

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
-CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA-

PRÁCTICA SUPERVISADA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO HIDROLÓGICO EN CUENCAS DE LOS DEPARTAMENTOS
AMBATO Y POMÁN EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA.**



Autor: Decouvette, Esteban Alejandro

Tutor: Dr. Ing. Herrero, Horacio

Supervisor externo: Ing. Vaschalde, Tomás

Córdoba 2015.



Agradecimientos

... a mi familia que me acompañó y apoyó en cada instante, brindándome todo su cariño en cada paso dado.

...a mis amigos, todos... los del CUP, los de Ovej, de Los Josefinos y Centro Manresa, los de la facu y los de la vida; por tantos momentos compartidos y por ser una parte importantísima de mi vida.

...a Tomás que me guió a lo largo de toda mi práctica, aguantándome y estando siempre dispuesto a darme una mano. A Nico y Horacio por toda la ayuda prestada en el desarrollo y revisión de la PS y el informe.

...a Marcelo por haberme brindado el espacio para poder realizar mi práctica supervisada y a todos en el laboratorio por formar un excelente ambiente de trabajo.

...a todos mis profesores, que de una u otra manera han formado parte de esta experiencia universitaria.

...a Dios que me regaló el encuentro con todas estas personas, experiencias vividas a lo largo de todos estos años y tantas cosas más.





Título: Estudio Hidrológico en cuencas de los Departamentos Ambato y Pomán en la Provincia de Catamarca.

Nombre: Decouvette, Esteban Alejandro

Matrícula: 34777978

Plan: 2005

Palabras claves: Infiltración, Escurrimiento, Hidrología, Modelación, Tránsito, Caudal.

Resumen

El estudio hidrológico presentado en este informe, se encuentra dentro del marco del proyecto “*Estudio integral para establecer acciones de planificación contra amenazas por inundaciones en las localidades del El Rodeo –Dpto. Ambato-, Saujil y Siján – Dpto. Pomán- Provincia de Catamarca*” licitado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca y desarrollado por el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (C.E.T.A) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las tres localidades mencionadas anteriormente se encuentran al pie de la sierra de Ambato. La localidad de El Rodeo está ubicada sobre el lado oriental, mientras que Siján y Saujil sobre el lado occidental. Cuando se producen precipitaciones de gran intensidad en la cuenca alta, existe una alta tendencia a la generación de crecientes repentinas de gran magnitud, las cuales arrastran gran cantidad de sedimentos y material rocoso, constituyendo un riesgo para los asentamientos urbanos.

En el presente trabajo describe en detalle el análisis de la información antecedente recopilada como así también la modelación hidrológica de los ríos de las localidades de El Rodeo- Dpto. Ambato-, Siján y Saujil- Dpto. Pomán- de la Provincia de Catamarca, validada a través de una regionalización de caudales previa, con el fin de determinar los caudales de diseño para distintos tiempos de retorno.

Los resultados obtenidos en este trabajo servirán como datos de entrada para la modelación hidráulica, y de esta manera poder obtener mapas de inundación, así como identificar potenciales escurrimientos en los cursos de agua actualmente inactivos, y de esta manera brindar soluciones.



Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | CAPITULO 1.- Marco referencial del trabajo | 14 |
| 1.1 | Introducción | 14 |
| 1.2 | Objetivos | 15 |
| 1.2.1 | Objetivo General del proyecto de la Práctica Supervisada | 15 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos del proyecto de la Práctica Supervisada..... | 15 |
| 1.2.3 | Objetivos particulares de la Práctica Supervisada | 15 |
| 2 | CAPITULO 2.- Recopilación de antecedentes | 17 |
| 2.1 | Introducción | 17 |
| 2.2 | Ubicación de las localidades de interés | 17 |
| 2.2.1 | El Rodeo..... | 17 |
| 2.2.2 | Siján | 18 |
| 2.2.3 | Saujil | 19 |
| 2.3 | Información relevada | 20 |
| 2.4 | Análisis detallado de estudios previos | 23 |
| 2.4.1 | Desarrollo del informe: Regionalización de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en la provincia de Catamarca | 23 |
| 2.4.2 | Desarrollo del informe: Delimitación de áreas de riesgo hídrico en El Rodeo –Dpto. Ambato- Catamarca. | 24 |
| 2.4.3 | Desarrollo del informe: Invitación para evaluar preliminarmente in-situ la situación de amenaza y riesgo que enfrenta la población de El Rodeo | 29 |
| 2.4.4 | Desarrollo del Informe: Informe preliminar sobre los aluviones ocurridos el 23 de Enero 2014 en las ciudades catamarqueñas de El Rodeo y Siján. | 29 |
| 2.4.5 | Desarrollo del Archivo del diario local, El Ancasti | 31 |
| 2.4.6 | Desarrollo de la información provista por Vialidad Provincial de Catamarca..... | 33 |
| 2.4.7 | Desarrollo de la Cartografía de la base de Instituto Geográfico Nacional- República Argentina-..... | 36 |
| 2.5 | Visitas de reconocimiento | 36 |
| 2.5.1 | Reuniones realizadas..... | 37 |



| | | |
|-------|--|----|
| 2.5.2 | Visitas de reconocimiento..... | 37 |
| 2.6 | Definición de áreas de vacancia en relación a aspectos hidrológicos..... | 53 |
| 2.7 | Metodología para la modelación hidrológica | 54 |
| 2.7.1 | Herramientas informáticas específicas | 55 |
| 3 | CAPITULO 3.- Delimitación de las cuencas de estudio | 58 |
| 3.1 | Introducción | 58 |
| 3.2 | Modelo Digital de Elevaciones | 58 |
| 3.3 | Delimitación de cuencas y sub-cuencas..... | 59 |
| 3.4 | Parámetros de las sub-cuencas..... | 59 |
| 3.5 | Suelo y Vegetación | 63 |
| 4 | CAPITULO 4.- Regionalización de caudales | 65 |
| 4.1 | Introducción | 65 |
| 4.2 | Análisis estadístico sobre estación de aforo Andalgalá | 65 |
| 4.2.1 | Procesamiento de datos..... | 67 |
| 4.2.2 | Resultados de análisis estadístico | 68 |
| 4.3 | Resultados de la regionalización | 69 |
| 5 | CAPITULO 5.- Parámetros hidrológicos básicos | 72 |
| 5.1 | Introducción | 72 |
| 5.2 | Método de las abstracciones del SCS..... | 72 |
| 5.3 | Tiempo de concentración (tc) | 73 |
| 5.4 | Tiempo de retardo (tr) | 76 |
| 5.5 | Lluvia de diseño..... | 77 |
| 5.5.1 | Láminas de precipitación..... | 77 |
| 5.5.2 | Distribución temporal | 78 |
| 5.5.3 | Distribución espacial | 80 |
| 5.5.4 | Duración de la lluvia | 80 |
| 5.6 | Número de Curva (CN) | 81 |
| 5.6.1 | Condiciones de humedad..... | 82 |



| | | |
|-------|---|-----|
| 5.6.2 | Cálculo del NDVI | 86 |
| 5.6.3 | Tipo de suelo y cálculo de CN..... | 88 |
| 5.7 | Infiltración inicial (Ia)..... | 92 |
| 5.8 | Métodos de tránsito de caudales..... | 93 |
| 5.8.1 | Muskingum..... | 93 |
| 5.8.2 | Muskingum- Cunge | 95 |
| 5.8.3 | Kinematic wave | 95 |
| 5.8.4 | Tlag | 95 |
| 5.8.5 | Elección del método..... | 96 |
| 6 | CAPITULO 6.- Modelación Hidrológica..... | 100 |
| 6.1 | Introducción | 100 |
| 6.2 | Método del Hidrograma Unitario..... | 100 |
| 6.3 | Escenarios de simulación | 100 |
| 6.4 | Análisis de Resultados | 101 |
| 7 | CAPITULO 7.- Conclusiones | 111 |
| 7.1 | Sobre el proyecto | 111 |
| 7.2 | Sobre la experiencia de la práctica supervisada | 111 |
| 8 | Anexo..... | 114 |
| 8.1 | Modelizaciones..... | 114 |
| 8.1.1 | Río Seco | 114 |
| 8.1.2 | Río Saujil | 114 |
| 8.1.3 | Río Siján | 115 |
| 9 | Bibliografía | 117 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de la localidad de El Rodeo..... | 17 |
| Figura 2. Ríos de la localidad de El Rodeo (imagen extraída de Google Earth) | 17 |
| Figura 3. Ubicación de la localidad de Siján | 18 |
| Figura 4. Localidad de Siján (imagen extraída de Google Earth)..... | 18 |
| Figura 5. Ubicación de la localidad de Saujil | 19 |
| Figura 6. Localidad de Saujil (imagen extraída de Google Earth)..... | 19 |
| Figura 7. Distribución temporal de información pluviográfica del SMN..... | 24 |
| Figura 8. Distribución temporal de información DHyERH + estación Aero SMN | 25 |
| Figura 9. Delimitación de las zonas más afectadas (con líneas amarillas) por los flujos de detritos y ubicación de la alcantarilla, los puentes y el badén en color rojo. En azul cauce del río Ambato que cruza la ciudad de El Rodeo. Imagen spot 5, provista por la CONAE y procesada por el SEGEMAR 30 | |
| Figura 10. Área urbana y cultivos afectados por el flujo de detritos en color rojo; las antiguas defensas en color naranja y en color violeta la nueva. En color azul se marca el cauce del río Siján antes del evento del 23 de Enero 2.014 | 31 |
| Figura 11. Puente mencionado en la nota. Fuente: http://3.bp.blogspot.com/-McTZilZ9FNM/UwGa9Wz960I/AAAAAAAAAGZw/P36bXke9sRM/s1600/Tragedia+Desastre+Alud+en+El+Rodeo+Creciente+Rio+Ambato+Catamarca+Argentina+Mountains+river(33).jpg . (visto Enero 2.015) | 33 |
| Figura 12. Localización en planta de obras de arte, identificadas sobre el cauce del río Ambato .. | 37 |
| Figura 13. Estructura 1: Puente próximo a la policía. Vista hacia aguas abajo (izq.). Vista hacia aguas arriba (der.) | 38 |
| Figura 14. Defensa de gavión realizado aguas abajo del puente próximo a la policía | 39 |
| Figura 15. Vista del cauce de Ambato, aguas debajo de antiguo puente arco, próximo a la farmacia | 39 |
| Figura 16. Vista cauce Ambato, aguas abajo de puente próximo al mástil (Estructura 2) | 40 |
| Figura 17. Vista cauce Ambato, aguas arriba del puente de ruta 4 (Estructura 3) | 40 |
| Figura 18. Carteles en zona del mástil, advierten posible vía de escurrimiento en caso de crecidas | 41 |
| Figura 19. Carteles sobre puente próximo al mástil y a puente de ruta 4 sobre río Ambato (Estructura 3), advierten potencial zona de inundación ante crecidas | 41 |
| Figura 20. Cartel en zona próxima a plaza de los niños, advierte zona de riesgo ante crecida | 42 |
| Figura 21. Cartel en zona del ex-camping municipal, prohíbe acampar | 42 |
| Figura 22. Cartel en calle dirección al ex-camping municipal, advierte posible vía escurrimiento en caso de crecidas | 43 |



| | |
|--|----|
| Figura 23. Crecida río Ambato, vista aguas arriba, sobre el puente de la ruta 4..... | 43 |
| Figura 24. Crecida río Los Nogales, vista aguas arriba sobre el puente de ruta 4 | 44 |
| Figura 25. Localización en planta de las estructuras visitadas sobre el río Los Nogales..... | 45 |
| Figura 26. Estructura 1: Puente próximo a hostería Chicha (vista hacia aguas arriba)..... | 45 |
| Figura 27. Protección márgenes aguas abajo de puente próximo a hostería Chicha (Estructura 1) | 46 |
| Figura 28. Protección de márgenes aguas abajo de puente próximos a hostería Chicha (Estructura 1) | 46 |
| Figura 29. Estructura 2: Puente frente a juzgado de paz (vista hacia aguas arriba) | 47 |
| Figura 30. Protección de margen aguas debajo de puente frente a juzgado de paz (Estructura 2) | 47 |
| Figura 31. Estructura 3: Puente próximo a Iglesia de la Candelaria (vista hacia aguas arriba)..... | 48 |
| Figura 32. Protección de márgenes aguas arriba del puente próximo a Iglesia de la Candelaria (Estructura 3)..... | 48 |
| Figura 33. Estructura 4: Puente de ruta 4 sobre río Los Nogales (vista hacia aguas arriba)..... | 49 |
| Figura 34. Localización en planta de estructuras visitadas sobre el río Seco..... | 49 |
| Figura 35. Estructura 1: Vado camino a polideportivo (sentido de escurrimiento derecha – izquierda)..... | 50 |
| Figura 36. Cauce río Seco, aguas arriba de vado camino a polideportivo (Estructura 1). | 50 |
| Figura 37. Estructura 2: Alcantarilla faldeo al Cristo (vista desde aguas arriba)..... | 51 |
| Figura 38. Protección de margenes aguas abajo de alcantarilla faldeo al Cristo (Estructura 2)..... | 51 |
| Figura 39. Cauce río Seco, aguas abajo de alcantarilla faldeo al Cristo (Estructura 2) | 52 |
| Figura 40. Cauce río Seco, al ingreso de El Rodeo (vista aguas arriba) | 52 |
| Figura 41. Vista aguas arriba cauce río Los Nogales en puente próximo a Iglesia de la Candelaria (Estructura 3)..... | 53 |
| Figura 42. DEM lado Oriental de Sierras de Ambato | 58 |
| Figura 43. Cuenca del río Ambato con el cauce principal las respectivas sub-cuencas..... | 59 |
| Figura 44. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Los Nogales..... | 60 |
| Figura 45. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Seco | 60 |
| Figura 46. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Siján | 61 |
| Figura 47. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Saujil | 61 |
| Figura 48. Datos del perfil transversal del cauce principal del río Ambato obtenido en Google Earth..... | 62 |
| Figura 49. Ubicación cuenca Andalgalá con respecto a cuencas de estudio | 65 |
| Figura 50. Ubicación de estación con su respectiva área de aporte..... | 66 |
| Figura 51. Serie de caudales máximos anuales en la estación Andalgalá - Andalgalá..... | 67 |



| | |
|---|-----|
| Figura 52. Serie de caudales máximos anuales en la estación Andalgalá - Andalgalá que superó la prueba de detección de presencia de datos atípicos..... | 67 |
| Figura 53. Relación entre Q y Tr en la estación Andalgalá - Andalgalá..... | 68 |
| Figura 54. Gráfico para ecuación del SCS..... | 73 |
| Figura 55. Definición gráfica del tiempo de retardo | 76 |
| Figura 56. Hietogramas por Bloque Alterno e Intensidad Instantánea en cuenca Ambato para Tr=100 años..... | 78 |
| Figura 57. Hidrogramas de salida cuenca Ambato para Tr=100 años..... | 79 |
| Figura 58. Caudales pico según tiempo al pico | 79 |
| Figura 59. Hietograma de diseño para la cuenca de Ambato, con un Tr=10 años. | 80 |
| Figura 60. Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS. Fuente: Ven Te Chow. Hidrología Aplicada..... | 81 |
| Figura 61. Ubicación de estaciones Pie de Médano y Playa Larga, y las poblaciones de El Rodeo, Siján y Saujil..... | 83 |
| Figura 62. Valores del NDVI para la cuenca del río Los Nogales | 87 |
| Figura 63. NDVI para cuenca el Ambato | 89 |
| Figura 64. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,00 - 0,20..... | 89 |
| Figura 65. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,21 – 0,40..... | 90 |
| Figura 66. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,41 – 0,60..... | 90 |
| Figura 67. Método de abstracciones de precipitación del SCS. Fuente: Hidrología Aplicada, Ven Te Chow..... | 92 |
| Figura 68. Almacenamiento Método Muskingum. Fuente: Hidrología Aplicada; Ven Te Chow..... | 94 |
| Figura 69. Resultado de la modelación con Muskingum-Cunge | 96 |
| Figura 70. Resultado de la modelación con Kinematic wave | 97 |
| Figura 71. Resultado de la modelación con Tlag (Vmax) | 97 |
| Figura 72. Resultado de la modelación con Tlag (kirpich)..... | 98 |
| Figura 73. Resultado de la modelación con Muskingum | 98 |
| Figura 74. Hidrograma Unitario. Fuente: http://www.scielo.org.mx | 100 |
| Figura 75. Modelo río Ambato HEC-HMS..... | 103 |
| Figura 76. Hietograma sub-cuenca 1 de río Ambato para Tr=100 años | 103 |
| Figura 77. Hidrograma tránsito 1 de cuenca Ambato | 104 |
| Figura 78. Hidrograma de salida de la cuenca Ambato para Tr=100 años | 105 |
| Figura 79. Hidrogramas de salida de cuenca Ambato..... | 105 |
| Figura 80. Modelo río Los Nogales HEC-HMS | 106 |
| Figura 81. Hietograma sub-cuenca 1 de río Los Nogales para Tr=100 años | 106 |



| | |
|---|-----|
| Figura 82. Hidrograma de tránsito 1 en cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años..... | 107 |
| Figura 83. Hidrograma de tránsito 2 en cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años..... | 107 |
| Figura 84. Hidrograma total de la cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años..... | 108 |
| Figura 85. Hidrogramas de salida de cuenca Los Nogales | 109 |
| Figura 86. Modelo río Seco HEC-HMS..... | 114 |
| Figura 87. Modelo río Saujil HEC-HMS..... | 114 |
| Figura 88. Modelo río Siján HEC-HMS..... | 115 |



Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Listado de estaciones pluviometría diaria | 25 |
| Tabla 2. Aforos medidos en el río Ambato o El Rodeo- Villa El Rodeo | 53 |
| Tabla 3. Aforos medidos en el río Ambato o El Rodeo- La Puerta | 54 |
| Tabla 4. Parámetros morfológicos de las cuencas y sub-cuencas | 62 |
| Tabla 5. Relación Q – T en Andalgalá - Andalgalá y valores de caudal específico para los distintos Tr | 69 |
| Tabla 6. Caudales en la cuenca Ambato..... | 69 |
| Tabla 7. Caudales en la cuenca Los Nogales | 69 |
| Tabla 8. Caudales en la cuenca Seco | 70 |
| Tabla 9. Caudales en la cuenca Saujil | 70 |
| Tabla 10. Caudales en la cuenca Siján..... | 70 |
| Tabla 11. tc para la cuenca de Ambato | 75 |
| Tabla 12. Velocidades obtenidas según los tc arrojados por los distintos métodos | 75 |
| Tabla 13. Tiempos de concentración y retardo de los ríos en estudio | 76 |
| Tabla 14. Láminas de precipitación estación El Rodeo. | 77 |
| Tabla 15. Láminas de precipitación estación Mutquín. | 78 |
| Tabla 16. Caudales pico arrojados en cada método | 79 |
| Tabla 17. Diferencia caudales calculados para CN II y CN III tomando a Ambato como una cuenca | 82 |
| Tabla 18. Clasificación de clases de antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS. | 83 |
| Tabla 19. Registro de PMD de cada estación. | 83 |
| Tabla 20. Condiciones de humedad antecedente de estación Belén por año e intervalo | 84 |
| Tabla 21. Condiciones de humedad antecedente de estación Pie de Médano por año e intervalo | 85 |
| Tabla 22. Condiciones de humedad para Tr cercanos a 25 años | 85 |
| Tabla 23. Condiciones de humedad para cada Tr | 86 |
| Tabla 24. Relación cubierta vegetal con tipología de suelo y CN, basada en tabla 5.5.2 | 88 |
| Tabla 25. Valores de CN adoptados por cada intervalo de NDVI..... | 88 |
| Tabla 26. CN II para sub-cuencas de río Ambato | 90 |
| Tabla 27. CN II para sub-cuencas de río Los Nogales | 90 |
| Tabla 28. CN II para sub-cuencas de río Seco..... | 91 |
| Tabla 29. CN II para sub-cuencas de río Saujil..... | 91 |
| Tabla 30. CN II para sub-cuencas de río Siján | 91 |
| Tabla 31. CN finales y diferencia | 91 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 32. Valores de Infiltración inicial por sub-cuenca | 92 |
| Tabla 33. Caudales de diseño de cada río [m^3/s] | 101 |
| Tabla 34. Comparación Área-Caudal | 101 |
| Tabla 35. Incremento de caudales entre dos periodos consecutivos..... | 102 |
| Tabla 36. Diferencia entre caudales obtenidos por modelación hidrológica y regionalización de caudales..... | 102 |



CAPITULO 1



1 CAPITULO 1.- Marco referencial del trabajo

1.1 Introducción

El estudio hidrológico presentado en este informe, se encuentra dentro del marco del proyecto “*Estudio integral para establecer acciones de planificación contra amenazas por inundaciones en las localidades del El Rodeo –Dpto. Ambato-, Saujil y Siján – Dpto. Pomán- Provincia de Catamarca*” licitado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca y desarrollado por el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (C.E.T.A) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las tres localidades mencionadas anteriormente se encuentran al pie de la sierra de Ambato. La localidad de El Rodeo está ubicada sobre el lado oriental, mientras que Siján y Saujil sobre el lado occidental. Se encuentran atravesadas por cursos de agua que tienen sus orígenes en sectores elevados del cordón montañoso (con una altura de 4.000 m.s.n.m.). La localidad de El Rodeo es atravesada por tres ríos, Ambato, Los Nogales y Seco; mientras que Siján y Saujil son atravesadas por ríos que llevan sus mismos nombres.

Cuando se producen eventos de precipitaciones de gran intensidad en la cuenca alta, existe una alta tendencia a la generación de crecidas repentinas de gran magnitud, las cuales arrastran gran cantidad de sedimentos y material rocoso, constituyendo un riesgo para estos asentamientos urbanos. Por tal motivo surge la necesidad de evaluar la amenaza de inundaciones repentinas para definir acciones de prevención, corrección y planificación. Para ello cuatro etapas de estudio son requeridas:

- 1- Revisión de antecedentes
- 2- Estudio geomorfológico
- 3- Estudio Hidrológico
- 4- Estudio Hidráulico

El objetivo de esta Práctica Supervisada es el cumplimiento de las etapas 1 y 3. Con respecto a la etapa 1 de recopilación de antecedentes, se presenta en este trabajo un análisis detallado de los estudios previos destacando fortalezas y debilidades. En relación al estudio hidrológico (etapa 3), debido a la carencia de registros históricos de caudales de los ríos involucrados para llevar a cabo dicho estudio, se recurrió a realizar una modelación hidrológica en base a una transformación lluvia-caudal para distintos períodos de recurrencia.



Los resultados obtenidos serán utilizados en la etapa posterior del proyecto, ajena a este informe, para la realización de una modelación hidráulica y evaluar así la amenaza de crecidas repentinas y poder definir acciones de prevención, corrección y planificación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General del proyecto de la Práctica Supervisada

El objetivo general de esta Práctica Supervisada (PS) es realizar un estudio hidrológico en cinco cuencas ubicadas en los Departamentos Ambato y Pomán en la Provincia de Catamarca a través del uso de herramientas informáticas incluyendo además una recopilación de antecedentes de estudios previos.

1.2.2 Objetivos Específicos del proyecto de la Práctica Supervisada

Los objetivos específicos de esta PS son:

- Análisis detallado de los estudios previos destacando fortalezas y debilidades.
- Definición de áreas de vacancia en relación a aspectos hidrológicos.
- Definición de metodología para cubrir áreas de vacancia.
- Entrenamiento de herramientas informáticas específicas.
- Determinación de parámetros morfométricos de las cuencas.
- Regionalización de caudales para validar los resultados del modelo hidrológico.
- Determinación de los parámetros hidrológicos básicos, necesarios para la modelación hidrológica
- Simulación de distintos escenarios con un modelo hidrológico.
- Análisis de resultados.

1.2.3 Objetivos particulares de la Práctica Supervisada

- Obtener experiencia práctica, aplicando y profundizando los conceptos adquiridos durante los años de estudio de la carrera.
- Incorporar nuevos conocimientos relacionados con el uso de software de aplicación.
- Desarrollar habilidades para un mejor desenvolvimiento en el ámbito laboral profesional y de trabajo multidisciplinario.
- Redactar un informe de utilidad para estudios posteriores y/o análisis relacionados con la temática expuesta.



CAPÍTULO 2



2 CAPITULO 2.- Recopilación de antecedentes

2.1 Introducción

En este capítulo se expone y analiza la información recopilada; se determina que parte de la misma es útil y que áreas de vacancia presenta. Finalmente se define la metodología para salvar esta vacancia y las herramientas a utilizar.

2.2 Ubicación de las localidades de interés

2.2.1 El Rodeo

La localidad de El Rodeo se encuentra en el Departamento Ambato, Provincia de Catamarca, Argentina, a unos de 36Km de San Fernando del Valle de Catamarca, al noroeste de la misma, como se observa en la Figura 1.

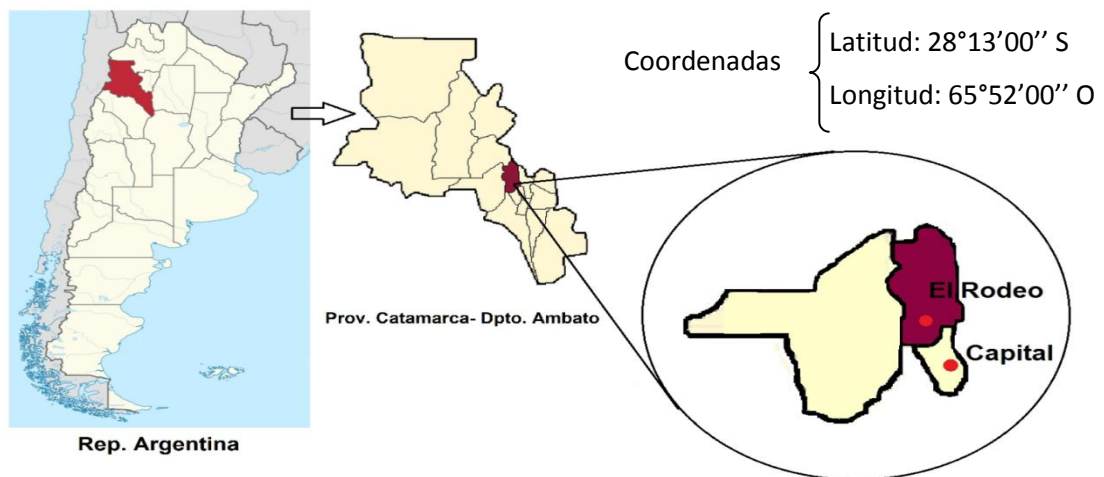


Figura 1. Ubicación de la localidad de El Rodeo

Es una villa de montaña que se encuentra en un valle entre Sierra de Ambato y Sierra del Colorado a unos 1.250 msnm, la cual es cruzada por tres ríos principales, Ambato, Los Nogales y Seco, como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Ríos de la localidad de El Rodeo (imagen extraída de Google Earth)



Posee una población de 1.047 habitantes (INDEC 2.010), la cual aumenta considerablemente en verano debido a la naturaleza de villa veraniega del lugar, que a la vez coincide con la época de crecida de los ríos.

