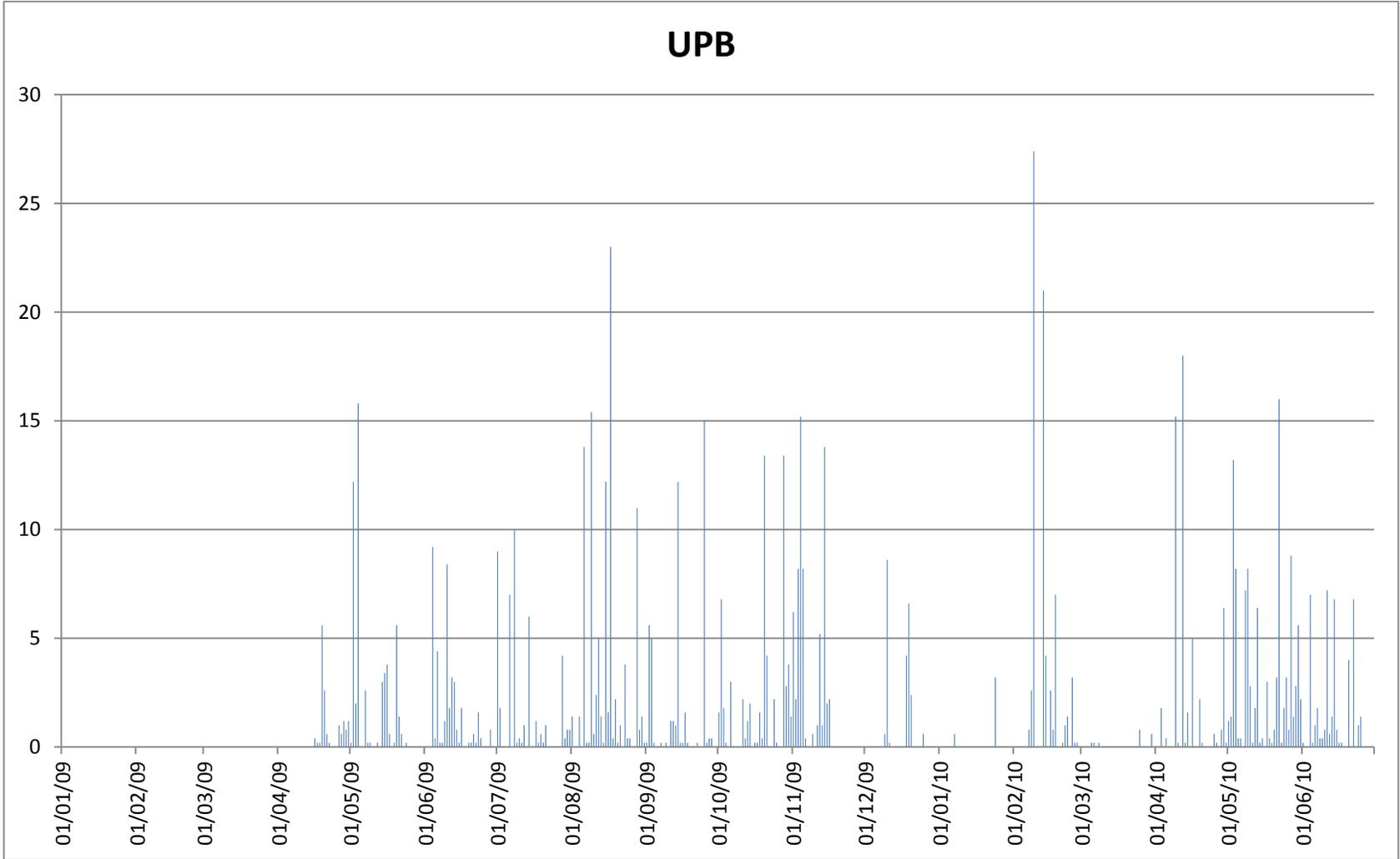
[57]. \***CDMB** (2008). Plan de Ordenación y Manejo Ambiental Subcuenca Río de Oro. Grupo de Planificación, Ordenamiento Ambiental Territorial POAT. *Documento técnico de soporte. Bucaramanga, Febrero de 2008.*