La sismicidad en la zona es más bien de intensidad moderada, dado que está en la zona 2 según la clasificación del CIRSOC e INPRES-CIRSOC, y posee una frecuencia de terremotos medios a graves de 30 años.

2.2.2 Siján

La localidad de Siján se encuentra en el Departamento Pomán, Provincia de Catamarca, Argentina, a unos de 165Km de San Fernando del Valle de Catamarca, al oeste de la misma (Ver Figura 3).

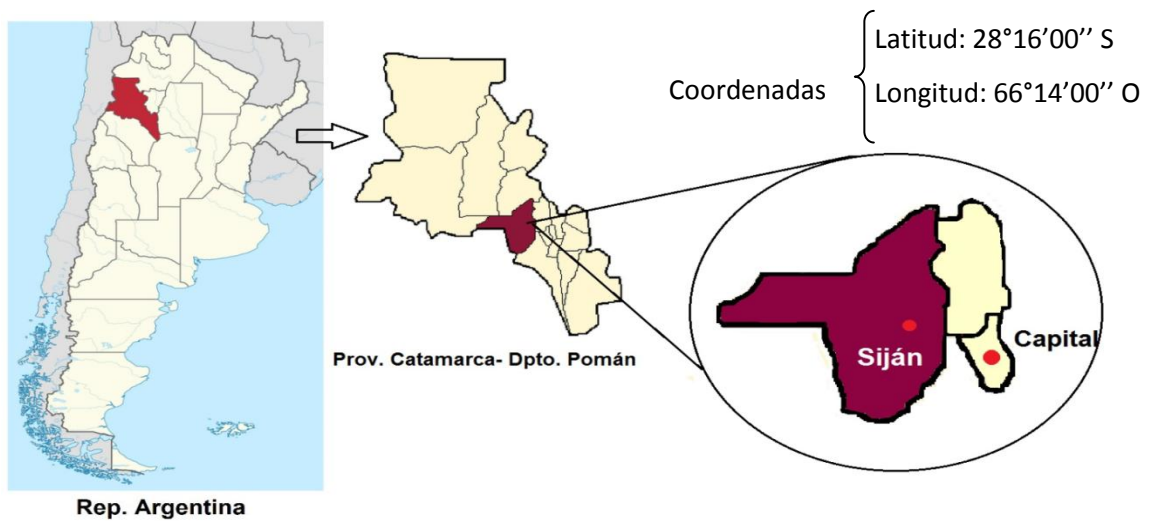


Figura 3. Ubicación de la localidad de Siján

Se encuentra al pie de la Sierra de Ambato, del lado occidental del cordón montañoso, y su asentamiento se desarrolla en el cono aluvial del río Siján, como se observa en la siguiente figura.



Figura 4. Localidad de Siján (imagen extraída de Google Earth)



Posee una población de 1.169 habitantes (INDEC 2.010). La sismicidad es la misma que la señalada para El Rodeo, se encuentra en zona de intensidad moderada, zona 2 según la clasificación del CIRSOC e INPRES-CIRSOC.

2.2.3 Saujil

La localidad de Saujil se encuentra en el Departamento Pomán, Provincia de Catamarca, Argentina, a unos de 170Km de San Fernando del Valle de Catamarca, al noroeste de la misma, como se aprecia en la Figura 5.

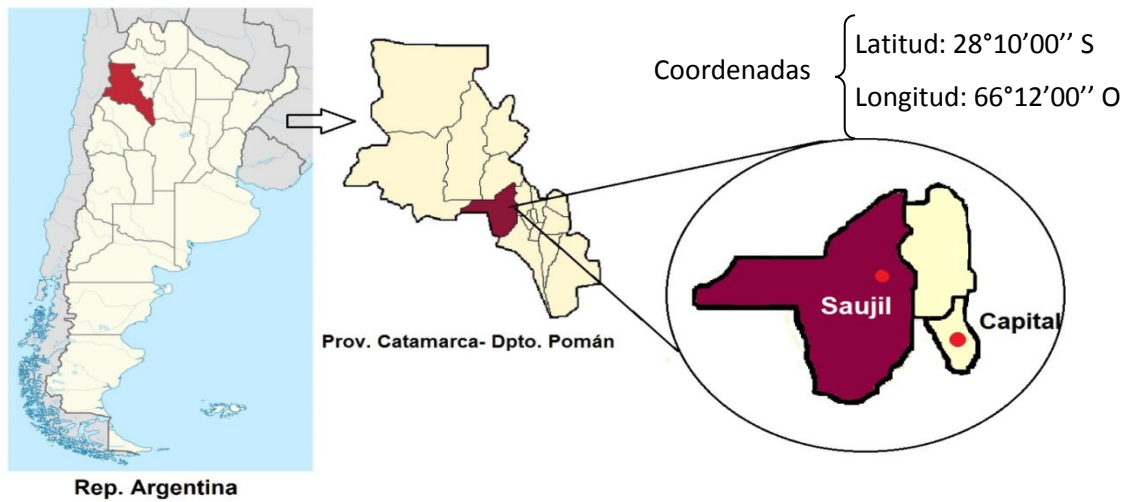


Figura 5. Ubicación de la localidad de Saujil

Es cabecera departamental de Pomán, y se encuentra sobre la misma ladera que Siján, al oeste de la Sierra de Ambato, unos 10Km al norte de esta población. También está asentada sobre un cono aluvial, sobre la Ruta 46, como se puede ver en la siguiente figura.

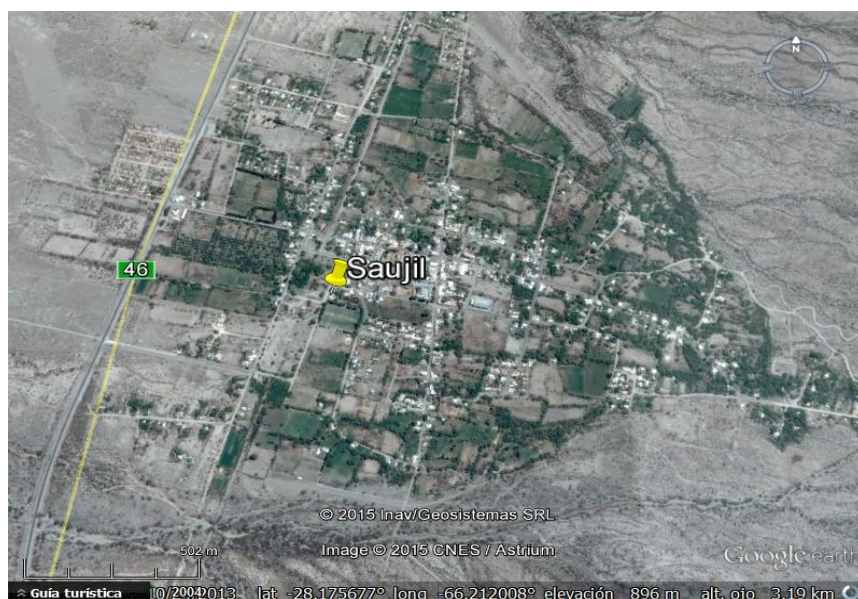


Figura 6. Localidad de Saujil (imagen extraída de Google Earth)



Posee una población de 2.368 habitantes (INDEC 2.010). La sismicidad es la misma que la señalada para El Rodeo, se encuentra en zona de intensidad moderada, zona 2 según la clasificación del CIRSOC e INPRES-CIRSOC.

2.3 Información relevada

La información relevada corresponde a: informes realizados en las áreas involucradas, relevamiento de proyectos de obras existentes, artículos periodísticos, información cartográfica, visitas de reconocimiento y reuniones. Se destacan entre los principales informes:

1. Informe: Regionalización de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en la provincia de Catamarca.
2. Informe: Delimitación de áreas de riesgo hídrico en El Rodeo -departamento Ambato-Catamarca.
3. Informe: Invitación para evaluar preliminarmente in-situ la situación de amenaza y riesgo que enfrenta la población de El Rodeo.
4. Informe: Informe preliminar sobre los aluviones ocurridos el 23 de enero 2014 en las ciudades catamarqueñas de El Rodeo y Siján.
5. Archivo del diario local, El Ancasti.
6. Vialidad de la Provincia de Catamarca.
7. Cartografía de la base de Instituto Geográfico Nacional – República Argentina –.

A continuación se presenta un resumen de cada documento:

1. “REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA”

Autores: Magalí Cervio, Nicolás F. Guillén, Ada Patricia Lobo, Clarita M. Dasso, M. Garcia. Centro de Estudios y Tecnología del Agua – Universidad Nacional de Córdoba –; Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET –; Centro de las Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua, Córdoba, Argentina.

Fecha: 2.012

Disciplina desarrollada: Hidrología.

Zona involucrada: Provincia de Catamarca.

Temas principales desarrollados:

- Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de las distintas estaciones existentes en la provincia de Catamarca.
- Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas preseleccionadas.
- Determinación del año hidrológico.
- Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.



- Verificación de hipótesis estadísticas de las series históricas de máximas lluvias diarias seleccionadas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.
- Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
- Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad.
- Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
- Generación de mapas tendenciales digitales de máximas láminas de lluvia diaria de distintos periodos de retorno para la provincia de Catamarca.

2. “DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO EN EL RODEO -DEPARTAMENTO AMBATO-CATAMARCA”.

Autores: Ing. Jorge A. Maza; Ing. Patricia López; Victor H. Burgos. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino - INA –.

Fecha: 2.012

Disciplina desarrollada: Hidrológica e Hidráulica.

Zona involucrada: Cuenca del Río Ambato.

Temas principales desarrollados:

- Relevamiento de información topográfica, cartográfica, pluviométrica e hidrológica.
- Definición de tormentas de proyecto, estimación de curvas IDF, distribución espacial y temporal.
- Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca, caracterización de suelos, de la vegetación, de la geología y la geomorfología.
- Determinación de pérdidas de la precipitación, determinación del CN.
- Modelación hidrológica.
- Simulación matemática de las áreas de inundación, con modelo HEC-RAS.
- Evaluación del riesgo de inundaciones.
- Recomendaciones y medidas de mitigación de inundaciones.
- Conclusiones.

3. “INVITACIÓN PARA EVALUAR PRELIMINARMENTE IN-SITU LA SITUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO QUE ENFRENTA LA POBLACIÓN DE EL RODEO”

Autores: Geól. Osvaldo Barbeito, Geól. Marcelo Lobo Rodríguez.

Fecha: 2.000.

Disciplina desarrollada: Geología y Geomorfología.

Zona involucrada: Localidad de El Rodeo – Catamarca –.



Temas principales desarrollados:

- Descripción del análisis geológico y geomorfológico de fotografías aéreas, imágenes satelitales y control expeditivo de campo.
- Listado de recomendaciones de aplicación en el corto plazo.

4. “INFORME PRELIMINAR SOBRE LOS ALUVIONES OCURRIDOS EL 23 DE ENERO 2014 EN LAS CIUDADES CATAMARQUEÑAS DE EL RODEO Y SIJÁN”.

Autores: Valérie Baumann (DGAA, IGRM, SEGEMAR, Buenos Aires); Noelia Carrizo (SEGEMAR, Delegación Catamarca); Florencio Saavedra (SEGEMAR, Delegación Catamarca); Lic. Graciela Marin (CONAE).

Fecha: 10/02/2.014.

Disciplina desarrollada: De relevamiento, informativa.

Zona involucrada: El Rodeo y Siján – Catamarca –

Temas principales desarrollados:

- Descripción de los hechos acontecidos en enero del 2.014 en las localidades de El Rodeo y Siján, en forma detallada delimitando zonas afectadas, estimando valores.

5. ARTÍCULOS PERIDÍSTICOS

Fuente: Diario local El Ancasti.

Autores: Varios.

Fecha: 05/01/2.015.

Disciplina desarrollada: Informativa.

Zona involucrada: El Rodeo, Saujil y Siján – Catamarca –

Temas principales desarrollados:

- Descripción de los hechos acontecidos durante los eventos de crecidas de los años 1.990 y 2.014.

6. EXPEDIENTE VIALIDAD PROVINCIAL

Fuente: Vialidad de la Provincia de Catamarca.

Autores: Dirección de construcciones y la Dirección de Ingeniería Vial.

Fecha: 10/12/2.014.

Disciplina desarrollada: Hidrológica, hidráulica, geológica, geomorfológica, entre otros.

Zona involucrada: El Rodeo, Saujil y Siján – Catamarca –

Temas principales desarrollados:

- Expediente “D” Nº 1790/2.014: Se solicitó información hidrológica, hidráulica, geológica, geomorfológica entre otras, sobre construcción de puentes y alcantarillas sobre rutas en



El Rodeo, Siján y Saujil. Además se pidió información a empresas involucradas en la construcción.

7. CARTA TOPOGRÁFICA

Fuente: Carta Topográfica de San Fernando del Valle de Catamarca 2966-II (Esc.: 1: 250.000); Carta Topográfica de Saujil 2966-3 (Esc.: 1: 100.000); Carta de Imagen Satelital Saujil 2966-3 Imagen Satelital (Esc.:1: 100.000).

Autores: Instituto Geográfico Nacional – República Argentina –.

Fecha: 2.007.

Disciplina desarrollada: Cartografía.

Zona involucrada: Provincia de Catamarca-

Temas principales desarrollados:

- Representación gráfica de curvas de nivel y fotografías aéreas de las zonas de San Fernando del Valle de Catamarca y Saujil.

2.4 Análisis detallado de estudios previos

2.4.1 Desarrollo del informe: Regionalización de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en la provincia de Catamarca

El objetivo general del trabajo fue la elaboración de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociados a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50 y 100 años para la provincia de Catamarca.

Se recopilaron y procesaron registros de 154 estaciones pluviométricas en la región de estudio, se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna. Posteriormente se determinó el año hidrológico, Julio-Junio resulto ser el más adecuado para la región de estudio.

Además, se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de 48 estaciones verificaron estas pruebas. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo; y se verifico que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas.

Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva17.00. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio. Finalmente, con esta información, se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.



Los mapas tendenciales obtenidos en este informe, permitirán definir las láminas de lluvias máximas diarias de cada localidad de estudio, asociada a diferentes períodos de retorno.

2.4.2 Desarrollo del informe: Delimitación de áreas de riesgo hídrico en El Rodeo – Dpto. Ambato- Catamarca.

2.4.2.1 Topografía y Cartografía

La ejecución de los trabajos topográficos fue realizada por la Secretaría del Agua y el Ambiente, Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, recibida en Diciembre de 2.010. Y los resultados obtenidos se pueden resumir en los siguientes datos:

- Cantidad de Perfiles transversales: 60.
- Long. Total Perfil Longitudinal: 2.838 m.
- Separación promedio: 45 m (máx: 60 m / mín: 30 m).
- Cantidad total de puntos relevados x,y,z : 879.
- Densidad de puntos por perfil (media): 15

Se recopiló toda la información cartográfica disponible acerca del área de estudio. Se trabajó con hojas cartográficas escala 1:50 000 y 1:250 000 (digitales e impresas) e imágenes de satélite (Landsat, MrSid)

2.4.2.2 Estaciones Pluviográficas

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) suministró información relativa a tormentas observadas en las estaciones: Catamarca Aero I (código 10.044), Catamarca Aero (código 10.044) y Catamarca INTA-Sumalao (código 10.070). La estación Aero I es reemplazada por la nueva Catamarca Aero, razón por la cual las observaciones están divididas en dos períodos.

La distribución temporal de los registros (Figura 7) muestra falta de datos en Catamarca Aero para el período 1.975-1.981, en 1.983 y 1.991, mientras que hay superposición con INTA-Sumalao en el período 1.964-1.974.

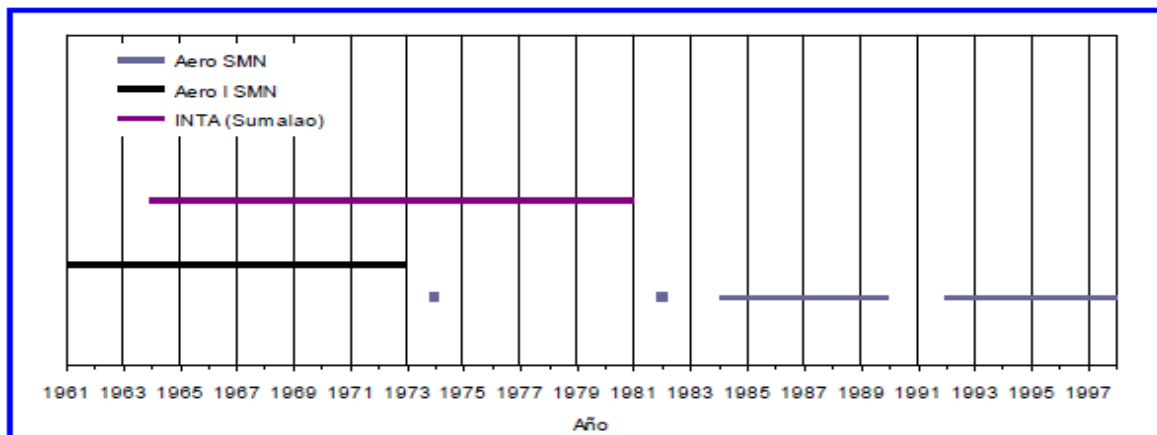


Figura 7. Distribución temporal de información pluviográfica del SMN



Todas las estaciones del SMN se posicionan en los alrededores de la ciudad capital de la provincia, alejadas de las localidades de interés.

2.4.2.3 Estaciones Pluviométricas

Por otra parte, desde la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca (DHyERH). Suministró información pluviométrica diaria de las estaciones listadas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Listado de estaciones pluviometría diaria

| Estación | Código | Período de registro |
|---------------|--------|---------------------|
| El Rodeo | 1 | 1970-2006 |
| La Puerta | 3 | 1970-1995 |
| El Jumeal | 160 | 1980-2007 |
| Las Rejas | 168 | 1972-1980 |
| Amadores | 110 | 1972-2011 |
| Singuil | 7 | 1971-2007 |
| Colpes | 1 | 1972-1995 |
| Palo Labrado | 118 | 1970-1996 |
| La Bajada | 113 | 1970-2004 |
| La Merced | 115 | 1969-2008 |
| Capital | 162 | 1977-2010 |
| El Portezuelo | 136 | 1970-2010 |

Se destaca que El Rodeo cuenta con una estación ubicada en la misma localidad cuyo periodo de medición es desde 1.970 al 2.006 (interrumpida en 1.977). Siján y Saujil no cuentan con una estación en el propio poblado. La más cercana se sitúa en Colpes.

A continuación se presenta la distribución temporal de la información pluviométrica de la DHERH y pluviográfica de la estación Catamarca Aero del SMN.

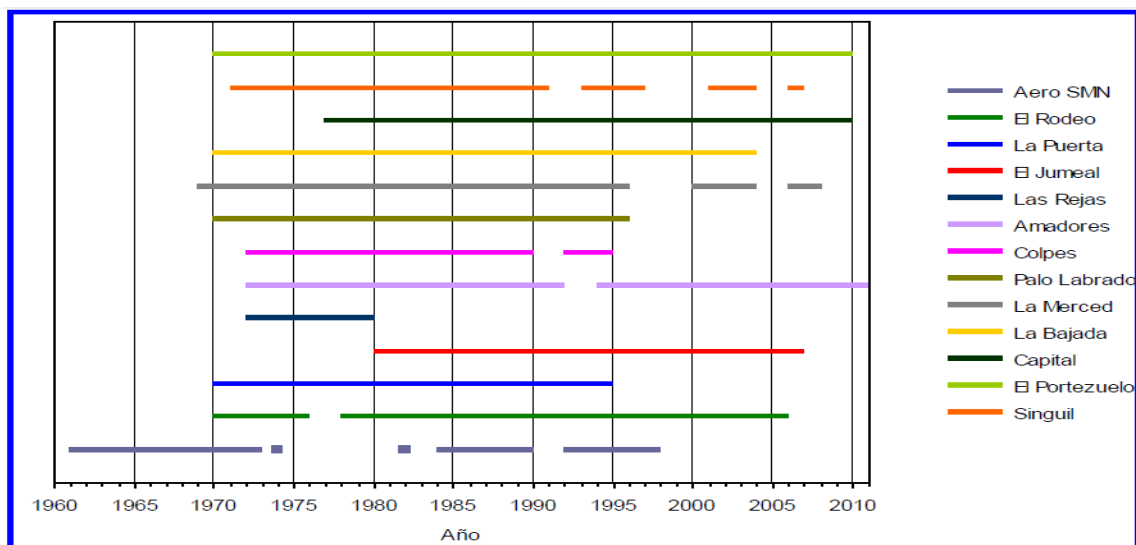


Figura 8. Distribución temporal de información DHyERH + estación Aero SMN



2.4.2.4 Información Hidrológica

La Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de Catamarca realiza observaciones instantáneas de caudales en algunos sitios en las cuencas bajo estudio, para el período 2002-2007. Es de destacar que la información que aquí se presenta corresponde a una única medición instantánea mensual, la serie no está completa y no se tienen datos de crecidas.

2.4.2.5 Tormenta de Proyecto

Se ha desarrollado la estimación de las curvas IDF, basándose en la estación El Rodeo. Para la distribución espacial y temporal el informe se basó en el Estudio del Arroyo Fariñango (CFI-INCYTH, 1.994).

2.4.2.6 Determinación de parámetros morfométricos de la cuenca

En este inciso se desarrolla una caracterización de los suelos y la vegetación en forma detallada de la provincia de Catamarca. También se desarrolla su caracterización geomorfológica y geológica.

➤ Suelo

En todo el valle y sierras de Las Juntas y El Rodeo, y en la ladera oriental del Ambato – Manchao, se localizan depósitos loésicos, productos de una selección de materiales causada por vientos globales y arrojados sobre estas laderas. Se trata de un sedimento friable, de color castaño claro, con estratificación gruesa, y un espesor de aproximadamente 8 m. La roca principal es un limo arenoso compuesto por granos de cuarzo, plagioclasa ácida, vidrio, moscovita, biotita, piroxeno, entre otros.

➤ Vegetación

-Altoandino: aparece a partir de los 3.600-3.700 m.s.n.m. Las comunidades son en general abiertas, tanto cuanto mayor es la exposición del viento y/o el frío. Se trata de pastizales cespitosos donde se presentan como dominantes *Stipa ichu* (paja blanca) y *Festuca hieronymi* var. *hieronymi* (paja colorada), en manchones discontinuos en una matriz de césped de escasa altura, con una abundante cantidad de especies gramíneas y latifoliadas de porte rastrero. Además, entre las rocas, cubiertas de líquenes, se encuentran pequeñas cactáceas, helechos, y con menos frecuencia chaguales.

-Chaco Serrano: las comunidades principales son la de los bosques de Horco-quebracho (*Schinopsis haenkeana*), los bosques de tabaquillo y los pastizales de *Stipa* y *Festuca*. Altitudinalmente llega hasta los 1.800 m s.n.m. Los pastizales de altura en Catamarca se encuentran sobre los 1.800 – 2.000 m.s.n.m. Por sobre los 2.000 m.s.n.m. hay una tendencia progresiva de aumento de zonas improductivas, por aumento de los afloramientos rocosos. Pasando los 3.500 m s.n.m., la vegetación se torna muy rala y aparecen especies propias del Dominio Altoandino.



-Bosque montano: Ocupando el sector alto de las Yungas entre los 1.400 y 2.200 m. s. n. m., no suele formar un piso continuo sobre la selva montana, sino que puede formar bloques aislados rodeados de prados montanos o pastizales de neblinas. Es un bosque que puede ser caducifolio, compuesto por un único estrato arbóreo, donde siempre existe una especie dominante, agnus acuminata (aliso-caducifolio) o Podocarpus parlatorei (Pino del cerro- peremnifolio), formando bosques puros, dominando el podocarpus en la zona baja de la cuenca de estudio, en quebradas y faldeos con exposición sur y este, principalmente. Se trata de un área disyunta, es decir, sin continuidad con formaciones similares que se desarrollan a menores altitudes.

2.4.2.7 Determinación de pérdidas de la precipitación

La determinación del potencial de escurrimiento se realizó en función del número de curva (CN; metodología del U.S. Soil Conservation Service, hoy NRCS) y se llevó a cabo de forma distribuida utilizando el SIG ArcView 3.2a y tablas de clasificación (Burgos, 2008).

El cruzamiento espacial de los mapas de uso de suelos y el del tipo hidrológico de suelos se realizó por medio de un procesamiento de álgebra de mapas y se obtuvo para cada cuenca el CN ponderado por área, debido a que el modelo hidrológico utilizado es del tipo concentrado.

Se obtuvieron valores medios de CN para cada subcuenca, cuyos valores van desde los 61.4 a los 78.5.

2.4.2.8 Modelación hidrológica

El modelo ARHYMO es un modelo de transformación lluvia-caudal, de tipo determinístico y de parámetros concentrados, desarrollado por el INA y que es ampliamente utilizado en Argentina desde 1993. En este estudio se hizo uso de la nueva versión en entorno MS Windows® (Fornero, et al., 2002).

Se obtuvieron 7 caudales de diseño, asociados a periodos de retorno que van de los 2 años a los 200 años.

2.4.2.9 Simulación de las áreas inundables, Mapas de riesgo de inundación y Recomendaciones para mitigación de inundaciones

El modelo HEC-RAS ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del U.S. Corps of Engineers. Siendo su versión más moderna la 4.1.0 de enero de 2010 (U.S. Hydrologic Engineering Center, 2010).

El modelo está también diseñado para estudios de manejo de planicies inundables o de seguros contra crecidas.

Se pueden evaluar el comportamiento hidráulico de puentes, alcantarillas, defensas de márgenes, etc. y también considerar fondo móvil, es decir erosión al pie de las estructuras.



Se simularon los caudales obtenidos en el punto anterior y de ellos se observaron los tirantes y la mancha de inundación generada, para luego poder realizar los mapas de riesgo y elaborar las recomendaciones.

2.4.2.10 Conclusiones

Este estudio hidrológico-hidráulico para determinar el riesgo hídrico del Río Ambato en la localidad de El Rodeo fue llevado a cabo utilizando modelación matemática que no pudo ser calibrada ni validada con información histórica, siendo un típico caso de aplicación en cuenca sin datos.

- *Sin embargo se ha podido sustentar el orden de los valores de los resultados de la modelación matemática en función de “rastros” que ha dejado el funcionamiento hídrico de este sistema:*
- *El material de arrastre de gran calibre que existe en el cauce del río permitió establecer el orden de los caudales necesarios para poder realizar el traslado de ese material convalidando así el orden de magnitud de los caudales resultantes de la aplicación del modelo ARHymo.*

La aplicación del modelo HEC-RAS permitió establecer que para la crecida media (TR= 2 años) no se producían desbordes en el cauce del Río Ambato, lo cual convalida la respuesta geomorfológica del sistema a la acción fluvial de tal crecida, dando validez también a la determinación de la precipitación con tal recurrencia.