## **ANEXOS**

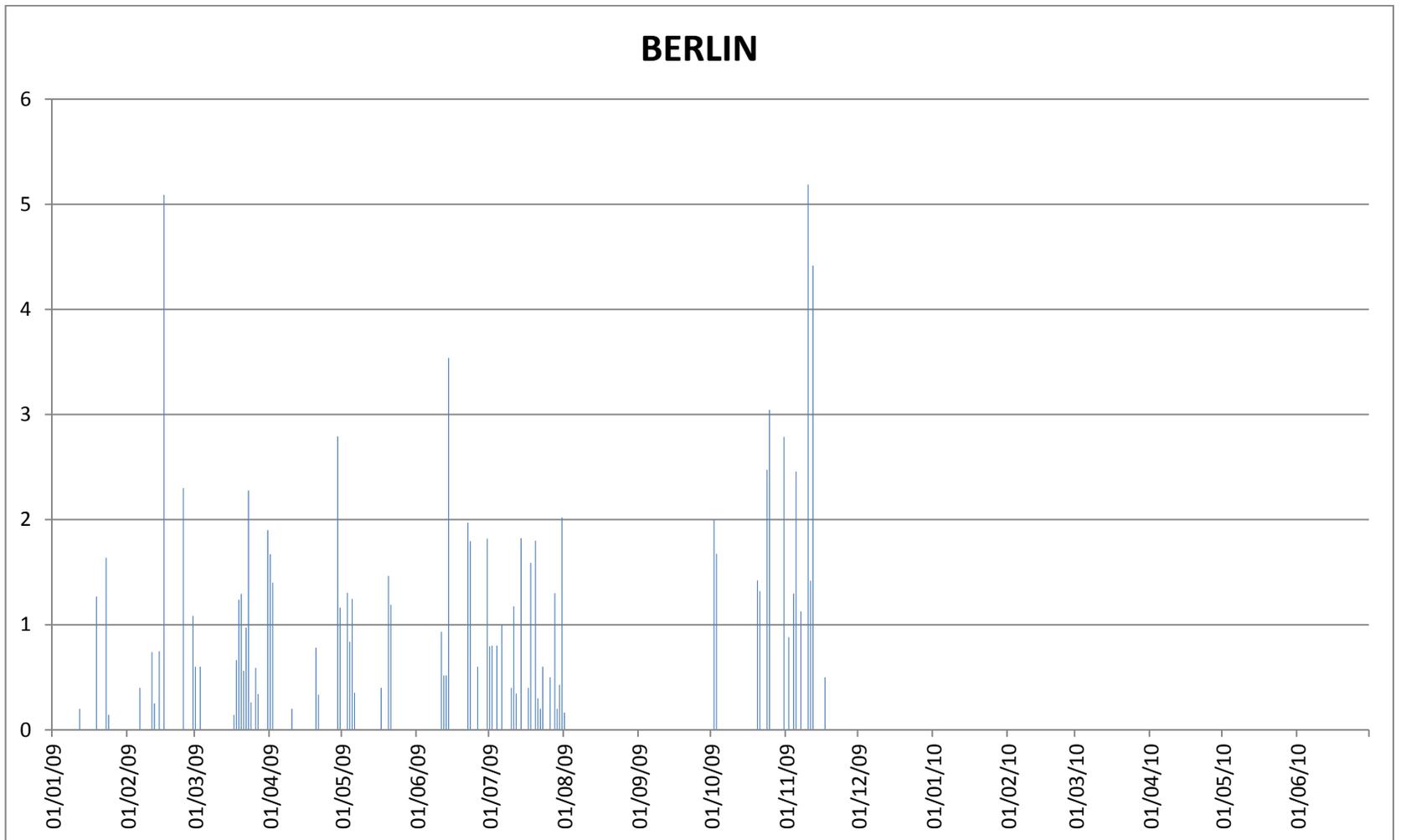
Anexo 1 Grafica de Datos de estaciones:



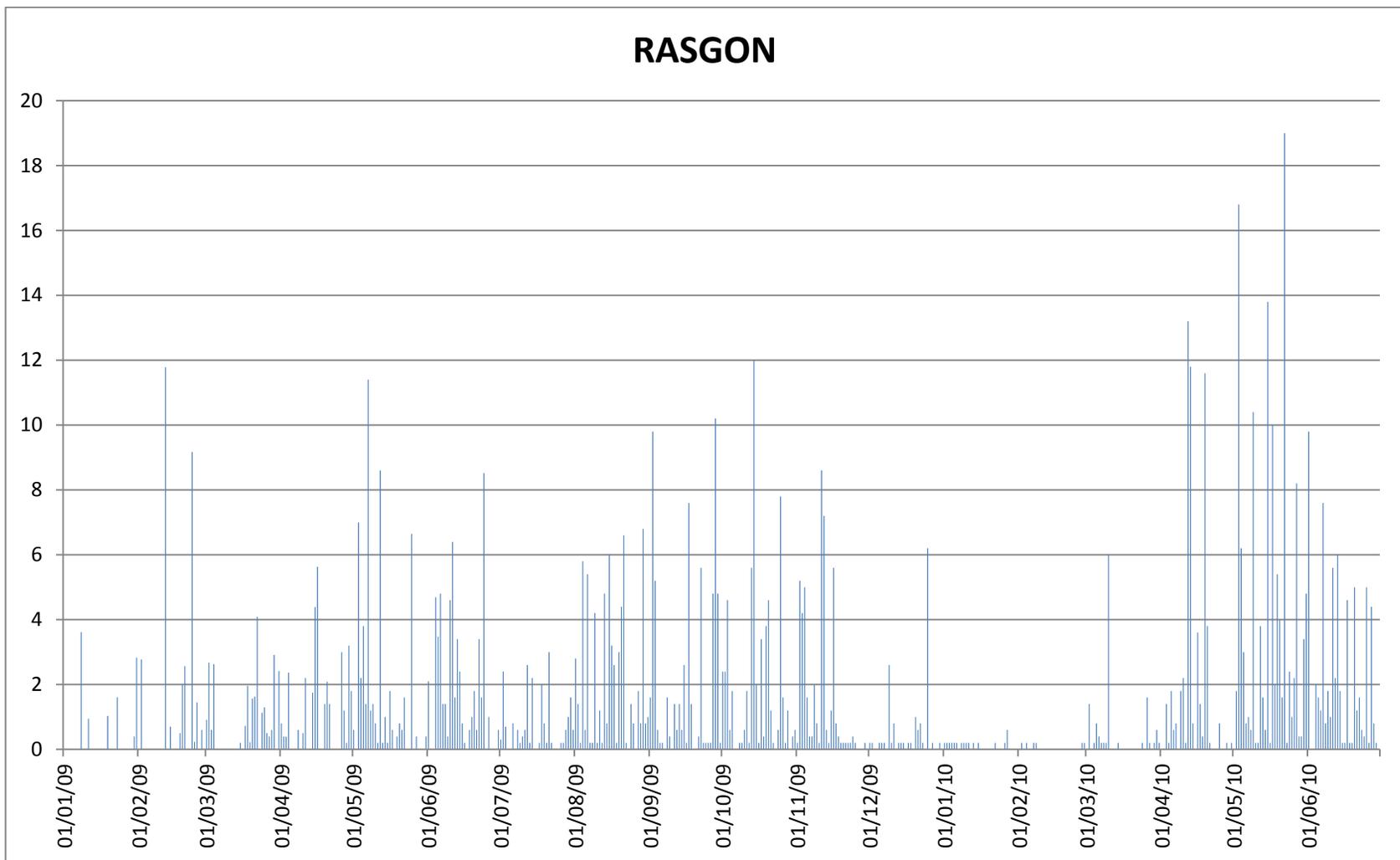
Grafica de datos de precipitación estación la Granja (resolución temporal 30 minutos).



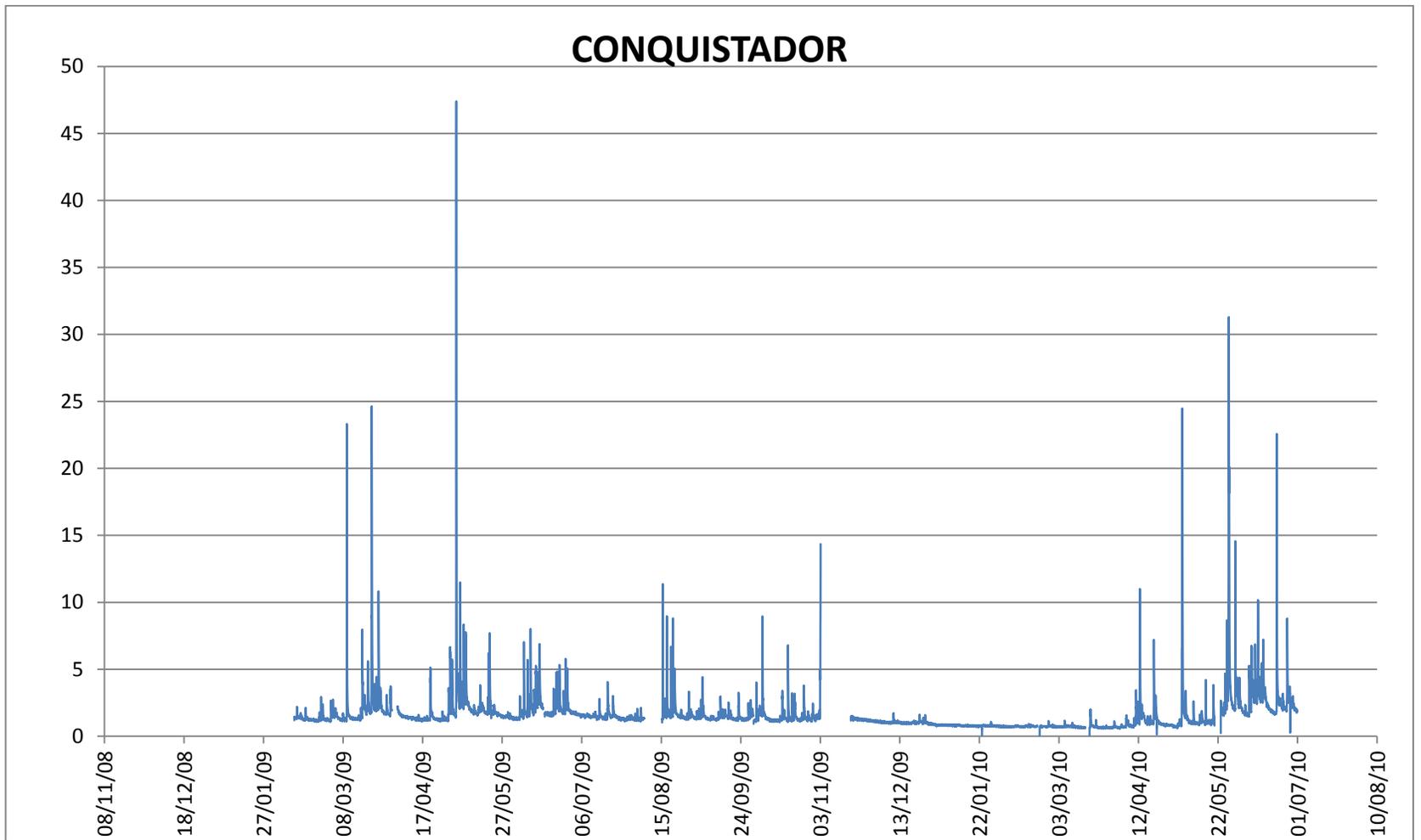
Grafica de datos de precipitación estación automática UPB (resolución temporal 30 minutos).



Grafica de datos de precipitación estación Berlín (resolución temporal 30 minutos).

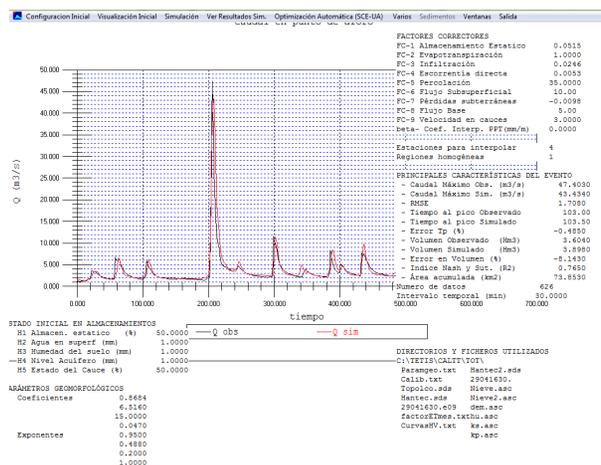


Grafica de datos de precipitación estación automática Rasgón (resolución temporal 30 minutos).

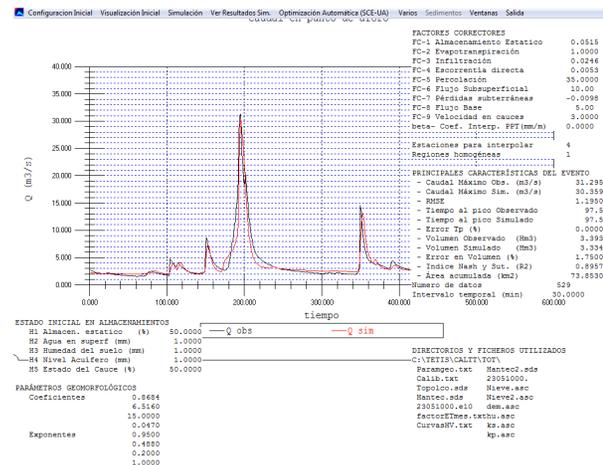


Grafica de datos de caudal medidos en la estación Conquistador (resolución temporal cada 30 minutos).