Las corridas del modelo HEC-RAS han permitido evidenciar:

- *Los desbordes del cauce que se generan con crecidas de TR= 5 años y superiores.*
- *Que tales desbordes benefician a la estabilidad de los puentes ya que si no fuera así serían altamente vulnerables.*
- *Las planicies inundables tienen muy pocos casos de áreas de riesgo hídrico.*
- *La instalación de defensas laterales para evitar los desbordes aliviaría el riesgo hídrico de las zonas afectadas pero simultáneamente afectaría a la estabilidad de los puentes*
- *La necesidad de una defensa lateral para mitigar un área de riesgo hídrico elevado*

Se han recomendado una serie de medidas no-estructurales y estructurales que son congruentes en la mitigación del riesgo hídrico de las cuales son interesantes de resaltar:

- *Una adecuada planificación del uso del suelo utilizando como base los mapas de riesgo hídrico*
- *La posibilidad de establecer un sistema de alerta hidrológico en la cuenca en base a estaciones pluviográficas de transmisión en tiempo real considerando que el tiempo de concentración de la cuenca es del orden de 50 minutos*

La realización de estudios y obras en la alta cuenca del Río Ambato en relación con el transporte de material de arrastre de gran tamaño



2.4.3 Desarrollo del informe: Invitación para evaluar preliminarmente in-situ la situación de amenaza y riesgo que enfrenta la población de El Rodeo

Efectuado un diagnóstico preliminar y mediante análisis geológicos y geomorfológicos empleando fotografías aéreas e imágenes satelitales y el correspondiente control expeditivo de campo, se describen las características de la cuenca hídrica, en la que se emplaza la localidad de El Rodeo. Posteriormente se realizan una serie de recomendaciones y medidas de mitigación de los efectos de carácter estructural y no estructural.

2.4.4 Desarrollo del Informe: Informe preliminar sobre los aluviones ocurridos el 23 de Enero 2014 en las ciudades catamarqueñas de El Rodeo y Siján.

En este informe, realizado por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), se describe lo sucedido en el evento de enero de 2.014 en las localidades de El Rodeo y Siján, exponiendo los resultados de una evaluación preliminar de las zonas afectadas.

2.4.4.1 El Rodeo

Una tormenta de mucha intensidad desencadenó la crecida del río Ambato, con un caudal instantáneo de aproximadamente 100 m³/s (medido aguas arriba del camping) que llegó a El Rodeo, a las 22:30 hs.

A partir de las observaciones de campo se realizó un mapa preliminar donde se marcan las principales zonas afectadas por la inundación de detritos (Figura 9). La primera zona afectada fue una finca y el camping que se encuentra a la orilla del río Ambato.

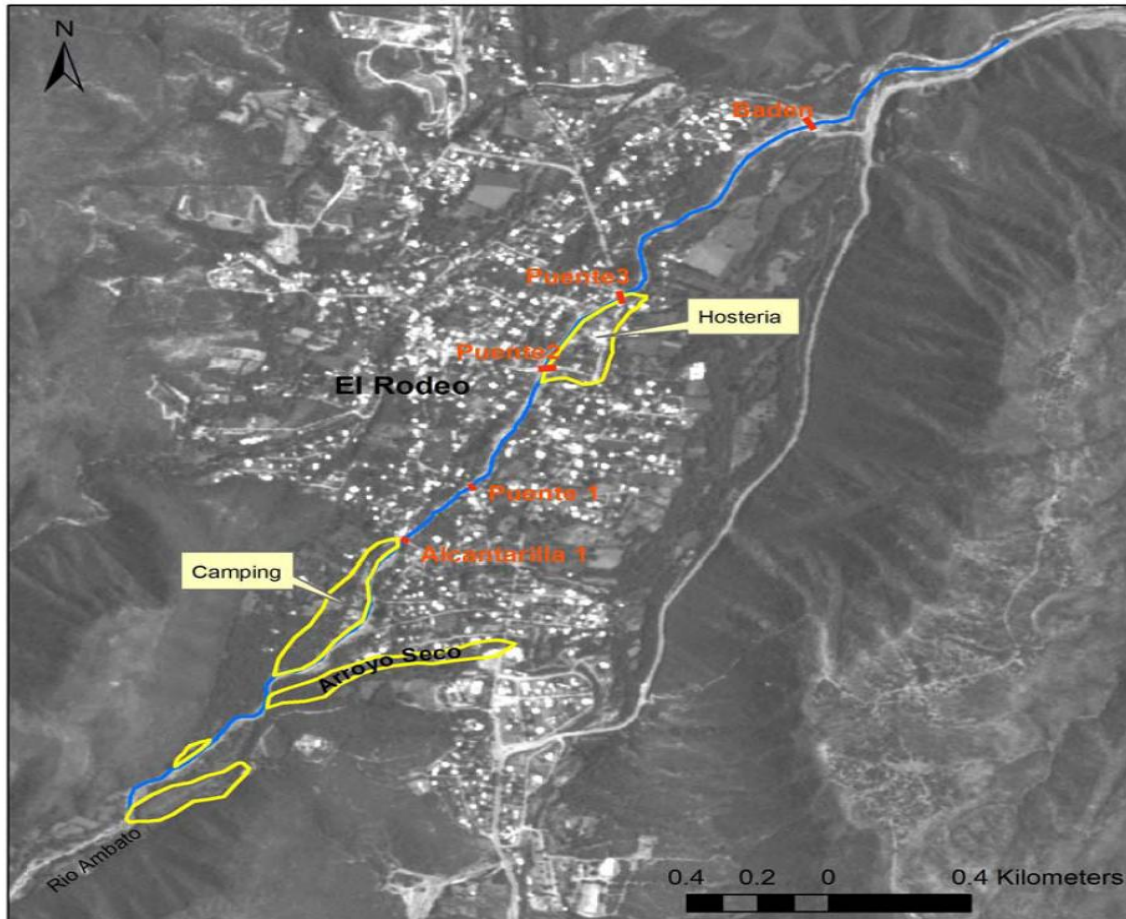


Figura 9. Delimitación de las zonas más afectadas (con líneas amarillas) por los flujos de detritos y ubicación de la alcantarilla, los puentes y el badén en color rojo. En azul cauce del río Ambato que cruza la ciudad de El Rodeo. Imagen spot 5, provista por la CONAE y procesada por el SEGEMAR

Cuando llegó al badén ubicado en la confluencia con el río Nogales, el flujo erosionó la ruta en ambas márgenes y dejó un depósito con voluminosos bloques en el lecho.

El tamaño promedio de los bloques mayores encontrados alrededor del puente 3 es de 8 m^3 , pero se midieron también algunos de 40 m^3 , siendo estos de composición granítica.

2.4.4.2 Siján

Alrededor de la media noche, un flujo denso de barro y detritos llegó hasta una de las casas construida en la margen derecha del antiguo cauce del río Siján. Según relatos de los pobladores el flujo se desplazaba "a paso de hombre" lo que dio tiempo a dar aviso a todos los habitantes ubicados aguas abajo.

Hace unos años, después de una crecida importante, el cauce del río fue desviado hacia el sur mediante una defensa (terraplén) hecha con el mismo material del río (Figura 10). El flujo pasó sobre la defensa y retomó su cauce natural, avanzando y arrasando con animales, casas y árboles. Le siguió luego una parte más fluida que erosionó la defensa.

En la ciudad de Siján predominó la acumulación de sedimentos que incluyen grandes bloques con un espesor máximo medido de 2,5m variando entre 1,5 y 1 m en la parte central. Se formaron también varios arroyos que cruzan la localidad. Los bloques mayores medidos a la altura de la defensa fueron de 74 m^3 (196 Tn.) y alrededor de la escuela aguas abajo de 5 m^3 (13 Tn).

El caudal instantáneo (medido a través del perímetro mojado) en la parte apical del cono, fue para este evento de aproximadamente $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

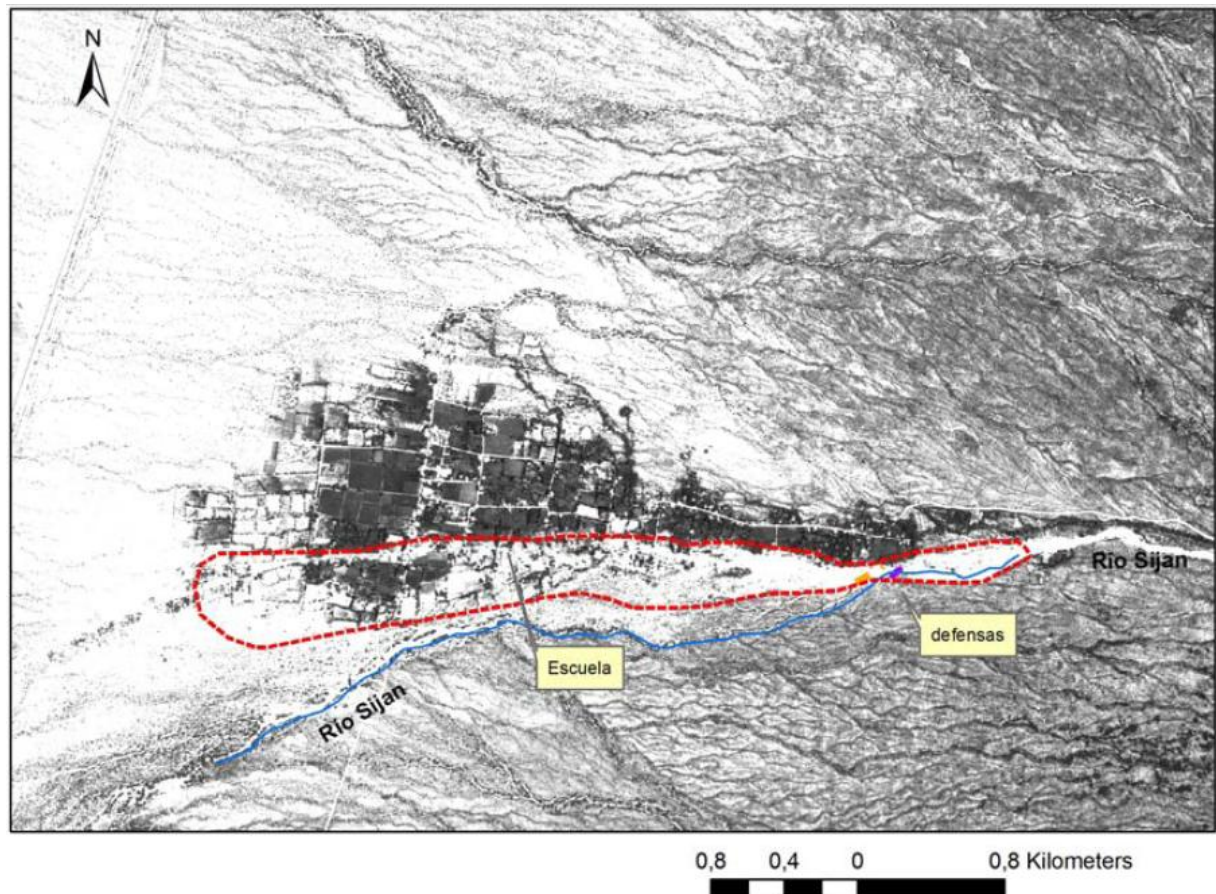


Figura 10. Área urbana y cultivos afectados por el flujo de detritos en color rojo; las antiguas defensas en color naranja y en color violeta la nueva. En color azul se marca el cauce del río Siján antes del evento del 23 de Enero 2.014

2.4.5 Desarrollo del Archivo del diario local, El Ancasti

A modo de magnificar la importancia de los estudios presentados a este informe y relevar lo acontecido, se realizó una búsqueda de antecedentes periodísticos respecto a eventos sucedidos en las localidades de análisis, para lo que se consultaron los archivos del diario local El Ancasti. Cabe aclarar, que la finalidad de los estudios, no es representar lo acontecido, sino que se busca conocer los efectos producidos por estos eventos.

Del diario local, *El Ancasti*, se recopilaron noticias relacionadas a crecidas en el año 1.990 y el 2.014, para El Rodeo y Siján; mientras que para Saujil se obtuvo información del alud 1.939. Estos eventos corresponden a los más grandes que el diario haya cubierto.



A continuación se muestran extractos de las notas analizadas, que reflejan los efectos de las crecidas y las zonas afectadas:

2.4.5.1 Crecida 1.939

- **Título: “Saujil después del alud de 1.939.”** [Fecha: 13 de Octubre de 2.014]

“También quiero contar que después de aquel alud de 1.939, hoy todavía hay vestigios notables de lo que fue aquel fenómeno, y más aún por dos grandes crecidas ocurridas. Una, en el verano del año 1.958; que amenazó seriamente al pueblo de Saujil, ya que pasó por el centro, arrasando calles, frente de casas, la parte Norte de la Plaza, llevando y tapando vehículos de un taller mecánico. La otra también se produjo en el verano del año 1.972, que avanzó por la parte sud, produciendo anegamiento de casa y fincas y evacuación de pobladores hacia el centro.”

2.4.5.2 Crecida 1.990

- **Título: “Horas dramáticas vivió El Rodeo”** [Fecha: 29 de Enero de 1.990, pág. 8]

“[...] el río Ambato desbordó de su cauce natural provocando cuantiosos daños materiales, sin registrarse por suerte víctimas fatales ni heridos de consideración”

“La gran masa de agua, piedras y lodo, desplazándose a gran velocidad, arrasó con todo lo que encontraba a su paso, sufriendose los mayores daños en el sector del balneario municipal [...]”

“También la conocida y ya tradicional hostería Villafañez sufrió el embate de las aguas, consignando la pérdida total de su mobiliario [...]”

“La magnitud de los daños pudo observarse claramente en la estructura de dos de los puentes colgantes de la villa, inutilizados por la fuerza del fenómeno meteorológico.”

“Los lugareños se refirieron al fenómeno afirmando que «hace como cuarenta años que no se producía una creciente del tal intensidad», y llamaba su atención «la cantidad de lodo que arrastró el aluvión».”

Al final de este artículo, se hace referencia a una crecida que se produjo en Siján a la misma hora (23.30hs aproximadamente), donde solo hubo daños menores.

- **Título: “Vestigios de lo que pudo ser una tragedia. Siján.”** [Fecha: 2 de Febrero de 1.990, pág. 5]

“Piedras de gran tamaño arrastraron una finca [...]”

“Acá el aluvión rebasó una defensa tapándola con el material que arrastraba. Casi dos metros debajo de un manto de rocas de grandes dimensiones, el río tenía marcado su trayecto. Ahora sus aguas corren por un costado [...]”

2.4.5.3 Crecida 2.014

- **Título: “El bramido del río anticipó la calamidad.”** [Fecha: 25 de Enero de 2.014, pág. 3]

“[...] el río se abrió paso y arrastró con él viviendas íntegras.”

“[...] el río buscó su cauce natural y no el que le trazaron las construcciones hechas en la villa”.

Al final de la nota se menciona el papel que pudo haber tenido un puente que cruzaba el cauce (Figura 11):

“Un dato que no dejó de llamar la atención entre los lugareños de El Rodeo fue la ubicación de un puente que fue arrasado por la violencia del alud, y que de alguna manera, habría contenido el agua hasta liberarla de una manera mucho más violenta, lo que generó el desenlace trágico. El puente tenía forma de arco en su interior revestido con chapas de zinc”.



Figura 11. Puente mencionado en la nota. Fuente: [http://3.bp.blogspot.com/-McTZilZ9FNM/UwGa9Wz960I/AAAAAAAAAGZw/P36bXke9sRM/s1600/Tragedia+Desastre+Alud+en+El+Rodeo+Creciente+Rio+Ambato+Catamarca+Argentina+Mountains+river\(33\).jpg](http://3.bp.blogspot.com/-McTZilZ9FNM/UwGa9Wz960I/AAAAAAAAAGZw/P36bXke9sRM/s1600/Tragedia+Desastre+Alud+en+El+Rodeo+Creciente+Rio+Ambato+Catamarca+Argentina+Mountains+river(33).jpg). (visto Enero 2.015)

- **Título:** “En Siján murió un anciano de 73 años como consecuencia del alud.” [Fecha: 25 de Enero de 2.014]

“Respetando el cauce natural, el río ingresó por la avenida principal destruyendo construcciones, vidrios, comercios con su mercadería y también las instalaciones de la escuela primaria del lugar”.

A continuación, se presentan extractos de una nota escrita por un particular al Director del SEGEMAR, donde habla de la crecida que sucedió en 1.930, en 1.958 y en 1.972.

2.4.6 Desarrollo de la información provista por Vialidad Provincial de Catamarca

Se ha abierto el expediente (“D” N° 1790/2.014) en Vialidad de la provincia de Catamarca el día 10 de Diciembre del 2.014, con la finalidad de obtener información (hidrológica, hidráulica,



geológica, geomorfológica, entre otros) sobre las obras existentes en las rutas que llevan a las localidades de El Rodeo, Saujil y Siján, como ser desagües pluviales, puentes, entre otros.

Por parte de la Dirección de Construcciones se obtuvo una lista de obras en la zona de interés. El mismo se muestra a continuación:

RUTA PROVINCIAL Nº46

TRAMO: EMPALME R.N 60- ANDALGALA

SECCION: PAJONAL- COLPES

OBRA: CONSTRUCCION DE OBRA BASICA Y PAVIMENTACIÓN (Construcción de Alcantarillas de HªAª, Badenes de Hormigón, Alcantarillas Sumergibles)

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 1.981/1.984

Sin antecedentes físicos

EMPRESA CONTRATISTA: CAPDEVILA EMPRESA CONSTRUCTORA S.A

RUTA PROVINCIAL Nº16

TRAMO: EL RODEO- LA PUERTA

SECCIÓN: EL RODEO- LOS NOGALES

OBRA: CONSTRUCCIÓN DE OBRA BÁSICA Y PAVIMENTACIÓN (Construcción de Alcantarillas- Obra Rescindida)

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 1.987

Sin antecedentes físicos

EMPRESA CONTRATISTA: CAPDEVILA EMPRESA CONSTRUCTURA S.A

RUTA PROVINCIAL Nº25

TRAMO: POMAN- ROSARIO DE COLANA

SECCIÓN: PROGRESIVA 5.644,12- ROSARIO DE COLANA PROGRESIVA 9.236,22

OBRA: CONSTRUCCIÓN DE OBRA BÁSICA E IMPRIMACIÓN REFORZADA INCLUIDO BADÉN S/ RÍO SECO (Se ejecutaron Alcantarillas)

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 2.005/2.006

EMPRESA CONTRATISTA: DUMANDZIC HNOS. S.A.

RUTA PROVINCIAL Nº25

TRAMO: POMÁN- ROSARIO DE COLANA

SECCIÓN: PROGRESIVA 0,00- PROGRESIVA 1.228,48

OBRA: CONSTRUCCIÓN DE OBRA BÁSICA E IMPR. REFORZADA (Se ejecutaron Obras de Arte)



PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 2.002/2.003

CONTRATISTA: CONSTRUCCIONES IVICA Y ANTONIO DUMANDZIC HNOS S.A.

RUTA PROVINCIAL Nº 46

TRAMO: EMP. RN 60- ANDALGALA

SECCIÓN: EMP RN 60- EMP R.P Nº25

OBRA: CONSTRUCCIÓN DE ALCANTARILLAS DE HºAº S/ PLANO 0-41.211

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 2.009

CONTRATISTA: ARQ. MARIO DE LA QUINTANA EMPRESA CONSTRUCTORA

RUTA PROVINCIAL Nº4

EL RODEO- CATAMARCA

OBRA: AMPLIACIÓN DE PUENTE SOBRE RÍO AMBATO - INCLUIDO DEFENSAS DE MÁRGENES Y ACCESOS

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 2.010/11

CONTRATISTA: CARLOS JORGE VERA EMPRESA CONSTRUCTORA

EL RODEO- CATAMARCA

OBRA: CONTRUCCIÓN DE PUENTES SOBRE RÍO AMBATO- CALLE LAS DALIAS Y CALLE LAS HORTENSIAS INCLUIDO ACCESOS

PERIODO DE CONSTRUCCIÓN: AÑO 2.010/2.012

CONTRATISTA: GUIDO MOGETTA EMPRESA CONSTRUCTORA

De la Dirección de Ingeniería Vial - Departamento de Estructuras, proveyó información sobre la cuenca del río Ambato en la localidad de El Rodeo; y datos de cuencas para las obras de arte en las distintas progresivas de la Ruta provincial Nº25. Las cuencas de las que se obtuvo información son:

- 1- Cuenca río Ambato.
- 2- Cuenca Progresiva 3.071,64 Obra Ruta Provincial Nº25 Tramo Mutquín – Colana.
- 3- Cuenca Progresiva 4.614,90 Obra Ruta Provincial Nº25 Tramo Mutquín – Colana.
- 4- Cuenca Progresiva 4.856,00 Obra Ruta Provincial Nº25 Tramo Mutquín – Colana.
- 5- Cuenca Progresiva 5.006,80 Obra Ruta Provincial Nº25 Tramo Mutquín – Colana.
- 6- Cuenca Progresiva 5.603,00 Obra Ruta Provincial Nº25 Tramo Mutquín – Colana.

En las mismas se muestra información característica, como ser longitudes cauces, pendientes, cálculos de tiempos de concentración, precipitaciones y caudales de cada una de ellas.



2.4.7 Desarrollo de la Cartografía de la base de Instituto Geográfico Nacional- República Argentina-

Como antecedente cartográfico se posee cartas topográficas e imágenes satelitales de la zona de estudio, en soporte papel, las cuales se mencionan a continuación:

- Carta Topográfica de San Fernando del Valle de Catamarca 2966-II (Esc.: 1: 250.000).
- Carta Topográfica de Saujil 2966-3 (Esc.: 1: 100.000).
- Carta de Imagen Satelital Saujil 2966-3 Imagen Satelital (Esc.:1: 100.000).

2.5 Visitas de reconocimiento

En lo referido a los reconocimientos de campo, se realizaron viajes para recorrer el sector de estudio, tomar contacto con autoridades, identificar problemáticas y caracterizar la forma de manejo y uso del suelo de la cuenca.

Se mantuvieron **reuniones** con distintos referentes sociales:

- Reunión 1: [Fecha: 11/12/2.014] – Inga. Lobo, Patricia; Decouvette, Esteban – En las instalaciones del CAPE.
- Reunión 2: [Fecha: 12/12/2.014] – Ing. Medina; Decouvette, Esteban – En las instalaciones de la División de Vialidad de la provincia de Catamarca – Con la finalidad de revisión de expediente.
- Reunión 3: [Fecha: 05/01/2.015] – Ing. Medina; Decouvette, Esteban – En las instalaciones de la División de Vialidad de la provincia de Catamarca – Con la finalidad de revisión de expediente.

Se realizaron **visitas** a puntos de interés, para identificar las estructuras existentes. Las mismas fueron realizadas:

- Visita 1: [Fecha: 16/01/2.015] – El Rodeo – Relevamiento obras realizadas sobre márgenes y cauce del río Ambato, posteriores a la inundación.
- Visita 2: [Fecha: 16/01/2.015] –El Rodeo – Relevamiento cartelera informativa, sobre zonas de riesgo en río Ambato.
- Visita 3: [Fecha: 20/01/2.015] –El Rodeo – Relevamiento crecida del río Ambato y Los Nogales.
- Visita 4: [Fecha: 21/01/2.015] –El Rodeo – Relevamiento de obras de arte y cauce de río Seco y Los Nogales.
- Visita 5: [Fecha: 24/01/2.015] –El Rodeo – Relevamiento crecidas de río Los Nogales.



2.5.1 Reuniones realizadas

2.5.1.1 Reunión 1. [11/12/2.014]

Se mantuvo una reunión con la Inga. Lobo en oficinas de la CAPE donde se le solicitaron datos que la Sub-secretaría de Recursos Hídricos pudiera brindar para el desarrollo de las actividades subsiguientes.

2.5.1.2 Reunión 2. [12/12/2.014]

El expediente fue llevado de mesa de entrada a la Dirección de Construcciones, por lo que se realizó una reunión con el jefe de departamento, el Ing. Medina, para corroborar la evolución de la solicitud realizada. Además, se mostraron los avances del informe hechos hasta ese momento.

2.5.1.3 Reunión 3. [05/01/2.015]

Se mantuvo nuevamente una reunión con el Ing. Medina, de la que se decidió elevar el expediente al Departamento de Estructuras, con la finalidad de obtener datos hidrológicos e hidráulicos, con los que se diseñan las estructuras.

2.5.2 Visitas de reconocimiento

2.5.2.1 Visita 1. [Fecha: 16/01/2.015]

Se realizó un recorrido a lo largo del cauce del río Ambato en la localidad de El Rodeo, dónde se reconocieron las obras de arte y estructuras existentes en el mismo; además se identificaron las acciones de conservación y mantenimiento del cauce que se han realizado, posterior a la crecida del 2.014. Ver de la Figura 12 a la Figura 17.

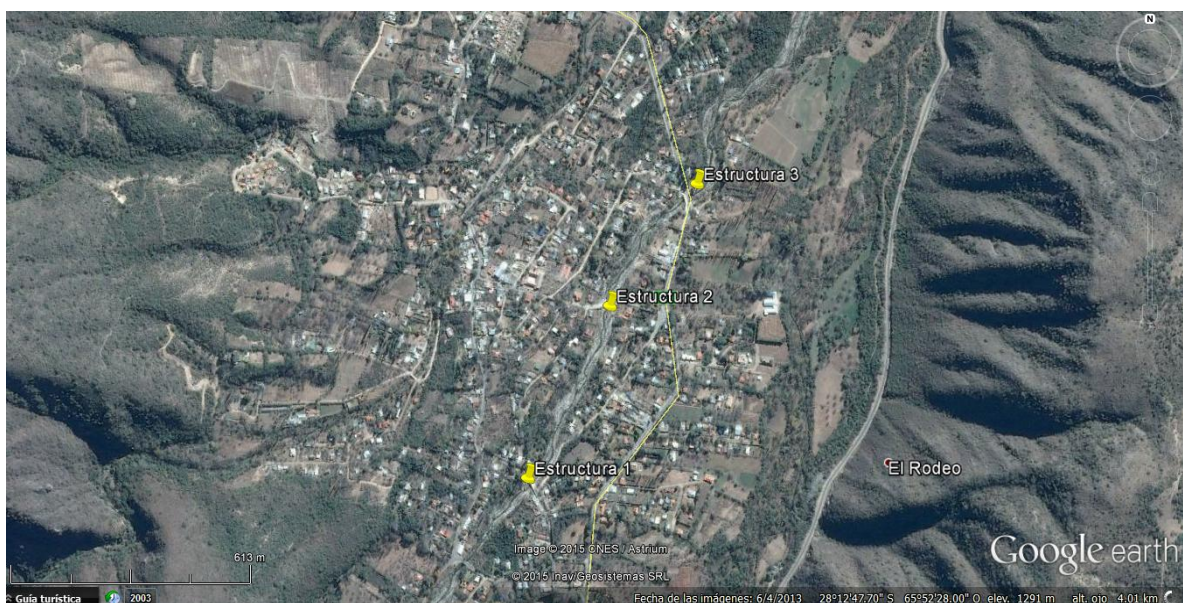


Figura 12. Localización en planta de obras de arte, identificadas sobre el cauce del río Ambato



Figura 13. Estructura 1: Puente próximo a la policía. Vista hacia aguas abajo (izq.). Vista hacia aguas arriba (der.)