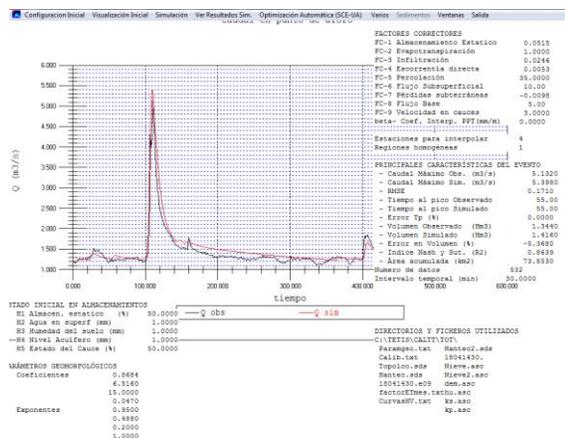
## Anexo 2 Graficas de resultados de calibración y validación



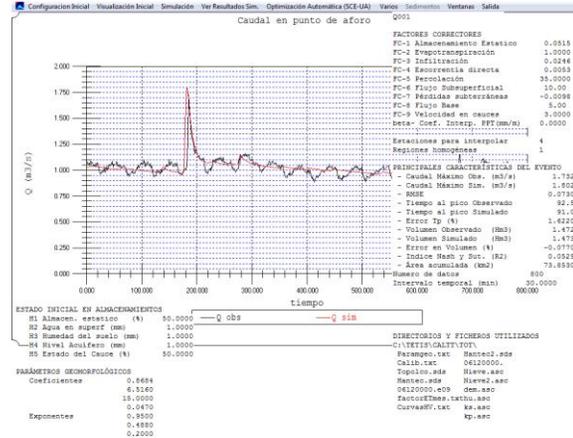
Evento de calibración invierno.



Evento de validación invierno.

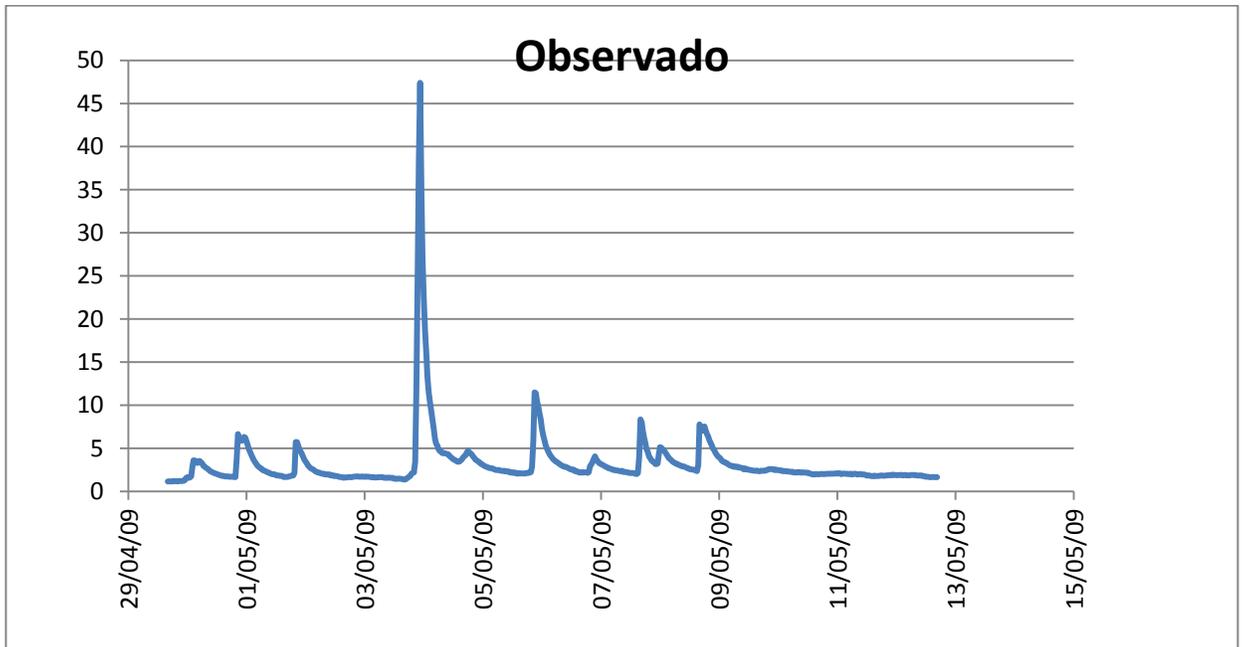


Evento de calibración verano.

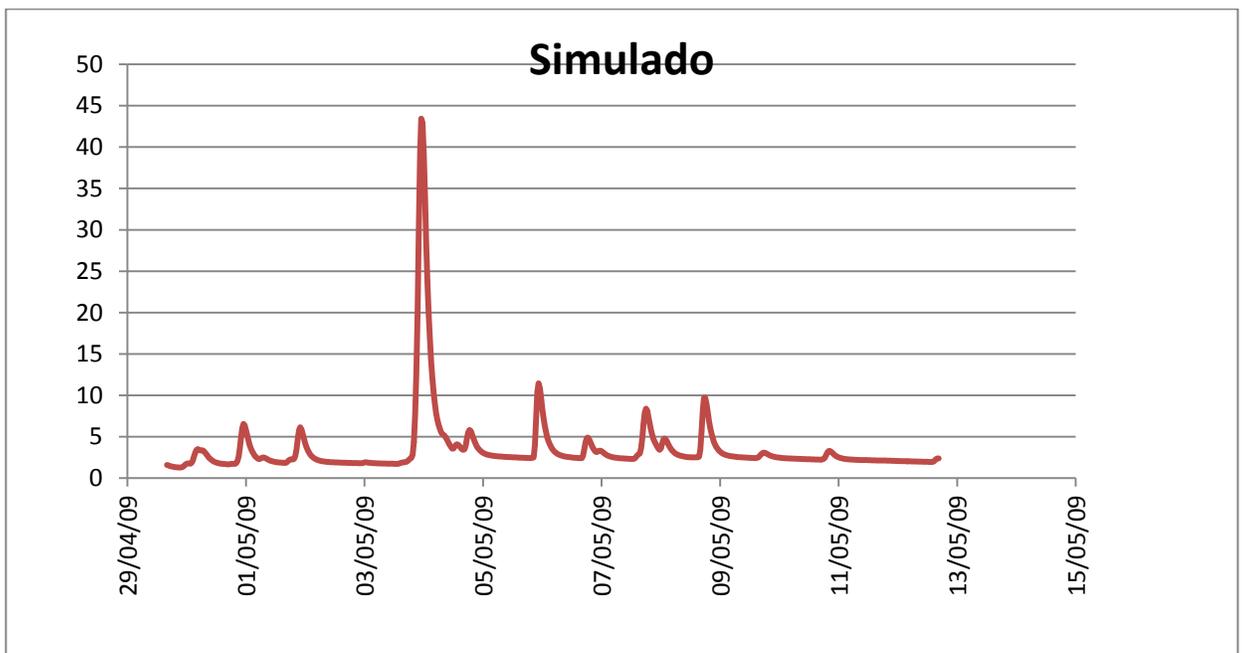


Evento de validación verano

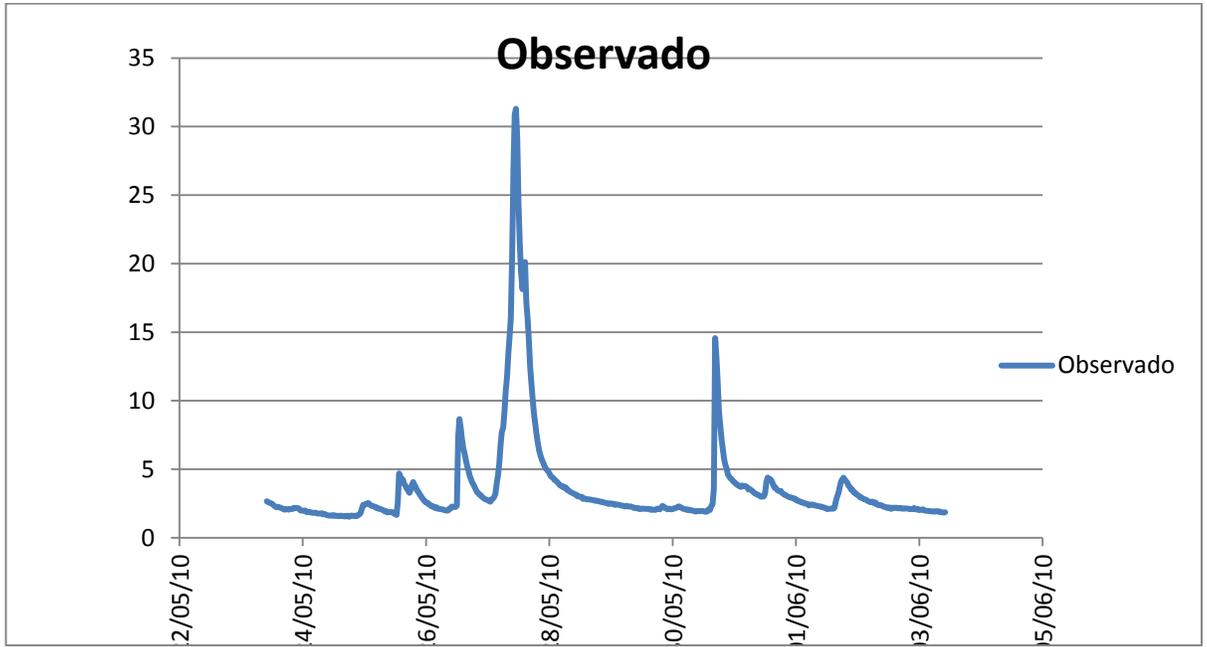
### Anexo 3 Graficas finales del evento observado y simulado.