En la Figura 13 y Figura 14, se observan la vista del puente próximo a la policía (Estructura 1) y las obras de protección de margen derecha, realizada con gaviones; además es de destacar la presencia de rocas de tamaño considerable. En la Figura 15 se destacan obras de limpieza y remoción de material depositado por las crecidas en el cauce del río. A este material se lo colocó en las márgenes del cauce.



Figura 14. Defensa de gavión realizada aguas abajo del puente próximo a la policía



Figura 15. Vista del cauce de Ambato, aguas debajo de antiguo puente arco, próximo a la farmacia

En la Figura 16 y Figura 17 se muestran vistas del cauce del río Ambato tomadas sobre el puente próximo al mástil (Estructura 2) y el puente de la ruta 4 sobre el río Ambato (Estructura 3):



Figura 16. Vista cauce Ambato, aguas abajo de puente próximo al mástil (Estructura 2)



Figura 17. Vista cauce Ambato, aguas arriba del puente de ruta 4 (Estructura 3)



2.5.2.2 Visita 2. [Fecha: 16/01/2015]

Se recorrieron las proximidades del río Ambato, donde se pudo identificar la presencia de cartelería de advertencia, en las zonas de potencial escurrimiento y/o inundación. Esto constituye una de las medidas adoptadas tras la crecida del 2.014. Ver de la Figura 18 a la Figura 22.



Figura 18. Carteles en zona del mástil, advierten posible vía de escurrimiento en caso de crecidas



Figura 19. Carteles sobre puente próximo al mástil y a puente de ruta 4 sobre río Ambato (Estructura 3), advierten potencial zona de inundación ante crecidas



Figura 20. Cartel en zona próxima a plaza de los niños, advierte zona de riesgo ante crecida



Figura 21. Cartel en zona del ex-camping municipal, prohíbe acampar



Figura 22. Cartel en calle dirección al ex-camping municipal, advierte posible vía escurrimiento en caso de crecidas

2.5.2.3 Visita 3. [Fecha: 20/01/2.015]

Se registraron dos crecidas de poca envergadura, capturando fotográficamente y con filmaciones los niveles de los ríos Ambato y Los Nogales, en puntos de particular interés. En la Figura 23 se muestra una fotografía tomada del río Ambato sobre el puente de la ruta 4; mientras que en la Figura 24, la correspondiente al río Los Nogales tomada sobre el puente de la ruta 4.



Figura 23. Crecida río Ambato, vista aguas arriba, sobre el puente de la ruta 4.



Figura 24. Crecida río Los Nogales, vista aguas arriba sobre el puente de ruta 4

2.5.2.4 Visita 4. [Fecha: 21/01/2.015]

Se recorrieron los cauces de los ríos Seco y Los Nogales a lo largo del pueblo, y se relevaron las obras de arte que cruzan a los mismos. En la Figura 25, se presentan una vista en planta de los sectores visitados sobre el río Los Nogales; y posteriormente, de la Figura 26 a la Figura 33, se muestran las vistas de las mismas.



Figura 25. Localización en planta de las estructuras visitadas sobre el río Los Nogales



Figura 26. Estructura 1: Puente próximo a hostería Chicha (vista hacia aguas arriba)

A lo largo del cauce del río Los Nogales se observaron obras de protección de los márgenes, principalmente en los tramos aguas arriba y/o aguas abajo de las obras de arte. También se destacan algunas intervenciones realizadas en viviendas particulares.



Figura 27. Protección márgenes aguas abajo de puente próximo a hostería Chicha (Estructura 1)



Figura 28. Protección de márgenes aguas abajo de puente próximos a hostería Chicha (Estructura 1)



Figura 29. Estructura 2: Puente frente a juzgado de paz (vista hacia aguas arriba)



Figura 30. Protección de margen aguas debajo de puente frente a juzgado de paz (Estructura 2)



Figura 31. Estructura 3: Puente próximo a Iglesia de la Candelaria (vista hacia aguas arriba)



Figura 32. Protección de márgenes aguas arriba del puente próximo a Iglesia de la Candelaria (Estructura 3)

El cauce del río Los Nogales resulta más angosto que el del Ambato, y en él se observó gran cantidad de vegetación, próximo al curso de agua.



Figura 33. Estructura 4: Puente de ruta 4 sobre río Los Nogales (vista hacia aguas arriba)

A continuación se exponen en la Figura 34 una vista en planta de las estructuras visitadas sobre el río Seco; y posteriormente de la Figura 35 a la Figura 40 se exponen vistas de las mismas y del cauce del río.



Figura 34. Localización en planta de estructuras visitadas sobre el río Seco

En la Figura 35 se observa el vado, camino al polideportivo.



Figura 35. Estructura 1: Vado camino a polideportivo (sentido de escurrimiento derecha – izquierda)



Figura 36. Cauce río Seco, aguas arriba de vado camino a polideportivo (Estructura 1).



Figura 37. Estructura 2: Alcantarilla faldeo al Cristo (vista desde aguas arriba)

La Estructura 2 cuenta con gaviones aguas arriba y aguas abajo, como se observa en la Figura 38.



Figura 38. Protección de márgenes aguas abajo de alcantarilla faldeo al Cristo (Estructura 2).



Figura 39. Cauce río Seco, aguas abajo de alcantarilla faldeo al Cristo (Estructura 2)



Figura 40. Cauce río Seco, al ingreso de El Rodeo (vista aguas arriba)



2.5.2.5 Visita 5. [Fecha: 24/01/2.015]

Se registró mediante video filmaciones y fotografía en esta fecha, una importante crecida del río Los Nogales. A continuación, en la Figura 41, se muestra lo registrado.



Figura 41. Vista aguas arriba cauce río Los Nogales en puente próximo a Iglesia de la Candelaria (Estructura 3)

2.6 Definición de áreas de vacancia en relación a aspectos hidrológicos

Existen observaciones instantáneas de caudales en algunos sitios en la cuenca de Ambato entre el 2.002 y el 2.007. Sin embargo es de destacar que no se aforó durante las crecidas, valores que resultarían de interés, y que los datos mostrados corresponden solamente a una única medición en el mes. Además hay una importante discontinuidad en las mediciones como se puede observar en la Tabla 2 y

Tabla 3.

Tabla 2. Aforos medidos en el río Ambato o El Rodeo- Villa El Rodeo

| Río: El Rodeo ó Ambato | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Localidad: Villa El Rodeo | | | | | | | | | | | | |
| Lugar: 50 m aguas arriba de la Toma | | | | | | | | | | | | |
| Cuenca del Valle Central | | | | | | | | | | | | |
| año | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP. | OCT. | NOV. | DIC. |
| 2002 | | | | | | | | | | 0.12 | 0.108 | 0.638 |
| 2003 | 1.2 | 0.45 | | 0.564 | 0.498 | 0.391 | | | | | | |
| 2004 | | | | | | | | | | | 0.325 | |
| 2005 | | | | | 0.225 | | 0.175 | 0.165 | 0.195 | 0.239 | 0.35 | |
| 2006 | | | | | | | | | | | | |
| 2007 | | crecido | | - | 0.25 | | | | | | | |



Tabla 3. Aforos medidos en el río Ambato o El Rodeo- La Puerta

| año | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP. | OCT. | NOV. | DIC. |
|------|------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-----|-------|------|---------|-------|
| 2002 | | | | | | | | | | 0.36 | 0.458 | 1.134 |
| 2003 | 1.35 | 0.794 | | 0.98 | 0.769 | 0.772 | | | | | | |
| 2004 | | | | | | | | | | | | |
| 2005 | | | | | | | | | | | | |
| 2006 | | | | | 0.398 | | 0.382 | - | 0.316 | - | crecido | |
| 2007 | | - | | - | 0.405 | | | | | | | |

Por estas razones los datos de los aforos sobre el río Ambato carecen de utilidad.

Los ríos Los Nogales, Seco, Saujil y Siján no poseen registro de mediciones de caudales.

Por todo lo mencionado anteriormente se determina como un área de vacancia la falta de datos de caudales sobre los ríos de interés.

Sin estos datos no se pueden determinar los mapas de inundación correspondientes a cada río, necesarios para la realización del proyecto. Para cubrir esta vacancia de falta de una serie histórica de caudales, las soluciones pueden ser por un lado realizar mediciones in situ, o hacer una modelación hidrológica mediante el uso de herramientas informáticas.

2.7 Metodología para la modelación hidrológica

En este trabajo se utilizará una metodología de modelación hidrológica a partir de una transformación lluvia-caudal. La misma consiste en predecir y simular los caudales con base en una conceptualización que represente en forma simplificada los procesos físicos en la cuenca: infiltración, evaporación, flujo superficial y flujo subterráneo, para un evento de lluvia determinada.

Existen diversas metodologías para efectuar este procedimiento. En el presente informe se seguirá una serie de pasos que se resumen a continuación:

- Delimitación de las cuencas de cada uno de los ríos. Una vez definidos estos límites se obtiene, con ayuda de las herramientas informáticas, los parámetros morfométricos como la longitud de cauces principales, áreas y pendientes.
- Regionalización de caudales previa. Mediante registros históricos de caudales en una cuenca cercana, se verifica homogeneidad con cuencas de estudio y se realiza una regionalización de caudales para poder validar posteriormente el modelo hidrológico.
- Determinación de los parámetros hidrológicos básicos necesarios para la modelación hidrológica. Estos parámetros hidrológicos básicos son: tiempo de concentración (t_c) y de



retardo (t_r), lluvia de diseño, CN e infiltración inicial (I_a). Finalmente se selecciona el procedimiento utilizado para transitar los caudales.

- Con los parámetros calculados, se realiza la modelación hidrológica con ayuda de herramientas informáticas, obteniendo así los caudales de diseño. Para ello se plantean diferentes escenarios hidrológicos.

Dentro del proceso de transformación lluvia-caudal descrito, la herramienta informática utilizará el Método de las Abstracciones del SCS (Ver Capítulo 5) para determinar la porción de la precipitación que escurre superficialmente, y el Método del Hidrograma Unitario (Ver Capítulo 6) para la construcción de los hidrogramas finales.

2.7.1 Herramientas informáticas específicas

Para llevar a cabo la modelación hidrológica planteada para este trabajo se recurrió al uso de programas informáticos específicos, realizando un entrenamiento previo en los mismos para aprender su funcionamiento. Los software utilizados se describen a continuación.

2.7.1.1 *Global Mapper*

Global Mapper es un paquete software de sistema de información geográfica (SIG) que maneja datos vectoriales, raster y elevación, y proporciona la visión, la conversión y otras funcionalidades generales SIG.

2.7.1.2 *IDRISI*

Brinda una colección de más de 200 módulos que proveen utilidades para la entrada, visualización y análisis de datos geográficos y de sensores remotos. Estos datos geográficos se describen en forma de capas de mapas o capas temáticas; debido a que pueden ser de distintos tipos, IDRISI incorpora las dos formas básicas de capas temáticas: capas de imágenes raster y de imágenes vectoriales. Además, el software ofrece un sistema completo de procesamiento de imágenes para los datos de imágenes captados por sensores remotos, como resultado, éste es comúnmente descrito como un sistema raster. Sin embargo, sí ofrece fuertes capacidades para el análisis de datos de atributos vectoriales, así como también rápidas capacidades de conversión de vector a raster. Entonces, el sistema brinda un poderoso juego de herramientas para el análisis geográfico que requieren ambos tipos de capas temáticas.

2.7.1.3 *HEC-HMS*

El mismo fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center y está diseñado para simular el proceso de precipitación-escurrimiento en cuencas. Puede ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un extenso espectro de problemas. Posibilita además,



cálculos en pequeñas cuencas urbanas o en grandes cuencas sin intervención. Los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, etc.

En una simulación se calcula la respuesta (caudales) de una cuenca para una precipitación determinada.

2.7.1.4 AutoCad

AutoCAD es un software de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) utilizado para dibujo 2D y modelado 3D.

2.7.1.5 Google Earth

Google Earth es un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital.

El mapa de Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por imágenes satelitales, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos creados por computadora.



CAPITULO 3

3 CAPITULO 3.- Delimitación de las cuencas de estudio

3.1 Introducción

En este capítulo se expone el procedimiento realizado para la delimitación de cada una de las cuencas y la determinación de sus parámetros morfométricos y otras características.

3.2 Modelo Digital de Elevaciones

Para la modelación de las cuencas se partió de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) de la zona de estudio.

Un DEM es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud (cota) con respecto al nivel medio del mar, de la superficie del terreno, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Cabe destacar que la naturaleza digital y simbólica de los DEM permite una elevada precisión en la descripción de los procesos, pero no garantiza la exactitud de los resultados.

A continuación, en la Figura 42 se muestra el DEM obtenido para la zona de estudio.

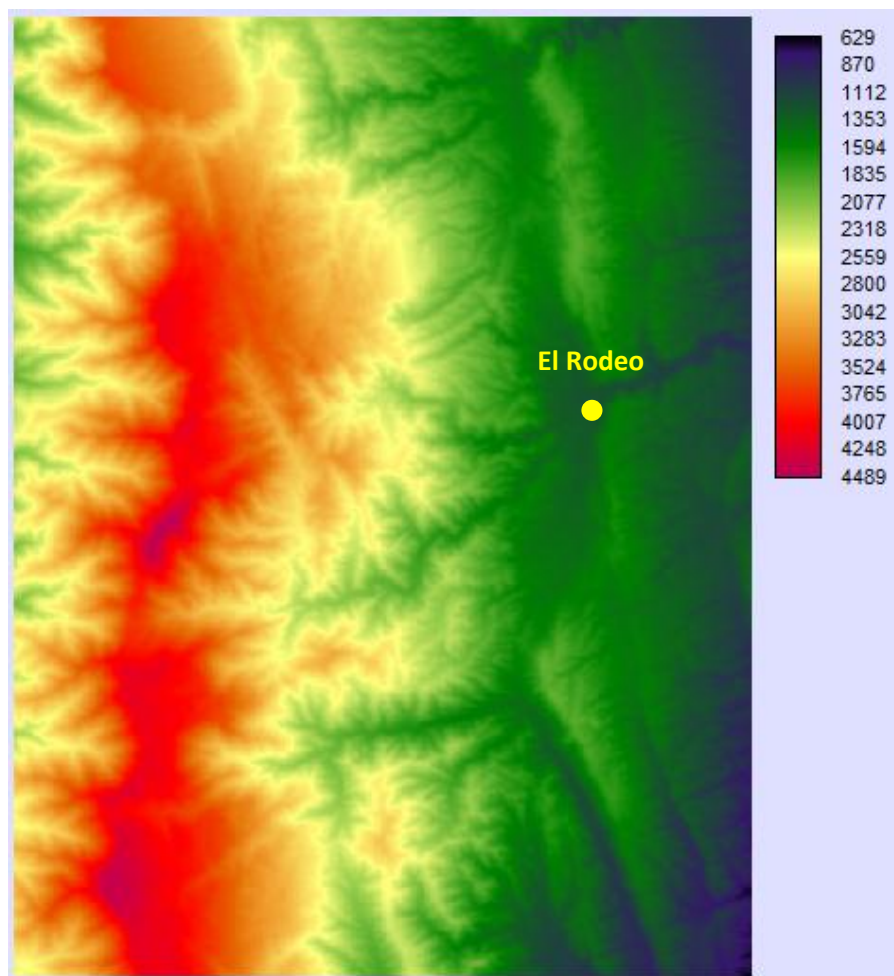


Figura 42. DEM lado Oriental de Sierras de Ambato

El DEM utilizado (Figura 42) se obtuvo de la base de datos *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, el cual es un instrumento de imagen a bordo de Terra, un satélite del Sistema de Observación de la Tierra (EOS por sus siglas en inglés) de la NASA.

3.3 Delimitación de cuencas y sub-cuencas

Una vez obtenidos los DEM correspondientes, se realizó la delimitación de las cuencas de cada uno de los ríos de interés. Para esto se utilizó como herramienta el programa IDRISI.

Se asignó al programa como dato de entrada el DEM correspondiente y luego, asignando un valor mínimo de área de cuenca requerido, se obtuvieron todas las sub-cuencas. Con las sub-cuencas delimitadas, se procedió a determinar los parámetros de cada una ellas.

3.4 Parámetros de las sub-cuencas

Se exportaron a Google Earth las sub-cuencas delimitadas con IDRISI, donde se trazaron los cauces principales de cada río. Los puntos de cierre de cada cuenca se establecieron en localizaciones de interés geomorfológico.

En la siguiente figura se muestra la subdivisión de la cuenca Ambato con su cauce principal.

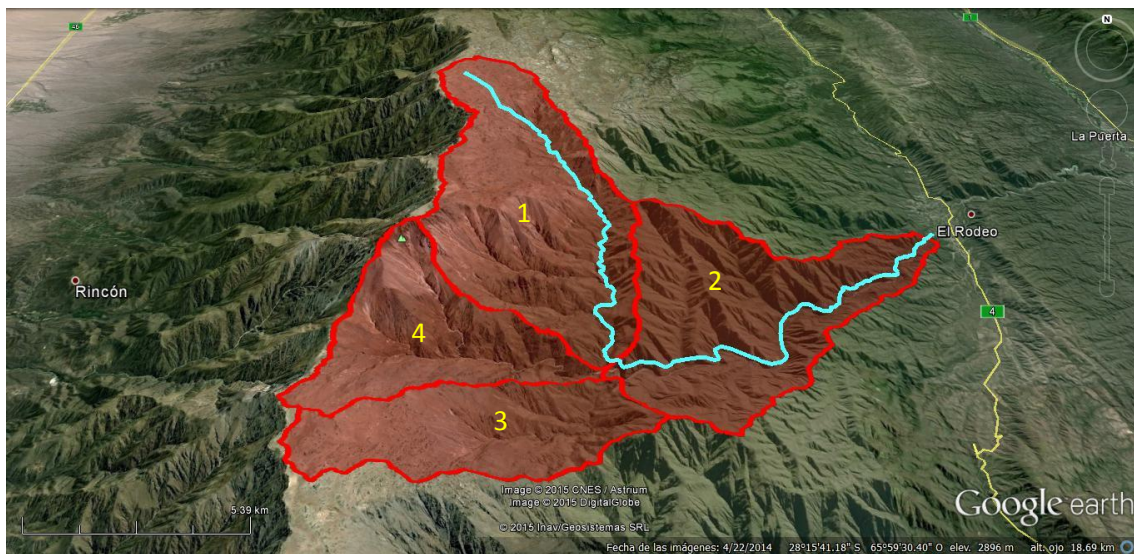


Figura 43. Cuenca del río Ambato con el cauce principal las respectivas sub-cuencas

Tal como se puede visualizar en la Figura 43, la cuenca del río Ambato quedó subdividida en cuatro sub-cuencas.

El punto de cierre de la misma fue ubicado en un nodo crítico, donde existe un potencial peligro de desvío del cauce, a la salida del cono aluvial. De esta manera se podrá determinar para qué caudales se produciría este fenómeno.

La cuenca del río Los Nogales quedó dividida en cinco sub-cuencas tal como se aprecia en la Figura 44.



Figura 44. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Los Nogales

En este caso el punto de cierre se fijó en el punto de medición del río utilizado por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca, ubicado sobre alcantarilla de Ruta Nº 4.

Además, los problemas de desborde del mismo se encuentran aguas abajo de este punto.

En la Figura 45 se muestra la subdivisión de la cuenca del río Seco y su cauce principal.

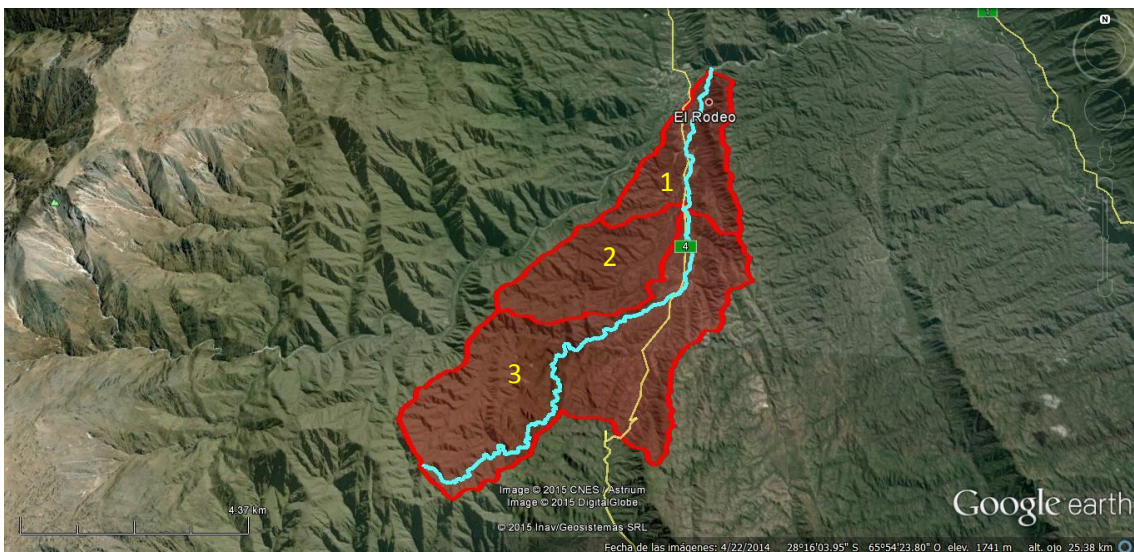


Figura 45. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Seco

Del río Seco (Figura 45), al igual que en los ríos Siján (Figura 46) y Saujil (Figura 47), se delimitaron 3 sub-cuencas.

Para el río Seco el punto de cierre se fijó en la unión de éste con los ríos Ambato y Los Nogales, ya que el mismo no presenta brazos de desborde previos y sólo produce inundación por elevación de cota.

La Figura 47 muestra la subdivisión de la cuenca Siján y su cauce principal.

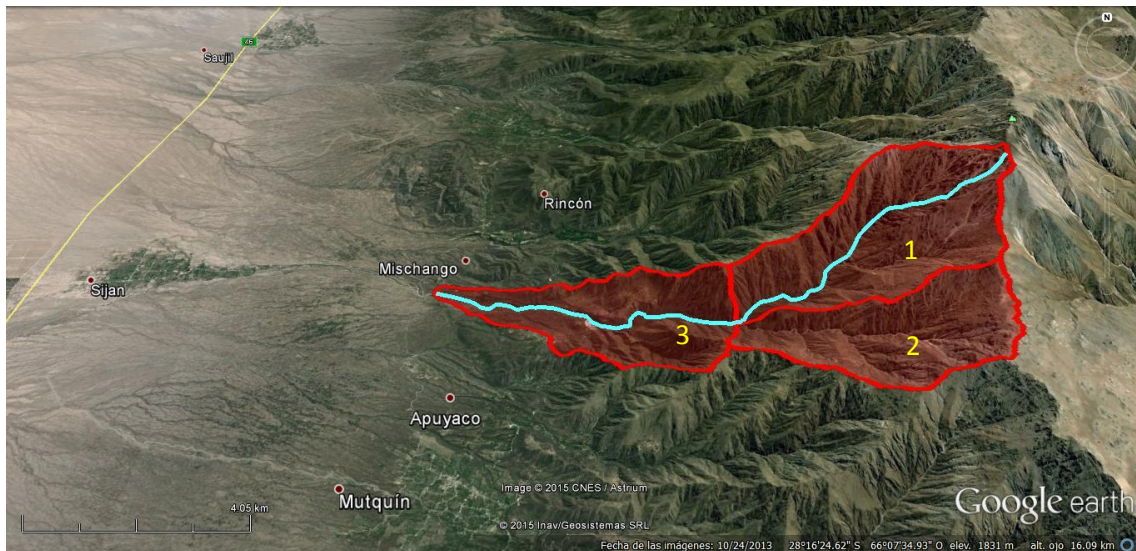


Figura 46. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Siján

El punto de cierre se fijó unos 5Km aguas arriba del poblado de Siján ya que a partir de este punto el relieve se vuelve más plano y el flujo puede derivar en múltiples cauces.

La Figura 47 muestra la subdivisión de la cuenca del río Saujil y su cauce principal.

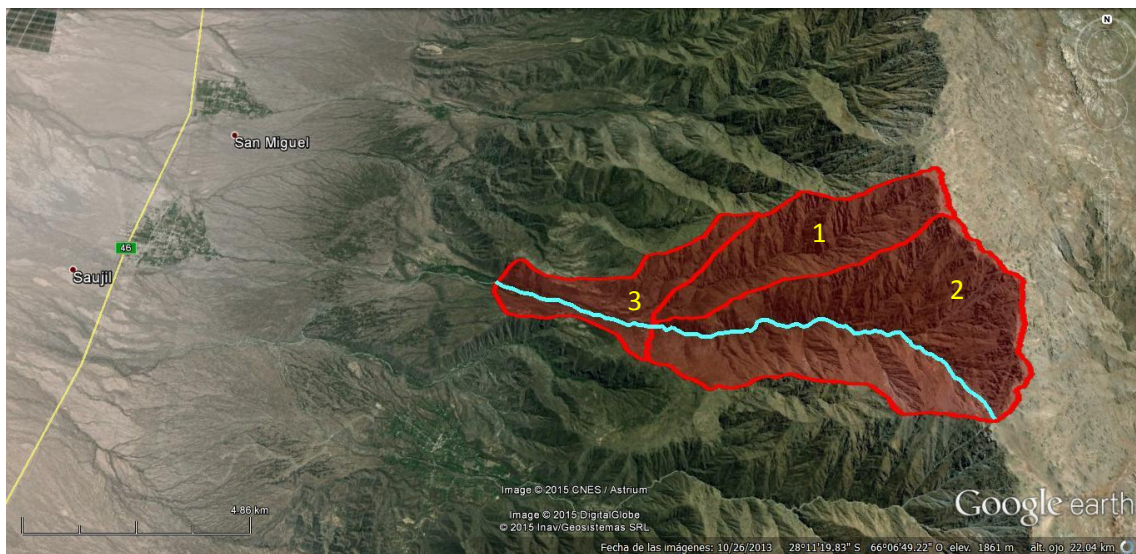


Figura 47. Cuenca con las respectivas sub-cuencas y cauce principal de río Saujil

El punto de cierre del río Saujil se determinó con el mismo criterio que el de Siján.

Por otra parte, a través de Google Earth (ver Figura 48 a modo de ejemplo) se determinaron para cada sub-cuenca las pendientes medias de los cauces principales, sus longitudes y, utilizando AutoCad, se obtuvieron las áreas correspondientes.