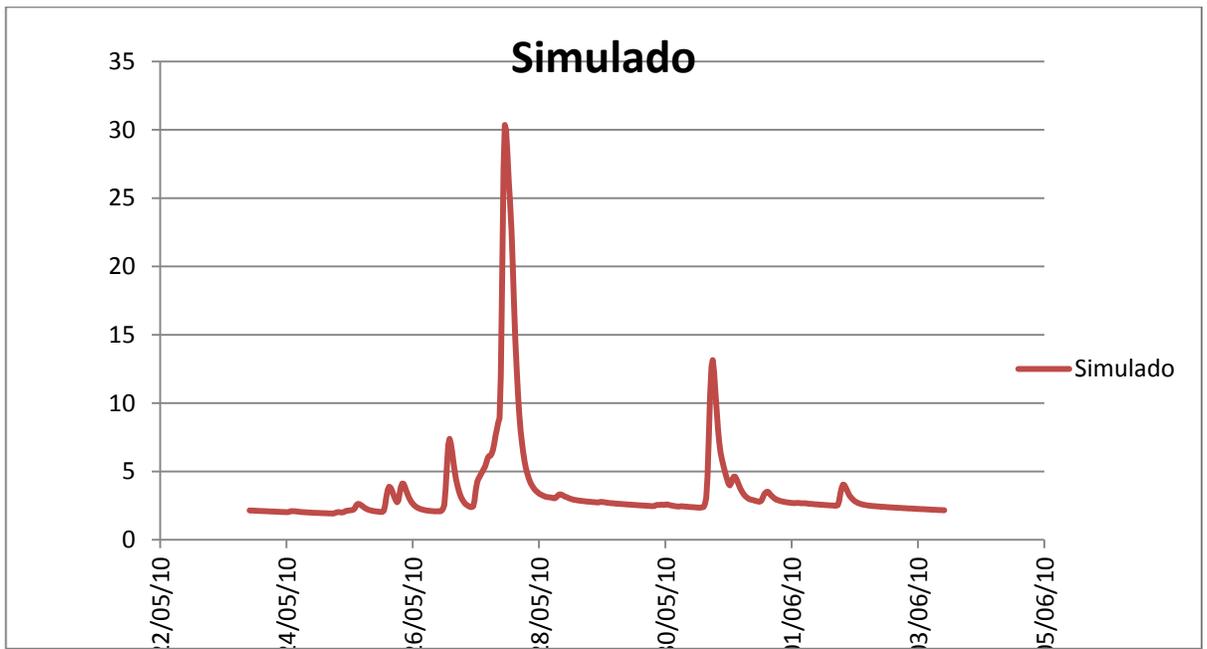
Evento de calibración de invierno observado.



Evento de calibración de invierno simulado.



Evento de validación de invierno observado.