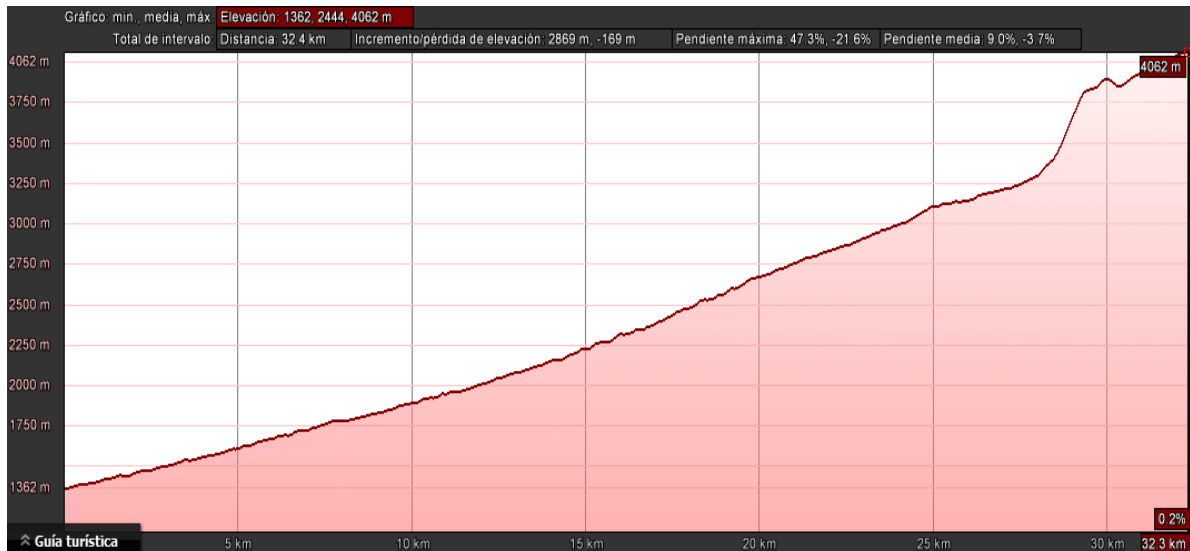


Figura 48. Datos del perfil transversal del cauce principal del río Ambato obtenido en Google Earth.

A continuación se muestra una tabla resumen con toda la información:

Tabla 4. Parámetros morfológicos de las cuencas y sub-cuencas

| Cuenca | | Área [km ²] | Longitud [Km] | Cota max [msnm] | Cota min [msnm] | ΔH [Km] | Pendiente % |
|-------------|-------------|-------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Ambato | Subcuenca 1 | 55,72 | 17,30 | 4058,00 | 2271,00 | 1,79 | 10,33 |
| | Subcuenca 2 | 45,01 | 20,00 | 3161,00 | 1362,00 | 1,80 | 9,00 |
| | Subcuenca 3 | 17,57 | 10,00 | 4152,00 | 2228,00 | 1,92 | 19,24 |
| | Subcuenca 4 | 21,14 | 10,00 | 4157,00 | 2271,00 | 1,89 | 18,86 |
| | Total | 139,44 | 32,40 | 4059,00 | 1362,00 | 2,70 | 8,90 |
| Los Nogales | Subcuenca 1 | 4,89 | 5,34 | 1532,00 | 1258,00 | 0,27 | 5,13 |
| | Subcuenca 2 | 5,02 | 6,53 | 2634,00 | 1531,00 | 1,10 | 16,89 |
| | Subcuenca 3 | 13,46 | 12,90 | 3223,00 | 1531,00 | 1,69 | 13,12 |
| | Subcuenca 4 | 14,89 | 8,89 | 3636,00 | 2253,00 | 1,38 | 15,56 |
| | Subcuenca 5 | 4,96 | 4,42 | 3314,00 | 2232,00 | 1,08 | 24,48 |
| | Total | 43,22 | 22,00 | 3635,00 | 1258,00 | 2,38 | 10,80 |
| Seco | Subcuenca 1 | 9,68 | 7,60 | 1595,00 | 1224,00 | 0,37 | 4,88 |
| | Subcuenca 2 | 9,65 | 8,73 | 2287,00 | 1362,00 | 0,93 | 10,60 |
| | Subcuenca 3 | 27,13 | 15,20 | 2583,00 | 1364,00 | 1,22 | 8,02 |
| | Total | 46,46 | 20,70 | 2577,00 | 1224,00 | 1,35 | 6,54 |
| Siján | Subcuenca 1 | 12,26 | 7,17 | 4456,00 | 2084,00 | 2,37 | 33,08 |
| | Subcuenca 2 | 9,56 | 6,08 | 4032,00 | 2089,00 | 1,94 | 31,96 |
| | Subcuenca 3 | 10,27 | 7,06 | 2084,00 | 1443,00 | 0,64 | 9,08 |
| | Total | 32,09 | 14,00 | 4451,00 | 1443,00 | 3,01 | 21,49 |
| Saujil | Subcuenca 1 | 7,82 | 7,71 | 4123,00 | 1965,00 | 2,16 | 27,99 |
| | Subcuenca 2 | 18,44 | 8,89 | 4124,00 | 1973,00 | 2,15 | 24,20 |
| | Subcuenca 3 | 6,08 | 3,77 | 1975,00 | 1580,00 | 0,40 | 10,48 |
| | Total | 32,34 | 12,60 | 4124,00 | 1578,00 | 2,55 | 20,21 |



3.5 Suelo y Vegetación

La caracterización del suelo y la vegetación fue obtenida del informe del I.N.A y citada en el apartado 2.4.2.6.



CAPITULO 4

4 CAPITULO 4.- Regionalización de caudales

4.1 Introducción

En este capítulo, y previo a realizar la modelación hidrológica que se propuso como objetivo del trabajo, se realiza un análisis sobre los caudales medidos por un periodo de tiempo prolongado en las cercanías del poblado de Andalgalá, Catamarca. Mediante este análisis se buscará relacionar los caudales específicos obtenidos en el mencionado poblado con los que se obtengan de la modelación en las localidades de interés, para así poder validar el modelo con datos reales provenientes de mediciones.

4.2 Análisis estadístico sobre estación de aforo Andalgalá

Para validar el modelo de transformación lluvia-caudal utilizado en este trabajo, se realizó un análisis de frecuencia a una serie histórica de caudal existente en un punto de aforo cercano a las cuencas de estudio (ya que no existían datos en las mismas). A través de un análisis de las características morfométricas de las cuencas (área, perímetro, pendiente, vegetación, longitudes de cauces) se obtuvieron factores que permitieron realizar una comparación y determinar que las cuencas de estudio son homogéneas a la cuenca que contiene el punto de aforo anteriormente mencionado. Los datos de este punto fueron recopilados de la base de datos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. El punto de aforo analizado es:

- Andalgalá - Andalgalá: Latitud: 27°30'60"S Longitud: 66°17'60"O

En la Figura 49 se muestra la ubicación de la cuenca de Andalgalá con respecto a las de estudio.



Figura 49. Ubicación cuenca Andalgalá con respecto a cuencas de estudio

En la siguiente figura se muestra la ubicación del punto donde se recopiló la serie de caudales con su respectiva área de aporte:



Figura 50. Ubicación de estación con su respectiva área de aporte

Tal como se puede visualizar en la figura anterior, el punto de aforo está convenientemente ubicado para poder realizar el estudio que aquí se presenta y será de suma utilidad para la validación del modelo de transformación lluvia caudal que se busca realizar.

La metodología con la cual se analizó la serie de caudales fue la siguiente:

- 1- Se realizaron sobre la serie de caudales las diferentes pruebas estadísticas (detección de presencia de datos atípicos, independencia, homogeneidad y estacionalidad).
- 2- Se calcularon los datos estadísticos más importantes de las series anuales de máximos: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar.
- 3- Se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato máximo anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull en cada estación.
- 4- Luego dichos datos se ajustaron a las 6 funciones de distribución de probabilidad (FDP) teóricas siguientes:
 - GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
 - Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
 - LogNormal (Método de Máxima Verosimilitud).
 - GEV (Método de Momentos).
 - Gumbel (Método de Momentos).
 - Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

Sobre cada uno de los ajustes a las diferentes funciones de distribución de probabilidad utilizadas se realizó la prueba de adecuación de Chi Cuadrado para determinar cuál es la que mejor ajusta.

4.2.1 Procesamiento de datos

La serie de caudales de Andalgalá - Andalgalá cuenta con 32 años de datos que van desde 1.920 a 1.959; y existen lagunas de información entre los años 1.923-1.927 y 1.951-1.957. En la Figura 51 se muestra la serie de caudales máximos anuales de la serie analizada:

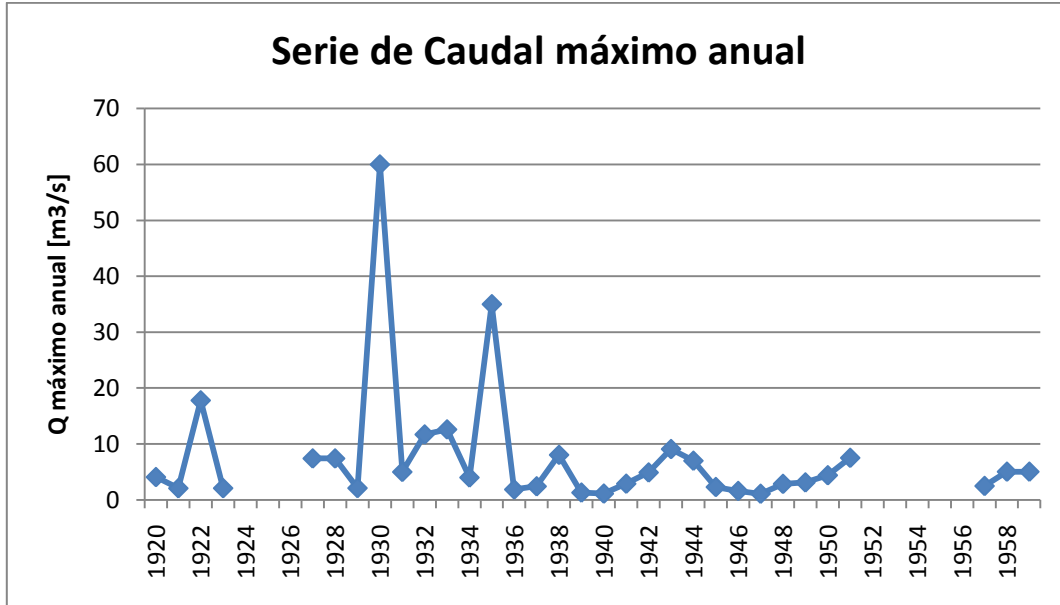


Figura 51. Serie de caudales máximos anuales en la estación Andalgalá - Andalgalá

De la última figura puede visualizarse que si bien los datos de caudal son anteriores al año 1.959; se puede usar esta serie para validar los modelos de transformación lluvia caudal ya que en las cuencas en estudio no se observaron cambios en el uso de suelo hasta la actualidad.

Al realizar la prueba de detección de presencia de datos atípicos, se descartaron los dos valores de caudal superiores ($60 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente al año 1.930 y $35 \text{ m}^3/\text{s}$ al año 1.935). Finalmente, la serie utilizada para la realización del análisis de estadística inferencial es la que se muestra en la Figura 52.

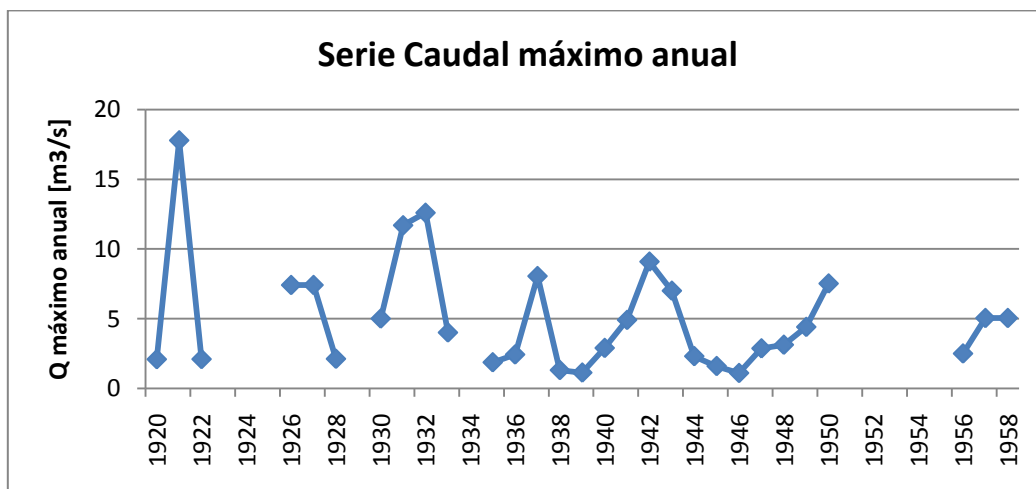


Figura 52. Serie de caudales máximos anuales en la estación Andalgalá - Andalgalá que superó la prueba de detección de presencia de datos atípicos.

De la última figura se infiere que el máximo valor de caudal medido en la serie es de $17.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y corresponde al año hidrológico 1.922. Al realizarle el análisis de frecuencia a la serie de la estación de aforo, esta pasó las diferentes pruebas estadísticas y la FDP que mejor describió la muestra fue la Lognormal por el método de máxima verosimilitud.

4.2.2 Resultados de análisis estadístico

En la Figura 53 se aprecia la relación entre caudales máximos diarios y el tiempo de retorno.

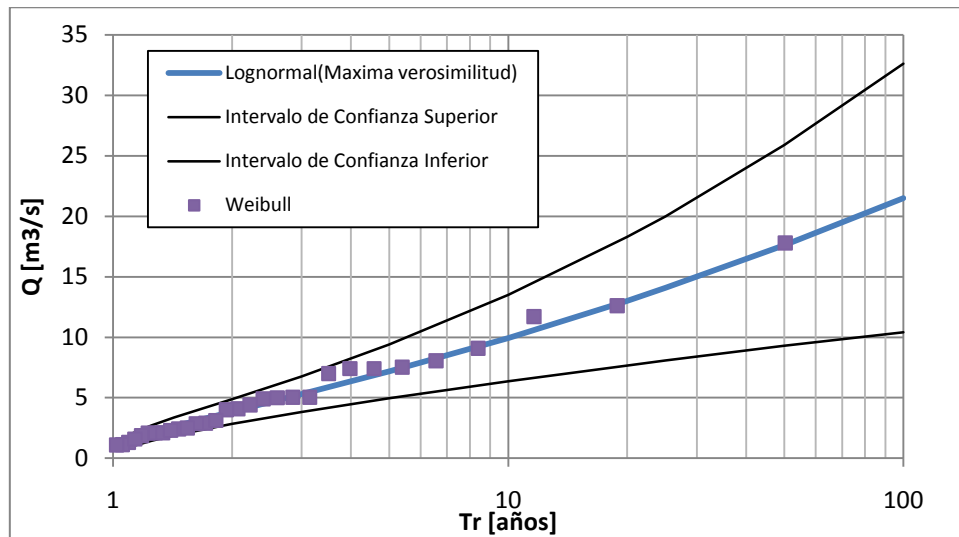


Figura 53. Relación entre Q y Tr en la estación Andalgala - Andalgala.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y el caudal en el punto de aforo se puede ver que la FDP Teórica Lognormal por el método de ajuste de máxima verosimilitud ajusta muy bien con los de la FDP empírica de Weibull.

Además se calcularon los intervalos de confianza (95%), observando que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace, y este grado de incertidumbre a su vez está relacionado con la longitud de la serie de la muestra (a mayor cantidad de datos, es menor es el intervalo de confianza). Se puede ver que para una recurrencia de 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo sobre el medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 52%, para 50 años es del 47%, para 25 años es del 42% y para 10 años es del 36%.

En el punto de aforo Andalgala - Andalgala la relación entre el caudal (Q) y el tiempo de retorno (Tr) es la que se muestra en la Tabla 5. Conociendo que el área de aporte de la cuenca hasta ese lugar es de 3.94 km^2 , se calcularon las relaciones existentes entre el caudal y el área de aporte (caudales específicos):



Tabla 5. Relación Q – T en Andalgalá - Andalgalá y valores de caudal específico para los distintos Tr

| Tr [años] | Q Andalgalá – Andalgalá [m ³ /s] | Q/A [m ³ /s.km ²] |
|-----------|---|--|
| 100 | 21.50 | 5.46 |
| 50 | 17.60 | 4.47 |
| 25 | 14.10 | 3.58 |
| 10 | 9.94 | 2.52 |

4.3 Resultados de la regionalización

Partiendo de los caudales de la Tabla 5 y los caudales específicos que allí se estimaron; y conociendo las áreas de aporte hasta los puntos de interés en nuestro estudio, se calcularon los caudales asociados a diferentes recurrencias en los mismos. Los resultados se muestran de la Tabla 6 a la Tabla 10.

Tabla 6. Caudales en la cuenca Ambato.

| Ambato | | | |
|-----------------------------------|-----|--|------------------------------|
| Área de aporte [km ²] | 139 | Q/A [m ³ /s.km ²] | Caudales [m ³ /s] |
| Tr [años] | 100 | 5,46 | 761 |
| | 50 | 4,47 | 623 |
| | 25 | 3,58 | 499 |
| | 10 | 2,52 | 351 |

Tabla 7. Caudales en la cuenca Los Nogales

| Los Nogales | | | |
|-----------------------------------|-------|--|------------------------------|
| Área de aporte [km ²] | 43,22 | Q/A [m ³ /s.km ²] | Caudales [m ³ /s] |
| Tr [años] | 100 | 5,46 | 236 |
| | 50 | 4,47 | 193 |
| | 25 | 3,58 | 155 |
| | 10 | 2,52 | 109 |



Tabla 8. Caudales en la cuenca Seco

| Seco | | | |
|-----------------------------------|-------|--|------------------------------|
| Área de aporte [km ²] | 46,47 | Q/A [m ³ /s.km ²] | Caudales [m ³ /s] |
| Tr [años] | 100 | 5,46 | 254 |
| | 50 | 4,47 | 208 |
| | 25 | 3,58 | 166 |
| | 10 | 2,52 | 117 |

Tabla 9. Caudales en la cuenca Saujil

| Saujil | | | |
|-----------------------------------|-------|--|------------------------------|
| Área de aporte [km ²] | 32,34 | Q/A [m ³ /s.km ²] | Caudales [m ³ /s] |
| Tr [años] | 100 | 5,46 | 177 |
| | 50 | 4,47 | 145 |
| | 25 | 3,58 | 116 |
| | 10 | 2,52 | 81 |

Tabla 10. Caudales en la cuenca Siján

| Siján | | | |
|-----------------------------------|-------|--|------------------------------|
| Área de aporte [km ²] | 32,10 | Q/A [m ³ /s.km ²] | Caudales [m ³ /s] |
| Tr [años] | 100 | 5,46 | 175 |
| | 50 | 4,47 | 143 |
| | 25 | 3,58 | 115 |
| | 10 | 2,52 | 81 |

Con los caudales expuestos en las anteriores tablas se deben validar los modelos de cada cuenca y para los distintos periodos de retorno, observando que en ambos casos los caudales resulten similares.



CAPITULO 5



5 CAPITULO 5.- Parámetros hidrológicos básicos

5.1 Introducción

En este capítulo se explica el método de las abstracciones del SCS (utilizado en el HEC-HMS para la modelación hidrológica), el cual permitirá diferenciar la lluvia de escorrentía directa de la infiltrada, y la metodología llevada a cabo para la determinación de los parámetros hidrológicos básicos necesarios para la aplicación de este método. Los parámetros hidrológicos básicos son: tiempo de concentración (t_c) y de retardo (t_r), lluvia de diseño, CN e infiltración inicial (I_a). Finalmente se explica el procedimiento utilizado para la elección del método de tránsito a utilizar.

5.2 Método de las abstracciones del SCS

El HEC-HMS utiliza para la modelación hidrológica el Método de las abstracciones del SCS con el fin de diferenciar la fracción de la precipitación que produce escorrentía superficial de la que se infiltra.

Ante un evento de lluvia, la altura de la lámina de exceso de precipitación, o precipitación efectiva (P_e) es siempre menor o igual a la altura de la lámina de precipitación total (P); de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca (F_a) es menor o igual a alguna retención potencial máxima (S). Existe una cierta cantidad de precipitación (I_a), definida como la abstracción inicial antes del encharcamiento, para la cual no ocurrirá escorrentía. La hipótesis del método de las abstracciones del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando ambas se obtiene la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación del método SCS:

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

Para llevar a cabo todo este proceso resulta necesario obtener:

- Tiempo de concentración (t_c); necesario para determinar lluvia de diseño.
- Lluvia de diseño sobre cada una de las cuencas (P).
- Numero de Curva (CN); necesario para calcular la infiltración inicial (I_a) y la retención potencial máxima (S).

Para obtener los parámetros hidrológicos básicos mencionados anteriormente se utilizarán los parámetros morfométricos obtenidos en el Capítulo 3. Estos son:



- Pendiente
- Área
- Longitud de cauce principal
- Cotas

5.3 Tiempo de concentración (tc)

El tiempo de concentración de una cuenca se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la misma estén aportando agua de escorrentía al punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado.

Se tuvieron en cuenta diversos métodos de cálculo para obtener el tiempo de concentración:

- Kirpich

$$t_c = 0.0078 L^{0.77} S^{-0.385}$$

tc= tiempo de concentración [min]

L=Longitud de cauce principal [ft]

S=Pendiente media [ft/ft]

- SCS

$$t_c = 0.01947(K)^{0.77}$$

$$K = 3.3 L \sqrt{S}$$

tc= tiempo de concentración [min]

L=Longitud de cauce principal [m]

S=Pendiente media m/m

K= [Km]

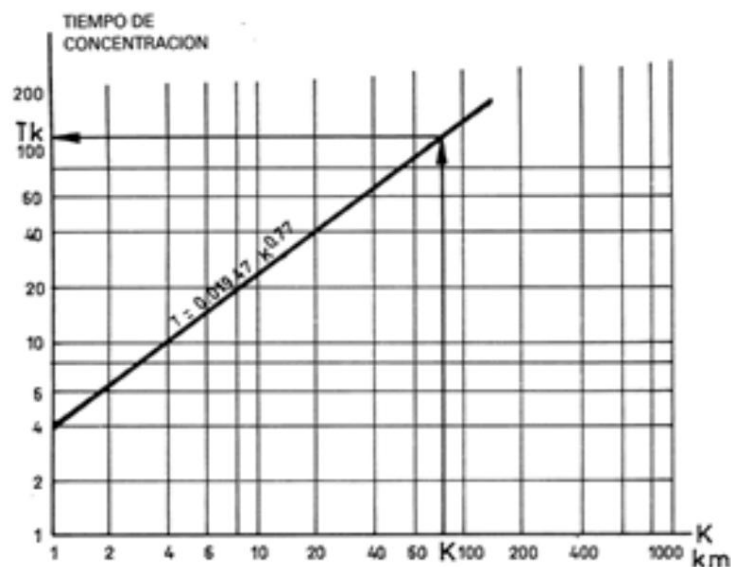


Figura 54. Gráfico para ecuación del SCS



➤ Ventura-Heras

$$t_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{S}$$

$$\alpha = L/\sqrt{A} \quad 0.05 \leq \alpha \leq 0.5$$

t_c = tiempo de concentración [horas]

A=área de la cuenca [Km^2]

L=Longitud de cauce principal [Km]

S=Pendiente media [%]

➤ Passini

$$t_c = \alpha \frac{(AL)^{1/3}}{S^{0.5}}$$

$$\alpha = L/\sqrt{A}$$

t_c = tiempo de concentración [horas]

A=área de la cuenca [Km^2]

L=Longitud de cauce principal [Km]

S=Pendiente media [%]

➤ Giandotti

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad \text{siempre que } L/3600 \geq t_c \geq (L/3600 + 1.5)$$

t_c = tiempo de concentración [horas]

A=área de la cuenca [Km^2]

L=Longitud de cauce principal [Km]

H= cota máxima del cauce principal [m]

➤ California Culverts Practice

$$t_c = 60 \left[\frac{11,9 \left[\frac{L}{1,61} \right]^3}{3,28 H} \right]^{0,385}$$

t_c = tiempo de concentración [horas]

L=Longitud de cauce principal [Km]

H= Diferencia entre divisoria de agua y salida de la cuenca [m]

Ninguno de estos métodos proporcionará el valor teórico exacto del t_c que se busca ya que cada uno fue calibrado bajo condiciones particulares de una determinada cuenca, que difiere de una u otra manera de las de interés para este trabajo.



Los números arrojados por estos métodos se mostraron muy distintos en algunos casos. Los mismos pueden ser observados en la siguiente tabla donde, a modo de ejemplo, se presentan los valores calculados para el Ambato considerándolo como una única cuenca general:

Tabla 11. t_c para la cuenca de Ambato

| Método | t_c [min] |
|------------------------------|-------------|
| SCS | 57 |
| Kirpich | 151 |
| Ventura- Heras | 40 |
| Passini | 43 |
| Giandotti | 48 |
| California Culverts Practice | 147 |

El paso siguiente es determinar cuál de todos estos métodos resulta más representativo para los casos de estudio; y para definir esto se siguió el siguiente razonamiento:

En los ríos de pendiente acentuada (como son los de montaña de este estudio), durante las crecientes de los mismos se alcanzan velocidades máximas del flujo del orden de 3 m/s. Utilizando este orden de magnitud es que se evaluaron los tiempos de concentración de cada sub-cuenca analizada. De cada sub-cuenca, conociendo la longitud del cauce principal y los tiempos de concentración arrojados por las diferentes formulas se puede estimar una velocidad media del flujo, la cual debería estar en el orden de magnitud del valor anteriormente mencionado.

En el caso del ejemplo de la cuenca Ambato, con la longitud del cauce principal de cada sub-cuenca y la cuenca total, se obtuvieron las velocidades medias de flujo para cada método mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12. Velocidades obtenidas según los t_c arrojados por los distintos métodos

| Cuenca | Longitud [Km] | SCS | Kirpich | Ventura-Heras | Passini | Giandotti | California Culverts Practice | |
|--------|---------------|---------|---------|---------------|---------|-----------|------------------------------|------|
| | | V [m/s] | V [m/s] | V [m/s] | V [m/s] | V [m/s] | V [m/s] | |
| Ambato | Subcuenca 1 | 17,30 | 7,79 | 3,28 | 13,11 | 12,01 | 9,30 | 3,35 |
| | Subcuenca 2 | 20,00 | 8,33 | 3,21 | 15,15 | 13,33 | 11,90 | 3,30 |
| | Subcuenca 3 | 10,00 | 5,38 | 3,70 | 23,81 | 16,67 | 9,80 | 3,79 |
| | Subcuenca 4 | 10,00 | 5,38 | 3,62 | 23,81 | 15,15 | 8,77 | 3,70 |
| | Total | 32,40 | 9,47 | 3,58 | 13,50 | 12,56 | 11,25 | 3,67 |

De la última tabla se observa que de adoptar la fórmula del SCS, Ventura-Heras, Passini o Giandotti, estas arrojan tiempos de concentración muy bajos (y velocidades demasiado altas). Por el contrario, las formulas de Kirpich y California Culverts Practice arrojaron tiempos de

concentración mayores y más razonables (con velocidades del orden de los 3-4m/s). Considerando además que el método de Kirpich fue desarrollado para canales bien definidos y pendientes empinadas, lo que se aproxima a las condiciones de escurrimiento en la montaña con cauces encajonados y elevadas pendientes; mientras que el método California Culverts Practice se basó en el de Kirpich, pero fue desarrollado para pequeñas cuencas montañosas de California, es que finalmente se decidió adoptar la fórmula de Kirpich como la más representativa. Los resultados se muestran en la Tabla 13, pág. 76.

5.4 Tiempo de retardo (tr)

Este parámetro hidrológico resultará necesario para la aplicación del método del hidrograma unitario explicado en el Capítulo 6, y se define como el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta hasta que se da el caudal máximo en el hidrograma (Ver Figura 55).

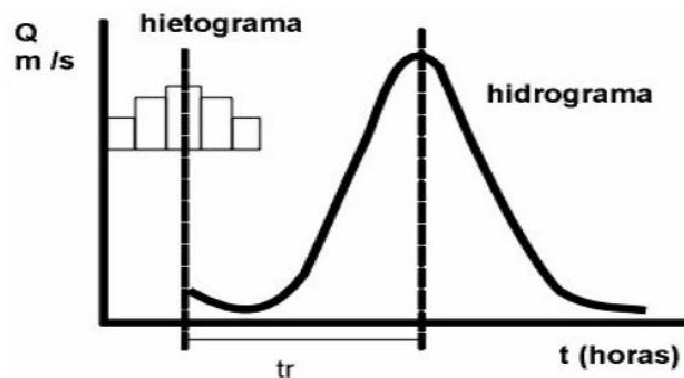


Figura 55. Definición gráfica del tiempo de retardo

El tiempo de retardo fue calculado según la fórmula del SCS (Ven Te Chow et al, 1994):

$$tr = 0,6 tc$$

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Tabla 13.

Tabla 13. Tiempos de concentración y retardo de los ríos en estudio

| Cuenca | | tc [min] | tr [min] |
|-------------|-------------|----------|----------|
| Ambato | Subcuenca 1 | 88,00 | 52,73 |
| | Subcuenca 2 | 104,00 | 62,18 |
| | Subcuenca 3 | 45,00 | 27,21 |
| | Subcuenca 4 | 46,00 | 27,42 |
| | Total | 151,00 | 90,53 |
| Los Nogales | Subcuenca 1 | 54,00 | 32,29 |
| | Subcuenca 2 | 34,00 | 20,61 |
| | Subcuenca 3 | 64,00 | 38,37 |
| | Subcuenca 4 | 45,00 | 26,97 |
| | Subcuenca 5 | 22,00 | 13,23 |
| | Total | 104,00 | 62,36 |



| | | | |
|--------|-------------|--------|-------|
| Seco | Subcuenca 1 | 56,00 | 33,77 |
| | Subcuenca 2 | 50,00 | 30,19 |
| | Subcuenca 3 | 86,00 | 51,31 |
| | Total | 117,00 | 70,06 |
| Saujil | Subcuenca 1 | 32,00 | 19,28 |
| | Subcuenca 2 | 38,00 | 22,76 |
| | Subcuenca 3 | 27,00 | 16,22 |
| | Total | 53,00 | 31,90 |
| Siján | Subcuenca 1 | 28,00 | 17,10 |
| | Subcuenca 2 | 25,00 | 15,26 |
| | Subcuenca 3 | 46,00 | 27,79 |
| | Total | 56,00 | 33,76 |

5.5 Lluvia de diseño

5.5.1 Láminas de precipitación

Para la determinación de la lluvia de diseño se utilizarán las relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) obtenidas a partir del trabajo *“Regionalización de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en la provincia de Catamarca”* descrito en el inciso 2.4.1. Para ello, se sigue la siguiente metodología: a partir de un pluviógrafo existente en la zona y un pluviómetro ubicado en los lugares específicos de estudio (localidades de El Rodeo, Siján y Saujil), se puede realizar la transposición y así obtener la curva IDF propia de cada poblado. El Rodeo cuenta con un pluviómetro, por lo que es posible obtener una curva IDF para el lugar; pero las otras dos localidades no. Para salvar esta situación, se buscó la estación más cercana a Siján y Saujil, resultando la de Mutquín, ubicada a 8Km de Siján, sobre la misma ladera de la montaña. De esta forma, para el El Rodeo se trabajará con la IDF local, mientras que para las otras dos poblaciones con la IDF de Mutquín.

Por las características de las obras que se han de realizar en cada una de las localidades se fijaron tiempos de retorno de 100, 50, 25 y 10 años. Cada uno de estos tendrá asociado una lluvia de diseño.

Las IDF definitivas aplicadas se pueden observar en la Tabla 14 y la Tabla 15.

Tabla 14. Láminas de precipitación estación El Rodeo.

| Lámina [mm] | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| d [min] | Tr | | | |
| | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 5 | 20,54 | 23,23 | 25,15 | 26,99 |
| 10 | 29,94 | 33,87 | 36,67 | 39,36 |
| 15 | 36,11 | 40,85 | 44,22 | 47,47 |
| 30 | 47,18 | 53,38 | 57,78 | 62,02 |
| 45 | 53,59 | 60,63 | 65,63 | 70,45 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 60 | 57,93 | 65,54 | 70,94 | 76,15 |
| 120 | 67,09 | 75,90 | 82,16 | 88,19 |
| 180 | 71,24 | 80,58 | 87,23 | 93,64 |

Tabla 15. Láminas de precipitación estación Mutquín.

| Lámina [mm] | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | Tr | | | |
| d [min] | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 5 | 18,43 | 21,05 | 22,93 | 24,75 |
| 10 | 26,88 | 30,70 | 33,43 | 36,08 |
| 15 | 32,41 | 37,02 | 40,31 | 43,51 |
| 30 | 42,36 | 48,37 | 52,68 | 56,86 |
| 45 | 48,11 | 54,94 | 59,83 | 64,58 |
| 60 | 52,00 | 59,39 | 64,68 | 69,81 |
| 120 | 60,22 | 68,78 | 74,90 | 80,84 |
| 180 | 63,94 | 73,02 | 79,53 | 85,84 |

5.5.2 Distribución temporal

Una vez conocidas las láminas de lluvia, se deben distribuir temporalmente. Para ello se consideraron los métodos por bloque alterno y el de intensidad instantánea. En la Figura 56 se muestran los hietogramas obtenidos para la cuenca de Ambato con un $Tr=100$ años, a fin de realizar una comparación entre ambos métodos.

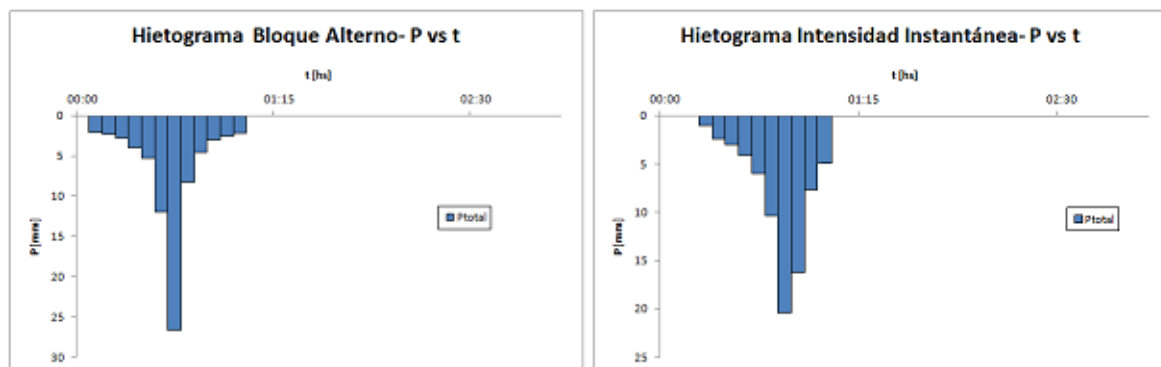


Figura 56. Hietogramas por Bloque Alterno e Intensidad Instantánea en cuenca Ambato para $Tr=100$ años

Simulando en la cuenca de Ambato un evento de precipitación según el hietograma obtenido por el método de bloque alterno y un evento según el método de intensidad instantánea (ver Figura 56), se obtienen los siguientes hidrogramas de salida mostrados en la Figura 57.

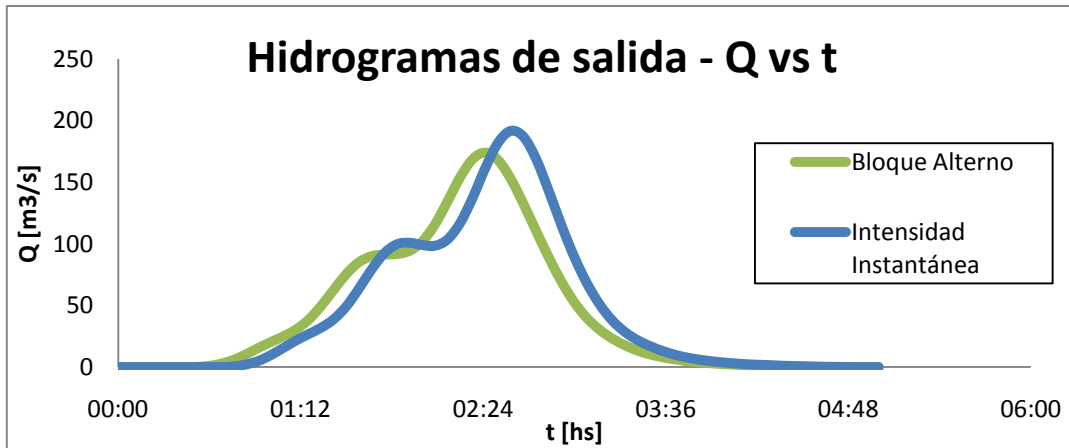


Figura 57. Hidrogramas de salida cuenca Ambato para $Tr=100$ años

La próxima tabla muestra la diferencia de caudales pico:

Tabla 16. Caudales pico arrojados en cada método

| | Q pico [m3/s] | Diferencia |
|------------------|---------------|------------|
| Bloque Alterno | 173,9 | 9,24% |
| Intensidad Inst. | 191,6 | |

Se observa que no existe una diferencia significativa entre ambos métodos (menor al 10%) y se decidió utilizar el método de Bloque Alterno por la simplicidad al momento de ingresar los datos en el HEC-HMS. Se fijó un intervalo de duración de cada lámina en cinco minutos.

Un parámetro importante al momento de analizar la distribución temporal de la lámina es el tiempo al pico. Debido a la vacancia de datos en este sentido, se realizó un análisis de sensibilidad para diferentes valores de CN (70 y 80) viendo como variaba el caudal pico para distintos tiempos pico (25, 50 y 75% del total de la duración de la lluvia) aplicando la misma tormenta de diseño.

Los resultados alcanzados con este análisis se muestran en la siguiente figura.

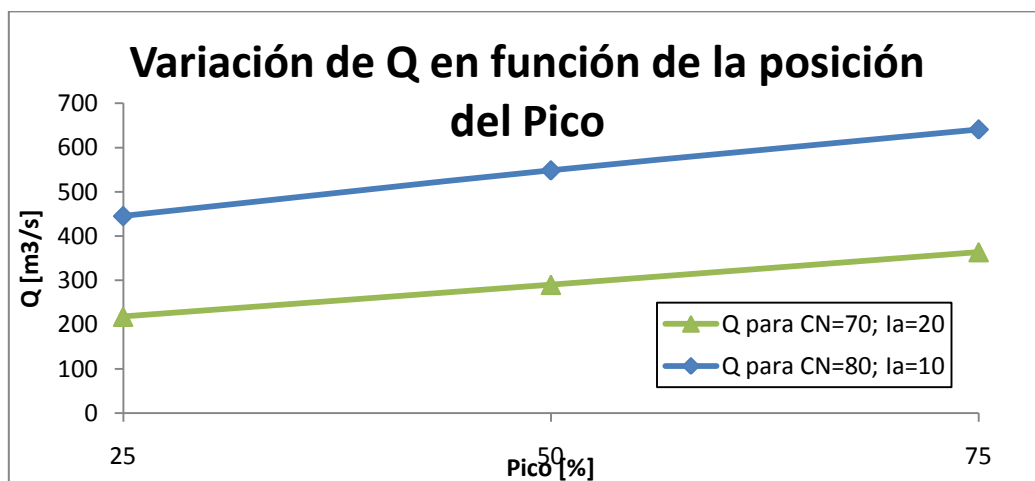


Figura 58. Caudales pico según tiempo al pico



En la Figura 58 se puede observar que tal como era de esperarse, se obtuvieron los mayores caudales cuando el tiempo al pico es del 75% y los menores cuando es del 25%.

Es importante resaltar que la probabilidad que ocurra una lluvia de recurrencias altas (mayores a 25 o 50 años) con el tiempo al pico más desfavorable (75%) es muy baja. Por el contrario, utilizando 25% de tiempo al pico es en cuenca de montaña (como las de este estudio) la situación más probable; pero en este trabajo se optó por realizar todas las modelaciones con el tiempo al pico del 50% por ser una situación intermedia entre lo más desfavorable y menos probable (tiempo al pico 75%), y lo menos desfavorable y más probable (25%).

5.5.3 Distribución espacial

No se tuvo en cuenta el decaimiento espacial de la lámina de lluvia debido a que el área de las sub-cuencas nunca supera los 60 Km²; lo que ocasiona atenuaciones muy bajas o casi nulas.

Las modelaciones se realizan con una lluvia de diseño que cae uniformemente sobre cada cuenca

5.5.4 Duración de la lluvia

Dado que se busca modelar el peor escenario, la duración de la lluvia debe ser tal que permita el aporte de toda la cuenca. Mayorando el tiempo de concentración por un coeficiente 1,1 se asegura que esto ocurra y de esta manera se obtiene la duración de la tormenta de diseño a aplicar en cada caso.

A modo de ejemplo, y con todo lo definido anteriormente, se muestra en la Figura 59 el hietograma de diseño definido para el río Ambato, con una duración de tres horas y para Tr=10 años.

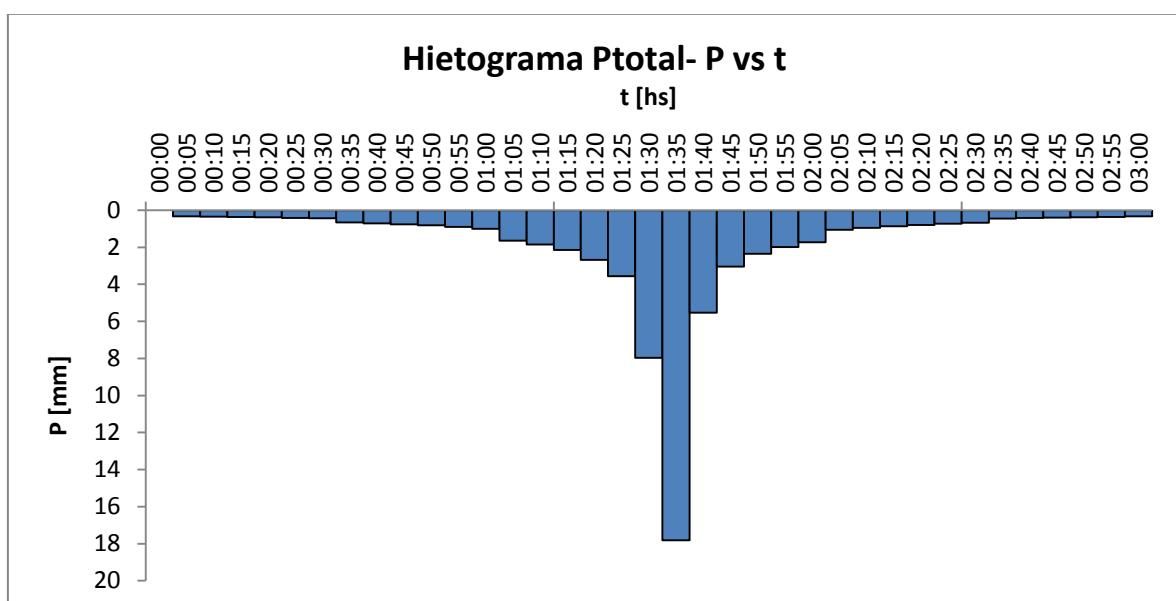


Figura 59. Hietograma de diseño para la cuenca de Ambato, con un Tr=10 años.

5.6 Número de Curva (CN)

Al representar en un gráfico la de Precipitación Total y el Precipitación escurrida (relacionadas por el método de las abstracciones según lo visto en 5.2) para muchas cuencas, el SCS encontró que se relacionan mediante curvas como las que se muestran en la siguiente figura.

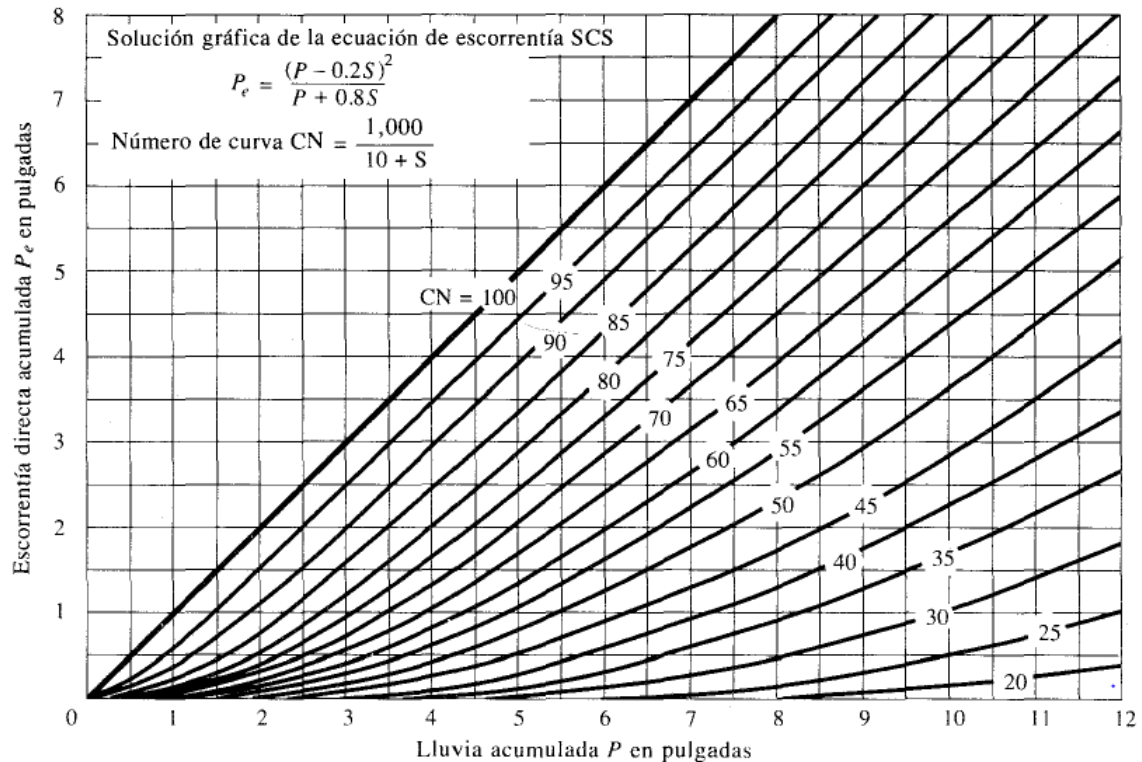


Figura 60. Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS. Fuente: Ven Te Chow. Hidrología Aplicada.

Las mismas varían entre los valores de 0 (la lluvia no genera escurrimiento) y 100 (el total de la lluvia escurre), y para estandarizarlas se definió un número adimensional de curva CN. Este número adimensional toma en cuenta las condiciones de humedad antecedente del suelo (AMC, por sus siglas en inglés) determinada a partir de la precipitación total en los cinco días previos (AMC I seco, AMC II normal y AMC III húmedo). Además se tabulan en base al tipo de suelo y el uso de la tierra, ya que en conjunto, todos estos factores afectan a la infiltración de la lluvia.

En resumen, el CN contempla tres factores que afectan el porcentaje de lluvia que escurrirá directamente:

- Humedad del suelo al momento de la lluvia de diseño
- Cubierta vegetativa
- Tipo de suelo

En el presente trabajo se calculan los CN de las diferentes cuencas realizando un análisis para determinar la humedad antecedente en primer lugar, luego se estudia la cubierta vegetativa a través del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés), y



mediante una tabla obtenida de *Hidrología Aplicada* (Ven Te Chow) se contemplan los distintos tipos de suelo involucrados.

5.6.1 Condiciones de humedad

La escorrentía de la lluvia de diseño se verá afectada por la humedad que tenga el suelo al momento de recibir la precipitación. El método tiene en cuenta este factor al establecer condiciones antecedentes de humedad basado en la lluvia total en los 5 días anteriores a la lluvia de diseño. De esta manera la escorrentía provocada por la misma se verá afectada en mayor o menor medida según la humedad del suelo.

La tabla de la que se obtienen los CN relacionando la cubierta vegetal y el tipo de suelo (tabla 5.5.2, pág. 154. *Hidrología Aplicada* 1994. Ven Te Chow), está definida para condiciones de humedad II. Se debe determinar por lo tanto si resulta necesario cambiar las condiciones de humedad. Para ello se realizaron dos modelaciones sobre la cuenca del río Ambato. Una con la condición de humedad antecedente II y otra con III. El periodo de retorno utilizado fue $Tr=10$ años. En la Tabla 17 se observan los resultados.

Tabla 17. Diferencia caudales calculados para CN II y CN III tomando a Ambato como una cuenca

| | CN II | CN III | |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Cuenca | Q [m ³ /s] | Q [m ³ /s] | Diferencia |
| Ambato | 351,39 | 572,48 | 38,62% |

Como se puede apreciar en la tabla anterior, existen diferencias importantes en los resultados según la condición de humedad en que son obtenidos. Por lo tanto resulta necesario realizar un análisis para definir esta variable.

5.6.1.1 Análisis condiciones de humedad antecedente

Resulta necesario para este análisis conocer la precipitación total caída en los cinco días previos a la lluvia de diseño. Del total de las estaciones que se cuenta para trabajar, sólo dos presentan un registro diario de lluvia, por lo que serán utilizadas para determinar las condiciones de humedad antecedente del suelo. Las estaciones son Pié de Médano y Playa Larga-Belén.

La ubicación de las mismas puede observarse en la Figura 61.

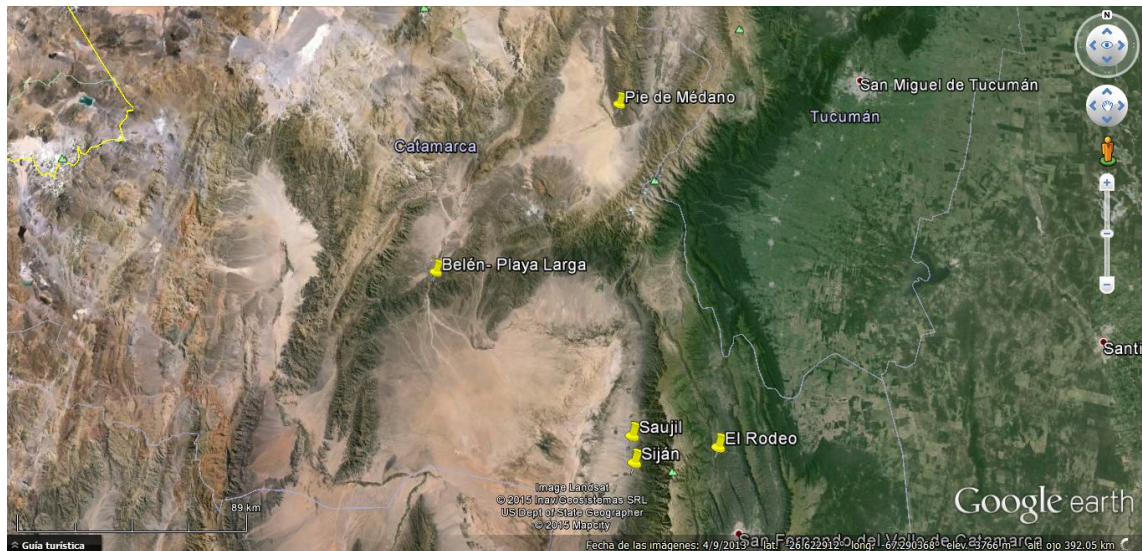


Figura 61. Ubicación de estaciones Pie de Médano y Playa Larga, y las poblaciones de El Rodeo, Siján y Saujil.

Una vez obtenida la lámina de lluvia de los 5 días anteriores, el SCS brinda la siguiente tabla para la clasificación del tipo de humedad.

Tabla 18. Clasificación de clases de antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

| Grupo AMC | Lluvia total 5 días antecedentes [mm] |
|-----------|---------------------------------------|
| I | Menor a 35,56 |
| II | 35,56 a 53,34 |
| III | Sobre 53,34 |

En primer lugar se debe resaltar que existe una considerable distancia entre las estaciones y las poblaciones, pero se procederá a trabajar con las mismas debido a que no se cuenta con más información.

Por otro lado, los años en los que se tiene registro de la máxima precipitación anual y las lluvias en los cinco días anteriores son los mostrados en la Tabla 19 en cada caso.

Tabla 19. Registro de PMD de cada estación.

| Belén-Playa Larga | | |
|-------------------|-------|--------|
| Años | P M D | Fecha |
| 1971 | 27,6 | 27-ene |
| 1972 | 61,9 | 03-mar |
| 1973 | 17 | 12-may |
| 1974 | 59 | 01-feb |
| 1975 | 65 | 02-ene |
| 1976 | 23,3 | 04-ene |
| 1977 | 37 | 06-mar |
| 1978 | 40 | 04-dic |
| 1979 | 20,3 | 25-nov |

| Pie de Médano | | |
|---------------|-------|--------|
| Años | P M D | Fecha |
| 1971 | 21 | 27-sep |
| 1972 | 28,2 | 03-mar |
| 1973 | 25,4 | 12-feb |
| 1974 | 29 | 13-feb |
| 1975 | 26 | 13-feb |
| 1976 | 43,8 | 22-mar |
| 1977 | 21,5 | 06-feb |
| 1978 | 41,5 | 19-ene |
| 1979 | 31,1 | 10-dic |



| | | |
|-------------|-----|--------|
| 1980 | 225 | 04-feb |
| 1981 | 22 | 14-feb |
| 1982 | 21 | 08-feb |
| 1983 | 60 | 07-ene |
| 1984 | 43 | 07-mar |
| 1985 | 57 | 01-feb |
| 1986 | 38 | 31-ene |
| 1987 | 25 | 04-dic |

| | | |
|-------------|------|--------|
| 1980 | 27,4 | 28-ene |
| 1981 | 18,4 | 22-ene |
| 1982 | 15,8 | 08-ene |
| 1983 | 42,2 | 16-feb |
| 1984 | 19,5 | 08-feb |
| 1985 | 26,1 | 01-feb |

Se busca relacionar cada una de estas PMD con un tiempo de recurrencia T_r , para de esta manera poder diferenciar las condiciones de humedad antecedente según el periodo adoptado, ya sea T_{100} , T_{50} , T_{25} y T_{10} .

Para llevar esto a cabo se utilizaron las curvas IDF de cada estación, donde según la siguiente relación:

$$i = \frac{h [mm]}{d [hs]} \quad \text{donde } d = 24hs$$

se debe transformar los h_{diarios} de las estaciones en h_{24hs} para de esta manera poder obtener la frecuencia T_r . Existe una relación entre estos dos valores relativa al lugar, pero como no se cuenta con este dato para la Provincia de Catamarca, en el presente trabajo se determinó utilizar la relación existente para la Provincia de Córdoba, la cual es:

$$\frac{h_{24hs}}{h_{\text{diaria}}} = 1.08$$

Una vez conseguidos los T_r para cada PMD, se definieron en cada caso 3 intervalos según los valores obtenidos (Ver Tabla 20 y Tabla 21) y se realizó un análisis de las láminas caídas en los 5 días anteriores, para así poder definir las condiciones de humedad.