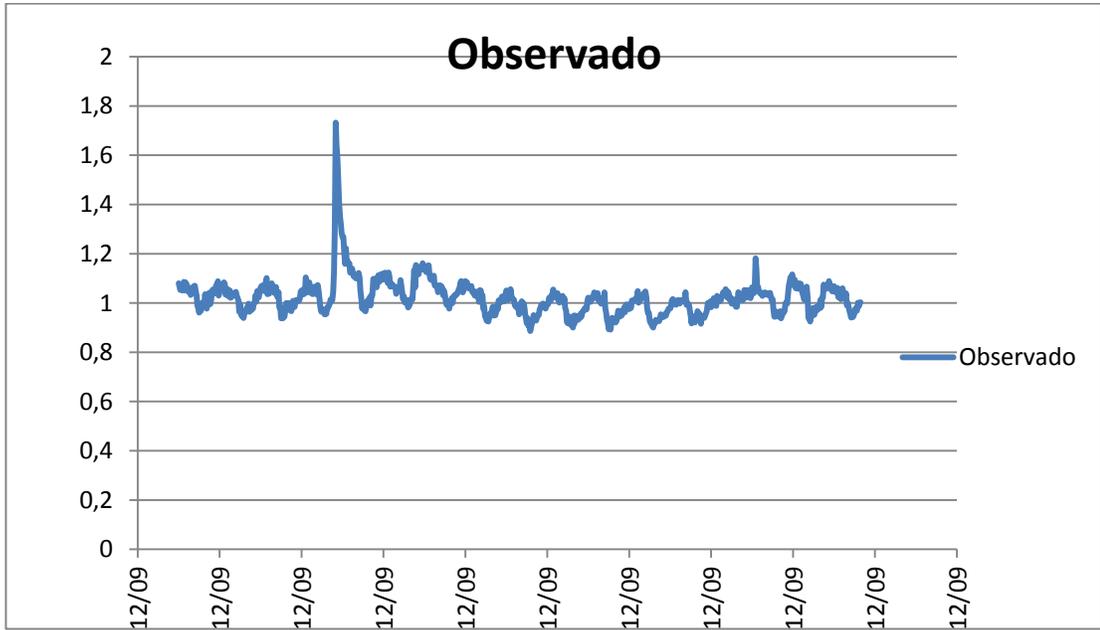
Evento de validación de invierno simulado.



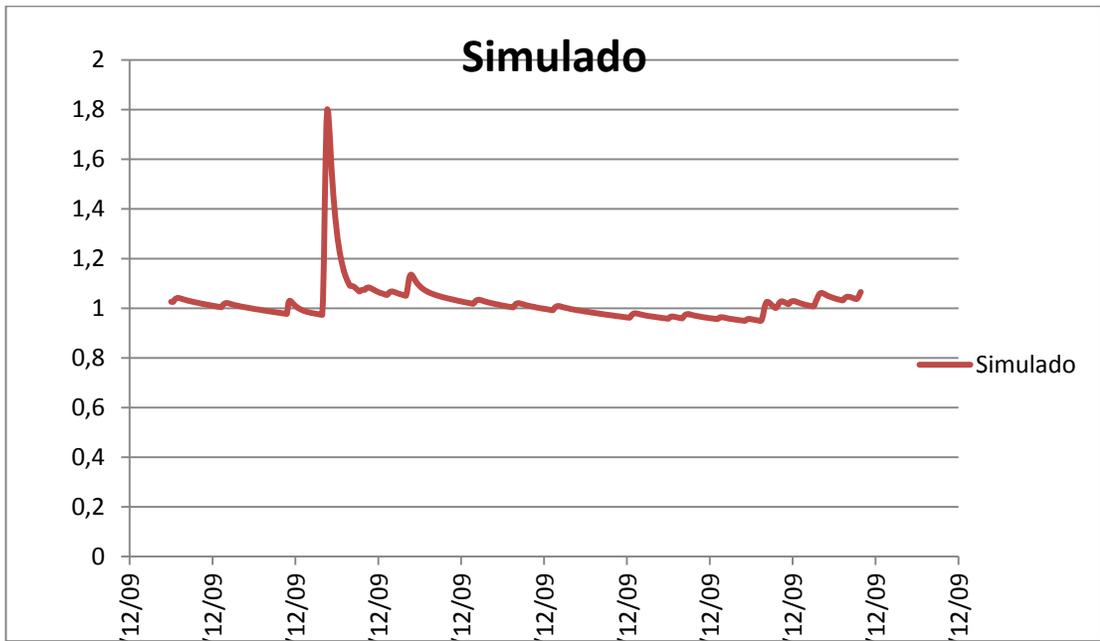
Evento de calibración de verano observado.



Evento de calibración de verano simulado.



Evento de validación de verano observado.



Evento de validación de verano simulado.