Tabla 20. Condiciones de humedad antecedente de estación Belén por año e intervalo

| Belén- Playa Larga | | | |
|--------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Tr | Años | LÁMINA ANTECEDENTE TOTAL [mm] | CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE |
| > 50 años | 1975 | 4,20 | I |
| > 25 años | 1972 | 0,00 | I |
| | 1974 | 49,00 | II |
| < 10 años | 1971 | 7,10 | I |
| | 1973 | 4,00 | I |
| | 1976 | 6,80 | I |
| | 1977 | 4,50 | I |
| | 1978 | 4,50 | I |
| | 1979 | 0,00 | I |
| | 1980 | 57,50 | III |



| | | | |
|--|-------------|-------|-----|
| | 1981 | 0,00 | I |
| | 1982 | 21,70 | I |
| | 1983 | 77,00 | III |
| | 1984 | 32,90 | I |
| | 1985 | 0,00 | I |
| | 1986 | 2,50 | I |
| | 1987 | 5,50 | I |

Tabla 21. Condiciones de humedad antecedente de estación Pie de Médano por año e intervalo

| Pie de Médano | | | |
|---------------|-------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Tr | Años | LÁMINA ANTECEDENTE TOTAL [mm] | CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE |
| > 100 años | 1976 | 6,60 | I |
| | 1978 | 38,30 | II |
| | 1983 | 0,00 | I |
| < 25 años | 1972 | 0,00 | I |
| | 1974 | 0,00 | I |
| | 1979 | 2,50 | I |
| < 10 años | 1971 | 0,00 | I |
| | 1973 | 11,50 | I |
| | 1975 | 4,80 | I |
| | 1977 | 0,00 | I |
| | 1980 | 0,00 | I |
| | 1981 | 2,50 | I |
| | 1982 | 14,70 | I |
| | 1984 | 25,60 | I |
| | 1985 | 37,10 | II |

Según el análisis realizado hasta el momento con la información disponible, podemos observar que para tiempos de retorno mayores a 50 años las condiciones de humedad varían entre I y II, siendo más común la I.

Debido a que la condición II resulta la más desfavorable, será utilizada para la modelización de las cuencas con frecuencias de 100 y 50 años.

No existen valores próximos que nos permitan hacer un mismo análisis para un periodo de retorno de 25 años. Si tomamos los valores más cercanos de cada estación se tiene la condición de humedad antecedente mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 22. Condiciones de humedad para Tr cercanos a 25 años

| Estación | Año | Tr | Condición de humedad |
|--------------------|------|-------|----------------------|
| Pie de Médano | 1979 | 21,92 | I |
| Belén- Playa Larga | 1974 | 30,97 | II |



Como la condición más desfavorable resulta la II, entonces se procederá a modelar con esta condición de humedad para $T=25$ años.

Finalmente para un tiempo de retorno de 10 años se presentaron los tres casos de condiciones de humedad antecedente. Teniendo presente que la frecuencia en este caso resulta pequeña, se decidió modelar para el peor escenario posible, el cual resulta el de la condición III. Una vez realizada la modelación, el HEC-HMS arrojó valores muy altos de caudales para $Tr=10$ años en condición de humedad III. Estos fueron superiores a los obtenidos para $Tr= 25$ y 50 años, y muy cercanos a los $Tr=100$ años. Teniendo en cuenta estos resultados y que en las estaciones solo se obtuvo una condición III en dos ocasiones (Ver Tabla 20 y Tabla 21), se considera sobredimensionado el cálculo para $Tr=10$ años con condición III. Por esta razón se modelará para II. Condiciones de humedad que se utilizará para la modelación se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Condiciones de humedad para cada Tr

| Tr [años] | Modelación condición de humedad |
|-----------|---------------------------------|
| 10 | II |
| 25 | II |
| 50 | II |
| 100 | II |

5.6.2 Cálculo del NDVI

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. De esta manera podemos estimar la cobertura vegetal y uso del terreno, lo cual afecta a la infiltración.

En primer lugar se obtuvo de la página del USGS (U.S Geological Survey) las imágenes de la zona de interés, las cuales fueron capturadas por el satélite Landsat 8. Las mismas corresponden al 26 de Octubre de 2014. Estas están compuestas por distintas bandas relacionadas a diferentes longitudes de onda captadas. De todas estas, se tomaron las bandas 4 (Rojo) y 5 (IRCercano) para ser procesadas a través de IDRISI y trabajar de esta manera con las áreas correspondientes a cada cuenca.

Debido a que los primeros instrumentos usados para la observación terrestre, tales como el Satélite de Tecnología de Recursos Terrestres, adquirirían datos en el rojo e infrarrojo cercano, fue natural hacer uso de las marcadas diferencias en la reflexión vegetal para determinar su distribución espacial en las imágenes satelitales.

El NDVI toma estas bandas debido a que las plantas absorben la radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es empleada como principal fuente de energía en el proceso de fotosíntesis, las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano. Por lo tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano.

Las longitudes de onda correspondientes a las bandas usadas son:

- ✓ Banda 4 (Rojo) → 0,63-0,68 μm
- ✓ Banda 5 (IRCercano) → 0,845-0,885 μm

De esta forma, el valor del índice se calcula de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{(IRCercano - Rojo)}{(IRCercano + Rojo)}$$

en donde las variables Rojo y IRCercano están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente.

Estas reflexiones espectrales son en sí, cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por lo tanto, éstos toman valores entre un rango de 0,0 a 1,0. El índice diferencial de vegetación normalizado, NDVI, varía en consecuencia entre -1,0 y +1,0. Un mayor valor de índice se corresponde con una cubierta vegetal mayor.

Así se obtuvo un raster con el NDVI de cada una de las cuencas. A modo de ejemplo se muestra el del río Los Nogales en la siguiente figura.

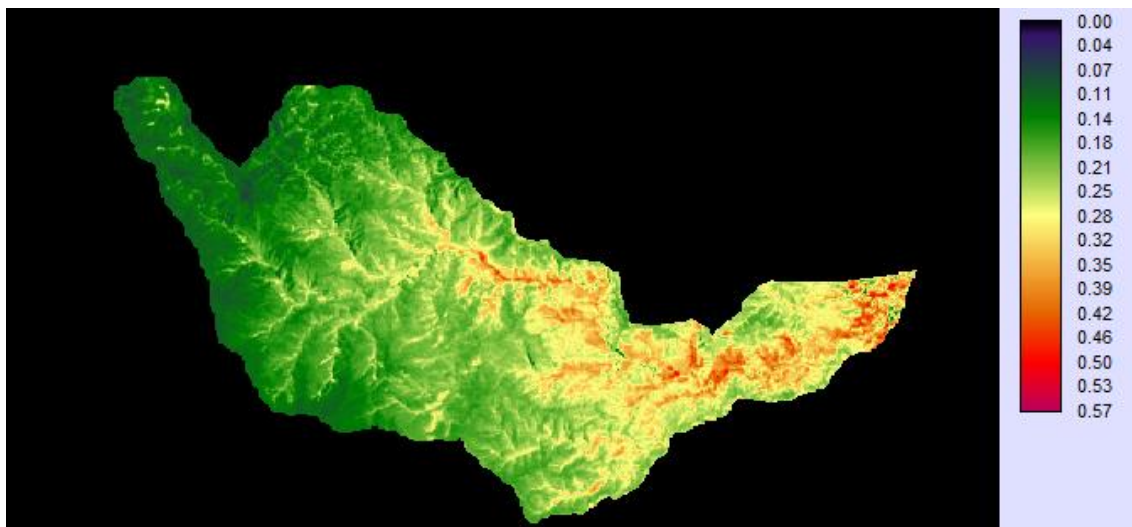


Figura 62. Valores del NDVI para la cuenca del río Los Nogales

Como se mencionó anteriormente, los valores más altos de NDVI indican mayor presencia de vegetación, lo cual concuerda perfectamente con la Figura 62 ya que las zonas en color rojo-anaranjado son las de valor más elevado y coinciden con las márgenes de los principales cauces, donde existe una vegetación más abundante y boscosa.



5.6.3 Tipo de suelo y cálculo de CN

En la tabla 5.5.2 de Hidrología Aplicada (Ven Te Chow et al. 1994, pág. 154) se asocian diferentes cubiertas vegetales con cuatro tipologías de suelo y se definen así valores de CN para condiciones de humedad II.

En la Tabla 24 se muestran solo los tipos de cubiertas vegetales existentes en las cuencas de interés para este trabajo.

Tabla 24. Relación cubierta vegetal con tipología de suelo y CN, basada en tabla 5.5.2

| Tipo de Vegetación | CN (II) Según tipología de suelos | | | |
|--------------------|-----------------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Pastizal optimo | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Pastizal pobre | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Vegas de río | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Bosque | 25 | 55 | 70 | 77 |

A: Arenas profundas, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
 B: Suelos profundos depositados por el viento, marga arenosa
 C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcillas
 D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

Teniendo presente la relación que plantea la Tabla 24, y con el fin de tener un orden de magnitud para poder modelar, se procede a calcular los CN de la siguiente manera: con el NDVI obtenido para cada una de las sub-cuencas se estableció una serie de intervalos de valores de NDVI, definidos en base a los máximos y mínimos obtenidos.

A su vez, se relacionó cada intervalo con un tipo de cubierta vegetativa y, teniendo presente lo citado en el apartado 3.5 sobre las tipologías de suelo del lugar y las expuestas en la Tabla 24, se adoptan valores de CN por intervalo, mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 25. Valores de CN adoptados por cada intervalo de NDVI

| NDVI | Tipo de Vegetación | ADOPTADO |
|-------------|--------------------|----------|
| 0.00 - 0.20 | Pastizal pobre | 83 |



| | | |
|-------------|--------------|----|
| 0.21 - 0.40 | Vegas de río | 80 |
| 0.41 - 0.60 | Bosque | 73 |

Obtenidos los valores de CN asociados a cada intervalo de NDVI, se calculó por cada sub-cuenca el porcentaje existente de cada intervalo. Tomando la cuenca de Ambato como ejemplo y a fin de graficar el proceso, se muestra en la Figura 63 los valores de NDVI generales de la misma, y de la Figura 64 a la Figura 66 los valores para los intervalos mencionados.

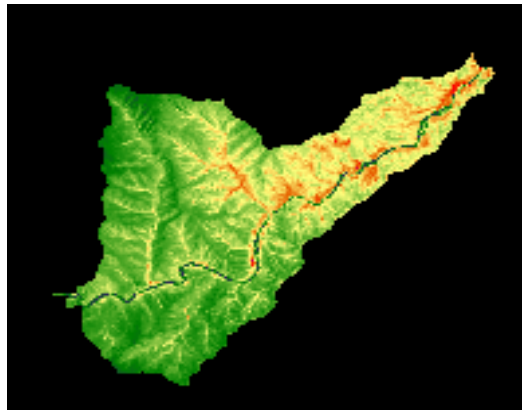


Figura 63. NDVI para cuenca el Ambato



Figura 64. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,00 - 0,20



Figura 65. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,21 – 0,40

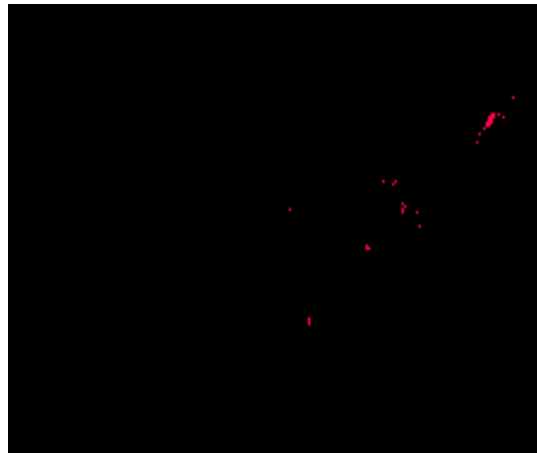


Figura 66. NDVI cuenca Ambato. Intervalo 0,41 – 0,60

De esta forma se obtuvieron los valores del CN por cada sub-cuenca realizando un promedio ponderado como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 26. CN II para sub-cuencas de río Ambato

| Cuenca | Subcuenca | Área de cuenca según Intervalos NDVI [Km2] | | | CN II |
|--------|-----------|--|---------------|---------------|-------|
| | | [0-0.20] | [0.21 - 0.40] | [0.41 - 0.60] | |
| Ambato | 1 | 55,2 | 0,3 | 0,0 | 83 |
| | 2 | 22,9 | 19,2 | 0,2 | 77 |
| | 3 | 15,7 | 0,2 | 0,0 | 75 |
| | 4 | 20,9 | 0,2 | 0,0 | 83 |

De la Tabla 27 a la Tabla 30 se muestran los cálculos análogos para las restantes cuencas.

Tabla 27. CN II para sub-cuencas de río Los Nogales

| Cuenca | Subcuenca | Área de cuenca según Intervalos NDVI [Km2] | | | CN II |
|-------------|-----------|--|---------------|---------------|-------|
| | | [0-0.20] | [0.21 - 0.40] | [0.41 - 0.60] | |
| Los Nogales | 1 | 0,1 | 4,0 | 0,3 | 71 |
| | 2 | 1,1 | 3,4 | 0,3 | 77 |
| | 3 | 2,6 | 8,7 | 0,1 | 68 |
| | 4 | 10,8 | 2,2 | 0,0 | 72 |
| | 5 | 3,2 | 1,1 | 0,0 | 71 |



Tabla 28. CN II para sub-cuencas de río Seco

| Cuenca | Subcuenca | Área de cuenca según Intervalos NDVI [Km2] | | | CN II |
|--------|-----------|--|---------------|---------------|-------|
| | | [0-0.20] | [0.21 - 0.40] | [0.41 - 0.60] | |
| Seco | 1 | 1,2 | 6,9 | 0,3 | 69 |
| | 2 | 0,9 | 7,4 | 0,0 | 69 |
| | 3 | 11,7 | 10,9 | 0,0 | 68 |

Tabla 29. CN II para sub-cuencas de río Saujil

| Cuenca | Subcuenca | Área de cuenca según Intervalos NDVI [Km2] | | | CN II |
|--------|-----------|--|---------------|---------------|-------|
| | | [0-0.20] | [0.21 - 0.40] | [0.41 - 0.60] | |
| Saujil | 1 | 7,305 | 0,452 | 0 | 82 |
| | 2 | 15,699 | 0,905 | 0 | 75 |
| | 3 | 4,675 | 0,632 | 0,004 | 72 |

Tabla 30. CN II para sub-cuencas de río Siján

| Cuenca | Subcuenca | Área de cuenca según Intervalos NDVI [Km2] | | | CN II |
|--------|-----------|--|---------------|---------------|-------|
| | | [0-0.20] | [0.21 - 0.40] | [0.41 - 0.60] | |
| Siján | 1 | 11,312 | 0,739 | 0 | 81 |
| | 2 | 8,698 | 0,092 | 0 | 76 |
| | 3 | 7,459 | 1,569 | 0,006 | 72 |

Con los CN expuestos en las tablas anteriores, se realizó la modelación para cada cuenca y se obtuvieron así los correspondientes caudales. Luego se compararon estos caudales con los obtenidos según la validación hecha en el Capítulo 4. Teniendo presente la diferencia entre estos, se realizó un ajuste de los valores de CN para lograr una aproximación a los caudales obtenidos en la validación y así se obtuvieron los CN ajustados o finales. La diferencia entre los CN derivada de este ajuste no supera el 10% en ningún caso como se puede observar en la Tabla 31 donde se muestran los CN finales.

Tabla 31. CN finales y diferencia

| Cuenca | Sub-cuenca | CN previo a ajuste | CN final | Diferencia de CN % |
|-------------|------------|--------------------|----------|--------------------|
| Ambato | 1 | 83 | 80 | -3,37 |
| | 2 | 77 | 70 | -9,49 |
| | 3 | 75 | 70 | -7,70 |
| | 4 | 83 | 80 | -3,45 |
| Los Nogales | 1 | 71 | 68 | -4,56 |
| | 2 | 77 | 72 | -7,07 |
| | 3 | 68 | 66 | -3,00 |
| | 4 | 72 | 74 | 2,43 |
| | 5 | 71 | 72 | 1,68 |
| Seco | 1 | 69 | 72 | 3,88 |

| | | | | |
|--------|---|----|----|-------|
| | 2 | 69 | 71 | 3,25 |
| | 3 | 68 | 75 | 9,50 |
| Saujil | 1 | 82 | 79 | -4,05 |
| | 2 | 75 | 70 | -6,56 |
| | 3 | 72 | 70 | -3,03 |
| Siján | 1 | 81 | 75 | -8,51 |
| | 2 | 76 | 74 | -3,10 |
| | 3 | 72 | 69 | -5,07 |

5.7 Infiltración inicial (I_a)

Existe una cierta cantidad de precipitación inicial I_a para la cual no ocurrirá escorrentía y el total de la misma será infiltrada, contenida por la vegetación o pozos a lo largo de la cuenca.

Se puede observar esto en la Figura 67 donde el área sombreada P_e es la parte de la precipitación que escurre.

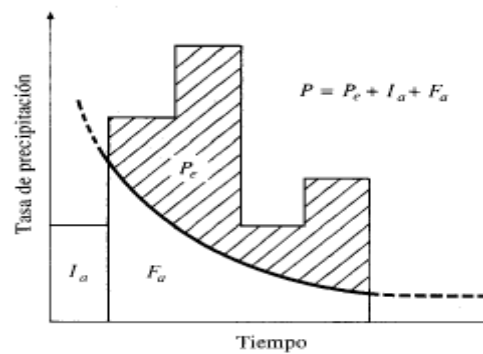


Figura 67. Método de abstracciones de precipitación del SCS. Fuente: Hidrología Aplicada, Ven Te Chow.

La infiltración inicial I_a es una de las variables del método de transformación lluvia caudal y el SCS empíricamente desarrolló la siguiente relación:

$$I_a = 0.2 S$$

Donde S se relaciona con el número de curva CN de la siguiente manera:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad S \text{ en pulgadas}$$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 32. Valores de Infiltración inicial por sub-cuenca

| Cuenca | | I_a [mm] |
|-------------|-------------|------------|
| Ambato | Subcuenca 1 | 12,70 |
| | Subcuenca 2 | 21,77 |
| | Subcuenca 3 | 21,77 |
| | Subcuenca 4 | 12,70 |
| Los Nogales | Subcuenca 1 | 23,91 |
| | Subcuenca 2 | 19,76 |
| | Subcuenca 3 | 26,17 |



| | | |
|--------|-------------|-------|
| | Subcuenca 4 | 17,85 |
| | Subcuenca 5 | 19,76 |
| Seco | Subcuenca 1 | 19,76 |
| | Subcuenca 2 | 20,75 |
| | Subcuenca 3 | 16,93 |
| Saujil | Subcuenca 1 | 13,50 |
| | Subcuenca 2 | 21,77 |
| | Subcuenca 3 | 21,77 |
| Siján | Subcuenca 1 | 16,93 |
| | Subcuenca 2 | 17,85 |
| | Subcuenca 3 | 22,82 |

5.8 Métodos de tránsito de caudales

Son diversos los procedimientos para determinar el seguimiento del caudal a través de un sistema hidrológico, dada una entrada, es decir, hidrogramas conocidos.

Estos modelos pueden responder a sistemas agregados, donde el flujo se calcula como una función del tiempo únicamente en un lugar particular, o a sistemas distribuidos, donde el flujo se obtiene como una función del tiempo y el espacio a través del sistema.

En sistemas agregados los caudales de entrada $I(t)$ y salida $Q(t)$, y el almacenamiento $S(t)$, se relacionan mediante la ecuación de continuidad (conservación de masa), mientras que en los distribuidos se relacionan mediante las ecuaciones diferenciales parciales de Saint-Venant para flujo unidimensional, basadas en la ecuación de continuidad y momentum o cantidad de movimiento (conservación de masa y momentum).

En cada caso existen diferentes métodos que realizan la modelización del tránsito de caudales y el HEC-HMS brinda la posibilidad de trabajar con alguno de estos. Para el presente trabajo se tuvieron en consideración los siguientes:

1. Muskingum
2. Muskingum-Cunge
3. Kinematic wave
4. Tlag

Para determinar cuál de todos utilizar, se modeló con cada uno de ellos para la cuenca de Ambato y se analizaron los resultados.

5.8.1 Muskingum

Este método responde a sistemas agregados y modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal de un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma. Durante el avance de la onda creciente, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida,

siendo un almacenamiento de cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor que el de entrada resultando en una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento por prisma que está formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del canal prismático. Se representa esto gráficamente en la siguiente figura.

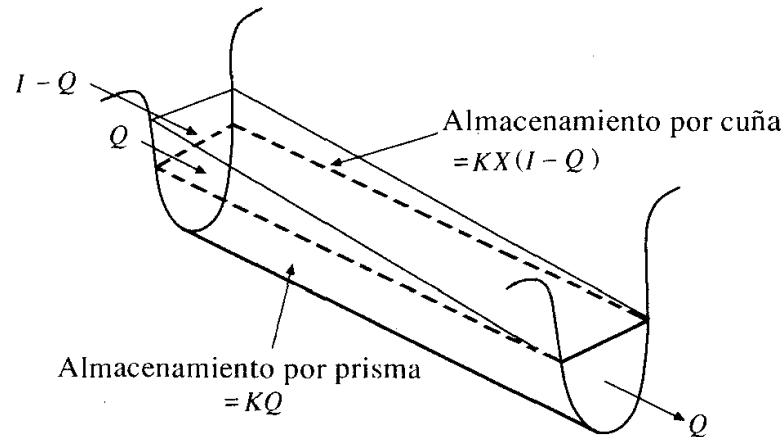


Figura 68. Almacenamiento Método Muskingum. Fuente: Hidrología Aplicada; Ven Te Chow

El método requiere de la estimación de un coeficiente de proporcionalidad K , el cual es el tiempo de tránsito de una onda de creciente a través del tramo de canal, y un factor de ponderación X que varía entre 0 y 0,5 (cuando $X=0$ no existe cuña), y depende de la forma de almacenamiento por cuña modelado. Siendo S el almacenamiento, I el hidrograma de entrada y Q el de salida, tenemos:

$$S = K[XI + (1 - X)Q]$$

El cambio en el almacenamiento (ΔS) entre dos tiempos cualesquiera ($j, j+1$), se deduce tras operar convenientemente con las ecuaciones de almacenamiento para S_j y S_{j+1} , obteniendo así la ecuación de tránsito para el método Muskingum:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j$$

Donde C_1, C_2 y C_3 están en función de $\Delta t, K$ y X .

El HEC-HMS requiere la entrada de los valores:

- K
- X

Para la obtención del K se determinó calcular el t_c para el tramo de canal en cuestión con la misma metodología que para cuencas, y para el X , según la bibliografía consultada, se recomienda un valor de 0,3 para ríos de montaña, donde el almacenamiento es menor que en los de llanura, que presentan valores menores (del orden de 0,2).



5.8.2 Muskingum- Cunge

Cunge combina la teoría de los sistemas distribuidos con la simplicidad de Muskingum y demuestra que, incorporando la variable espacio, puede encontrarse una solución aproximada a las ecuaciones de Saint-Venant. El resultado fue la obtención del método Muskingum-Cunge, el cual se resuelve a través de una ecuación algebraica lineal:

$$Q_{i+1}^{j+1} = C_1 Q_i^{j+1} + C_2 Q_i^j + C_3 Q_{i+1}^j$$

en la cual C_1 , C_2 y C_3 se definen de idéntica manera. Esto permite que el hidrograma completo se obtenga en las secciones transversales requeridas.

Este método requiere el ingreso de los siguientes datos:

- Longitud del tramo de tránsito
- Pendiente media del tránsito
- Número de Manning
- Parámetros de una sección representativa

Los datos del tramo y la sección se obtuvieron a través de Google Earth. Según cada caso se trataban de secciones rectangulares o triangulares.

Para el número de Manning se tomó nuevamente un tramo representativo y consultando la bibliografía se escogió un valor de 0,040.

5.8.3 Kinematic wave

Este método se aproxima a las ecuaciones de Saint-Venant ignorando las fuerzas de inercia y de presión. También supone que la pendiente de energía es igual a la pendiente del lecho. En consecuencia, este método es más adecuado para corrientes empinadas.

El mismo igualmente requiere los datos de una sección representativa para cada cuenca. Estos se determinaron de la misma manera que en el método anterior.

Datos requeridos:

- Longitud del tránsito
- Pendiente media del tránsito
- Número de Manning
- Parámetros de sección

5.8.4 Tlag

Este método sólo representa la traslación de avenidas. No incluye ninguna representación de procesos de atenuación. En consecuencia, es el más adecuado para segmentos de arroyos cortos

con un tiempo de viaje predecible que no varía con la profundidad de flujo. El único dato requerido es el tiempo de retardo correspondiente al tránsito.

En este método en particular se modeló ingresando el dato de entrada de dos maneras. Por un lado se estimó el tiempo de retardo utilizando Kirpich, como si se tratara de una cuenca, y por otro, considerando una velocidad máxima extraordinaria de 4m/s, se estimó el tiempo necesario para que transitara.

5.8.5 Elección del método

Una vez que se corrieron las modelaciones para cada uno de estos métodos, se observó que:

- En el método Muskingum-Cunge no había una laminación importante del caudal producto del tránsito y además los tiempos de tránsito resultaron muy bajos (20 minutos). Si tenemos en cuenta que la longitud del tránsito es de 15,5Km esto da como resultado una velocidad media del flujo de 12,91m/s (valor sobredimensionado e imposible de existir en cuencas de este tipo y que solo pueden ser reales en rápidas de descarga de caudales por ejemplo). En la Figura 69 se muestran los resultados gráficamente.

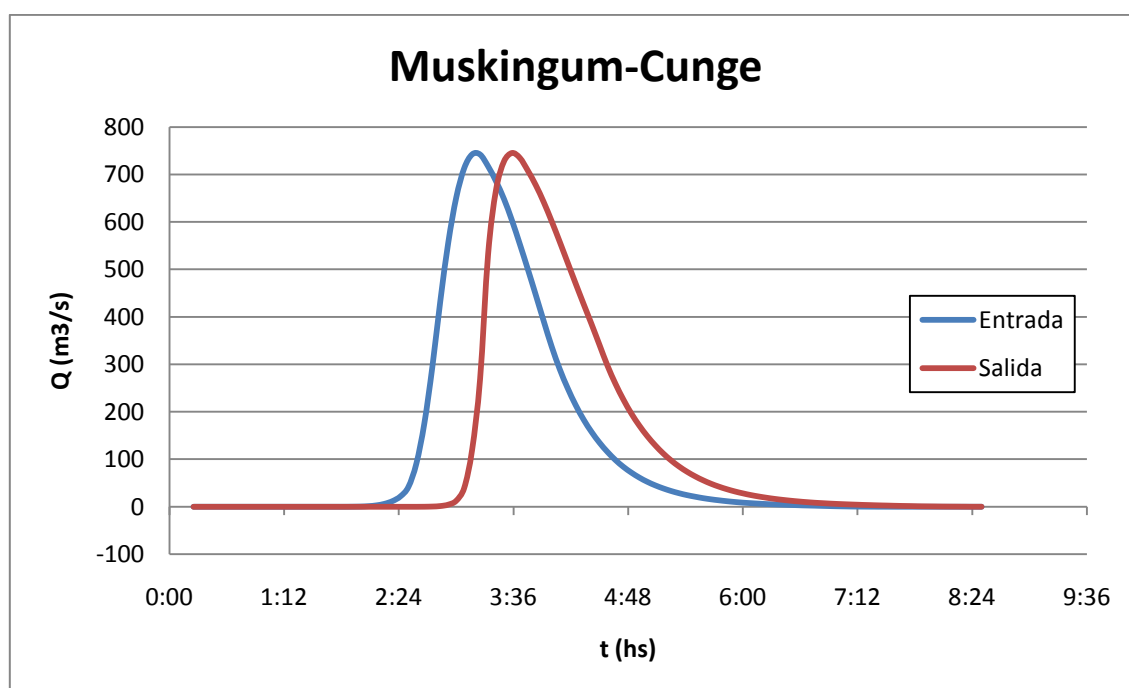


Figura 69. Resultado de la modelación con Muskingum-Cunge

- Corriendo el Kinematic wave se tuvo el mismo problema mencionado anteriormente, con velocidades físicamente imposibles de alcanzar en cuencas de este tipo. El tiempo existente entre los picos es de 20 minutos. En la próxima figura se muestran los resultados de manera gráfica.

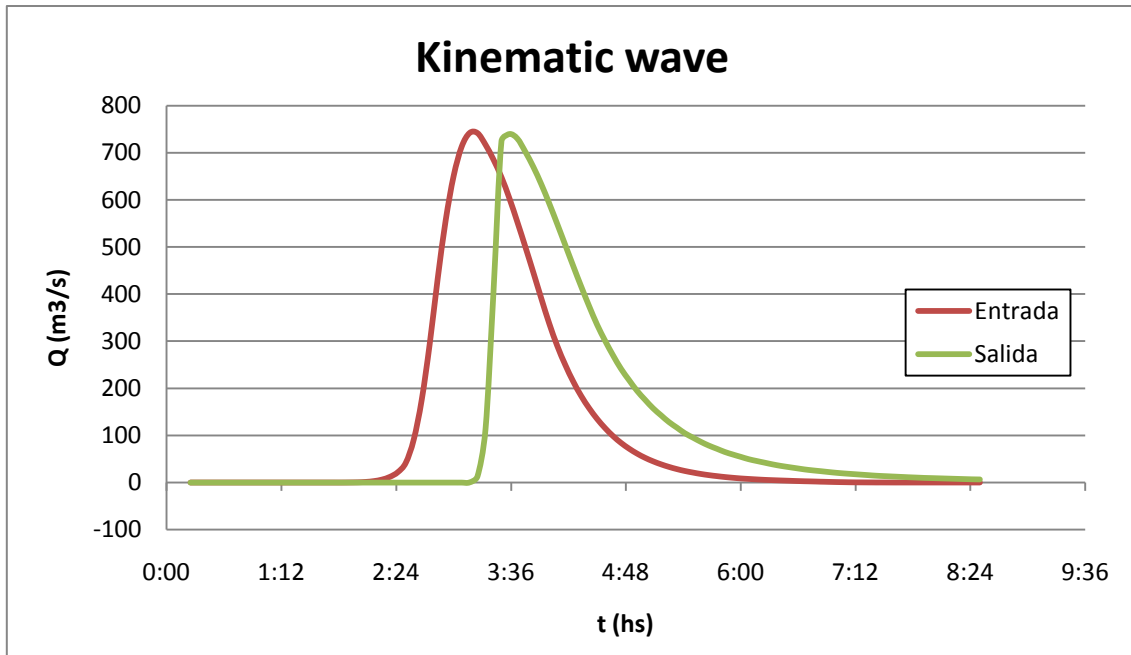


Figura 70. Resultado de la modelación con Kinematic wave

- Utilizando el método Tlag se observó que no se producía el problema de que los caudales transitaran a altas velocidades (del orden de los 3-4m/s), pero el tránsito no presentaba laminación. Los resultados de la modelación para los dos escenarios planteados se muestran en las siguientes figuras.

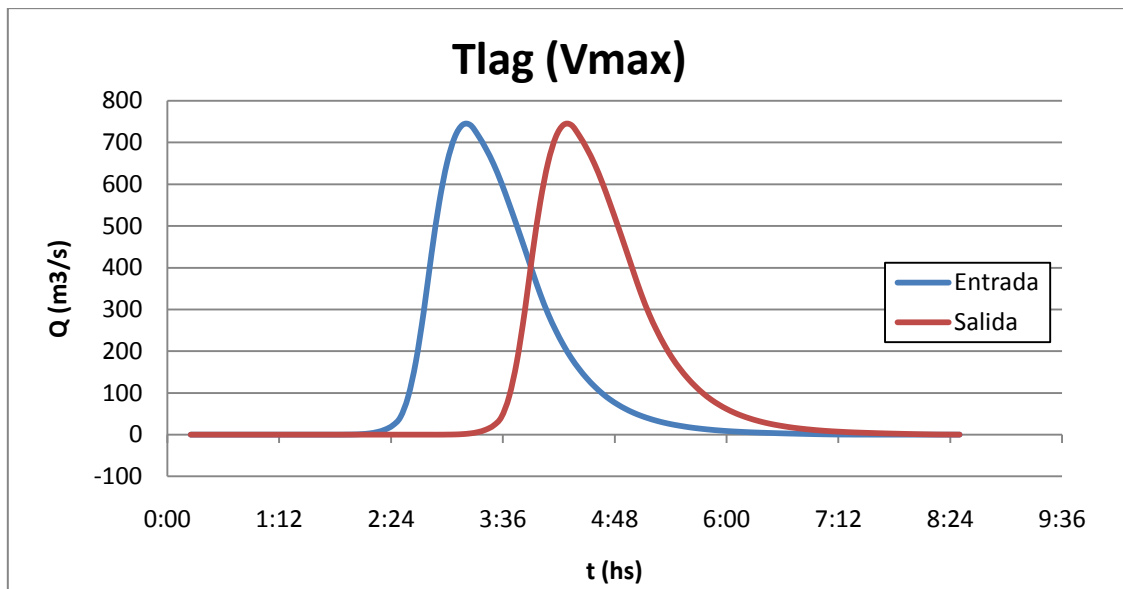


Figura 71. Resultado de la modelación con Tlag (Vmax)

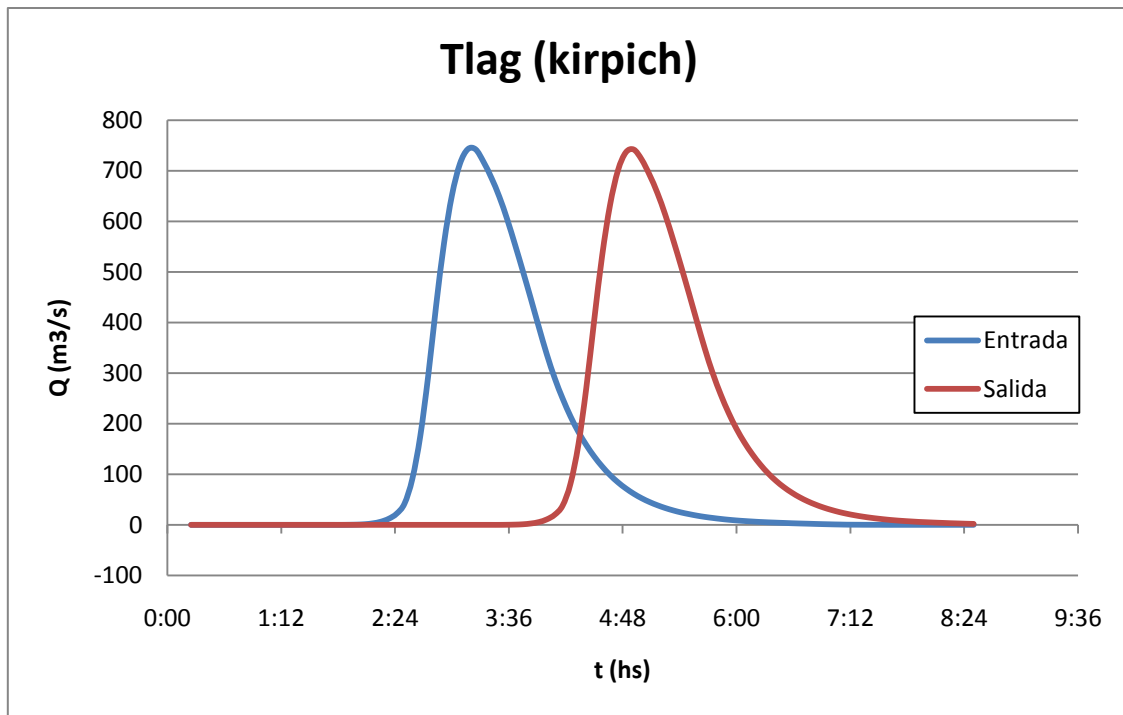


Figura 72. Resultado de la modelación con Tlag (kirpich)

- Finalmente en el método de Muskingum no se presentaron estos problemas; las velocidades resultaron lógicas (del orden de los 2-3m/s) y se producía laminación (Ver Figura 73).

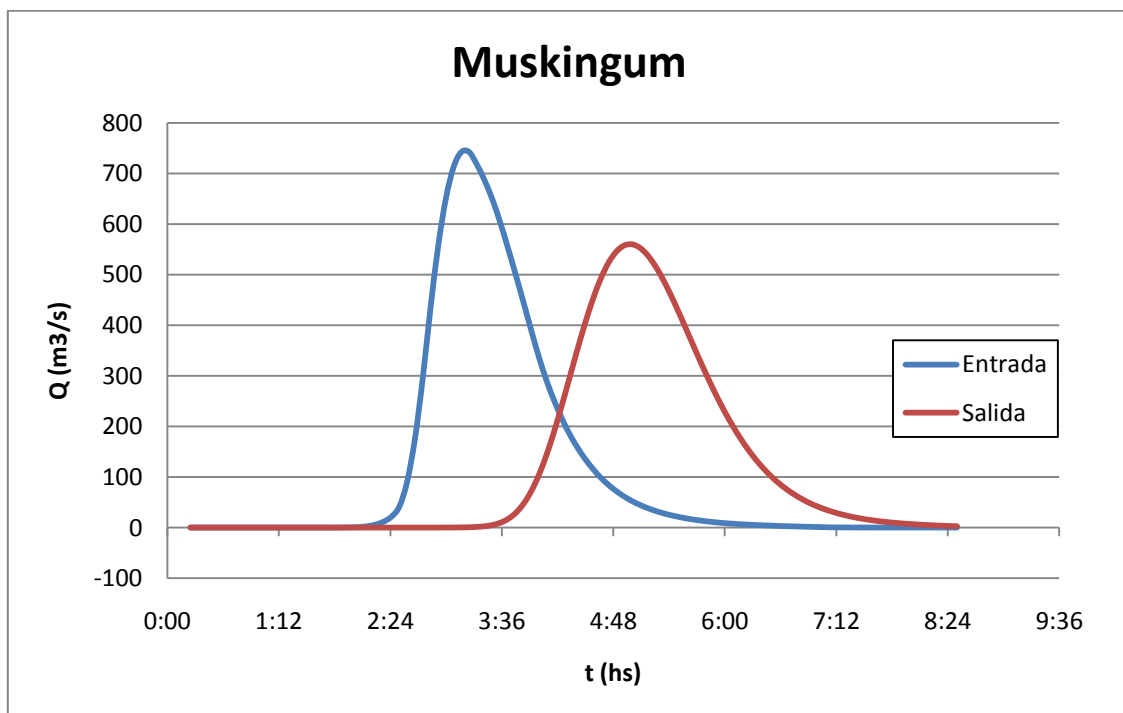


Figura 73. Resultado de la modelación con Muskingum

Por esta razón se determinó utilizar el método de Muskingum para calcular el tránsito en cada una de las cuencas.



CAPITULO 6

6 CAPITULO 6.- Modelación Hidrológica

6.1 Introducción

En este capítulo se realiza una breve explicación del Método del Hidrograma Unitario utilizado por el HEC-HMS para realizar la modelación hidrológica y obtener así los caudales. Seguidamente, se presentan los escenarios hidrológicos propuestos para las cinco cuencas y los resultados obtenidos para los mismos, calculados en base a los parámetros morfométricos e hidrológicos definidos en los Capítulos 3 y 5.

6.2 Método del Hidrograma Unitario

El Hidrograma Unitario (HU), utilizado por el HEC-HMS para la obtención de caudales, se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de un pulso unitario (Ver Figura 74). El HU se debe aplicar para cuencas pequeñas (si supera el centenar de Km^2 se recomienda subdividir en sub-cuencas), asegurando que las variaciones espaciales de la lluvia no generen variaciones en el hidrograma. Las cuencas en estudio son pequeñas, por lo que resulta aplicable esta metodología. Como las características físicas de cada una de las cuencas (tamaño, forma, pendiente) son constantes, se consideran similares las formas de los hidrogramas resultantes de tormentas con características similares.

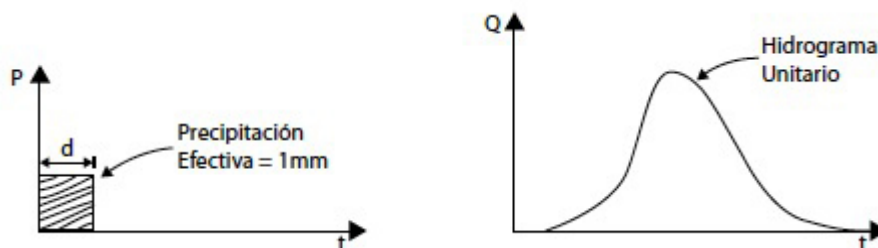


Figura 74. Hidrograma Unitario. Fuente: <http://www.scielo.org.mx>

Una vez determinado el HU, puede utilizarse para encontrar los hidrogramas de escorrentía directa y de caudal. Se selecciona un hidrograma de lluvia, se estiman las abstracciones y se calcula el hidrograma de exceso de lluvia. El intervalo de tiempo utilizado para definir las ordenadas del hidrograma de exceso de lluvia debe ser el mismo que el especificado para el hidrograma unitario.

6.3 Escenarios de simulación

Las lluvias que se simularán sobre las cuencas fueron definidas según lo desarrollado en el apartado 5.1. Las mismas se obtuvieron según las IDF de dos estaciones cercanas a las poblaciones de interés (Mutquín y El Rodeo). Además se modelará para los distintos tiempos de retorno mencionados en el apartado 5.5.1 ($T_r = 10, 25, 50$ y 100 años).



Los tiempos de concentración serán los obtenidos en la Tabla 13, bajo los conceptos desarrollados oportunamente, al igual que los tiempos de retardo.

La fracción de la lluvia que resulta absorbida y no escurre, será tenida en cuenta en la modelación a través de los parámetros definidos en los apartados 5.6 y 5.7, necesarios para el método de las abstracciones del SCS.

Finalmente se realizará el tránsito de caudales en los modelos con sub-cuencas por el método de Muskingum, en base al análisis realizado en el inciso 5.8.

De todo lo mencionado en este apartado, resulta que lo único que variará en cada modelación será la lluvia de diseño, ya que la misma es diferente según el tiempo de recurrencia. Los demás parámetros hidrológicos permanecen constantes. De esta forma los resultados finales dependerán del tiempo de retorno.

6.4 Análisis de Resultados

Los caudales obtenidos por río se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Caudales de diseño de cada río [m³/s]

| Cuenca | Tr=10 años | Tr=25 años | Tr=50 años | Tr=100 años |
|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| Ambato | 429,20 | 550,00 | 640,10 | 729,90 |
| Los Nogales | 118,40 | 158,50 | 189,00 | 219,70 |
| Seco | 128,80 | 169,40 | 200,20 | 131,10 |
| Saujil | 86,20 | 122,50 | 150,90 | 180,60 |
| Siján | 87,10 | 122,20 | 149,80 | 178,60 |

Si se tabulan los caudales obtenidos de mayor o menor (tomando aleatoriamente los valores para Tr= 10 años) y en paralelo se realiza lo mismo para las áreas de cada cuenca se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 34. Comparación Área-Caudal

| | Q Tr=10 [m3/s] | | A [Km2] | |
|---|----------------|--------|-------------|--------|
| | 1 | Ambato | 429,20 | Ambato |
| 2 | Seco | 128,80 | Seco | 46,46 |
| 3 | Los Nogales | 118,40 | Los Nogales | 43,22 |
| 4 | Siján | 87,10 | Saujil | 32,34 |
| 5 | Saujil | 86,20 | Siján | 32,09 |



Se observa que existe correspondencia directa en el orden de resultados entre los caudales y las áreas, presentando prácticamente las mismas posiciones.

Otro aspecto a destacar, es que los valores de los caudales aumentan a medida que el Tr es mayor. En la Tabla 35 se muestra el incremento de los caudales en relación al paso de cada Tr:

Tabla 35. Incremento de caudales entre dos periodos consecutivos

| Tr | Incremento Q |
|-----|--------------|
| 10 | |
| 25 | 29,61% |
| 50 | 19,91% |
| 100 | 18,13% |

Finalmente, se muestra en la Tabla 36 la diferencia existente entre los caudales obtenidos por la modelación hidrológica y los obtenidos a través de la regionalización de caudales (Capítulo 4). Se toman a modo de ejemplo los resultados para Tr=100 años.

Tabla 36. Diferencia entre caudales obtenidos por modelación hidrológica y regionalización de caudales

| Cuenca | Tr=100 años | | Diferencia % |
|-------------|------------------------|-----------------------------|--------------|
| | Modelación Hidrológica | Regionalización de Caudales | |
| Ambato | 729,90 | 761,34 | 4,13 |
| Los Nogales | 219,70 | 235,98 | -7,41 |
| Seco | 231,10 | 253,74 | -9,80 |
| Saujil | 180,60 | 176,58 | 2,23 |
| Siján | 178,60 | 175,26 | 1,87 |

Como se puede apreciar, las diferencias son pequeñas (menores al 10%), por lo que podemos concluir que el modelo funciona.

6.4.1.1 Análisis Hidrogramas de salida

Los hidrogramas de cada cuenca se obtuvieron a partir de un modelo dado de la misma y una lluvia de diseño. Se debe aclarar que no se tuvieron en cuenta los flujos base en este análisis.

A continuación se analizan solo dos ríos, el Ambato y Los Nogales. Esto se debe a que la estructura del modelo del río Ambato (con un tránsito) es análogo al del río Seco, Siján y Saujil. Por otro lado, el río Los Nogales presenta una estructura diferente (con dos tránsitos), por lo que se realiza un análisis aparte.

➤ Cuenca río Ambato

El modelo ingresado en HEC-HMS es el de la siguiente figura.

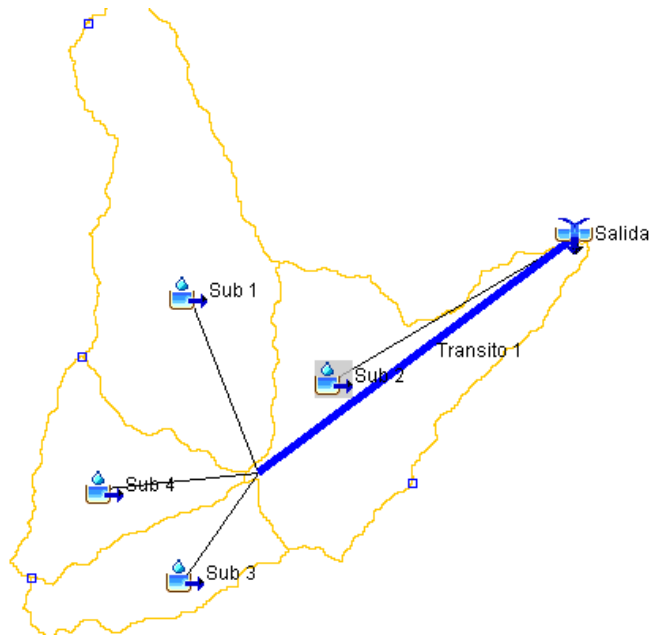


Figura 75. Modelo río Ambato HEC-HMS

En la Figura 75 se puede observar la disposición de las cuatro sub-cuencas. De todas estas, la 1, 3 y 4 convergen en un mismo punto y luego el modelo transita estos tres caudales hasta el punto de cierre de la cuenca donde se suma el caudal de la sub-cuenca 2.

La Figura 76 corresponde al hietograma de la sub-cuenca 1 del río Ambato para un $Tr=100$ años.

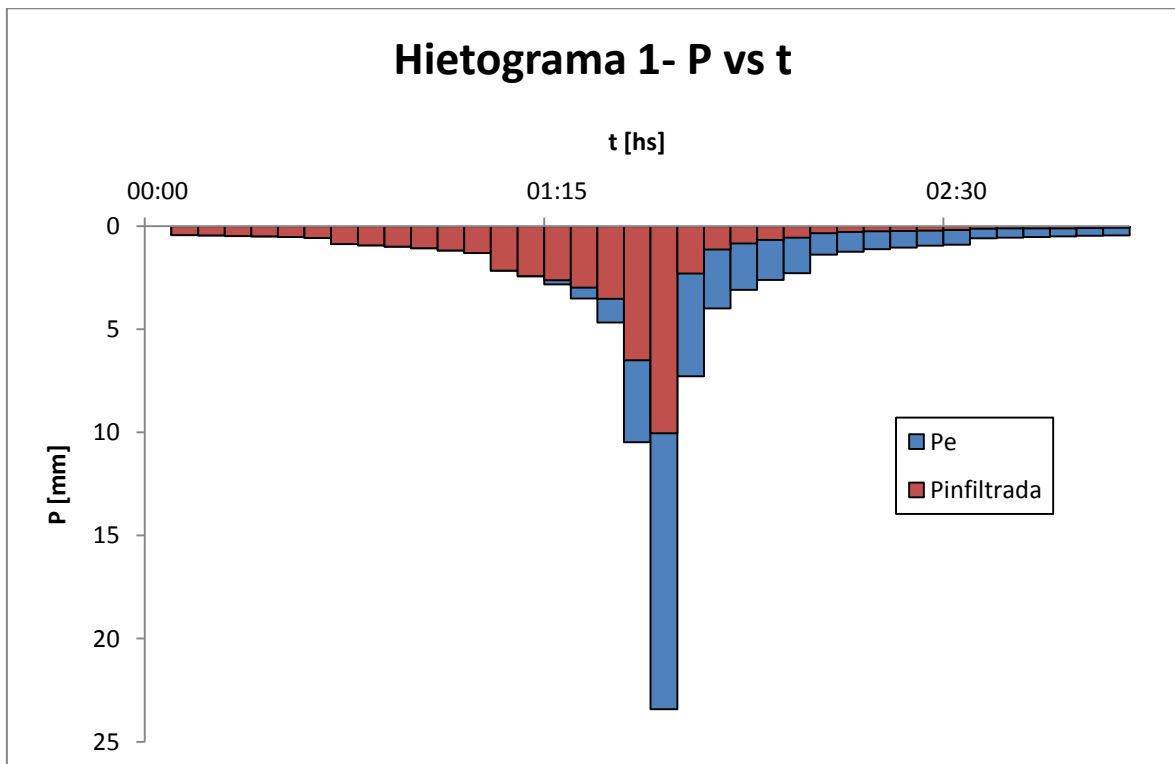


Figura 76. Hietograma sub-cuenca 1 de río Ambato para $Tr=100$ años



En el mismo se puede observar la fracción de la precipitación que se infiltra y la efectiva. Este hietograma será único y diferente para cada sub-cuenca y para cada periodo de retorno Tr . En este caso se muestra el de la figura anteriormente mencionada a modo de ejemplo.

Con los dos elementos expuestos anteriormente, es decir el modelo de la cuenca y la lluvia de diseño, se modela y se obtienen los caudales. Se puede observar la evolución de los mismos con respecto al tiempo mediante los hidrogramas de salida. En Figura 77 se muestra el hidrograma de caudales para el tránsito del modelo de Ambato para un $Tr=100$ años.

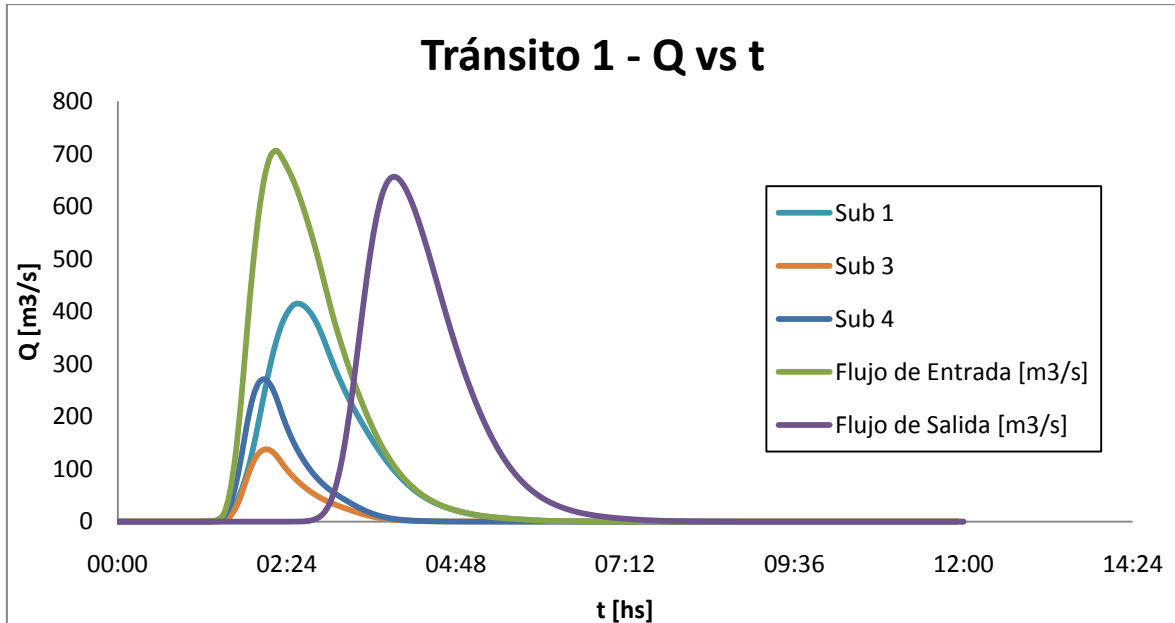


Figura 77. Hidrograma tránsito 1 de cuenca Ambato

En la figura anterior se observan los caudales de las sub-cuencas 1, 3 y 4 (para $Tr= 100$ años), los cuales confluyen en un punto y conforman el flujo de entrada del tránsito por sub-cuenca 1, el cual es la envolvente (ver modelo en Figura 75). Estos transitan a lo largo de esta sub-cuenca hasta llegar al punto de cierre de la cuenca total, obteniendo así un flujo de salida. En el gráfico se puede observar la atenuación existente entre el flujo de entrada al tránsito y el de salida, además de su desfase en el tiempo.

La siguiente figura muestra el hidrograma de salida de toda la cuenca.

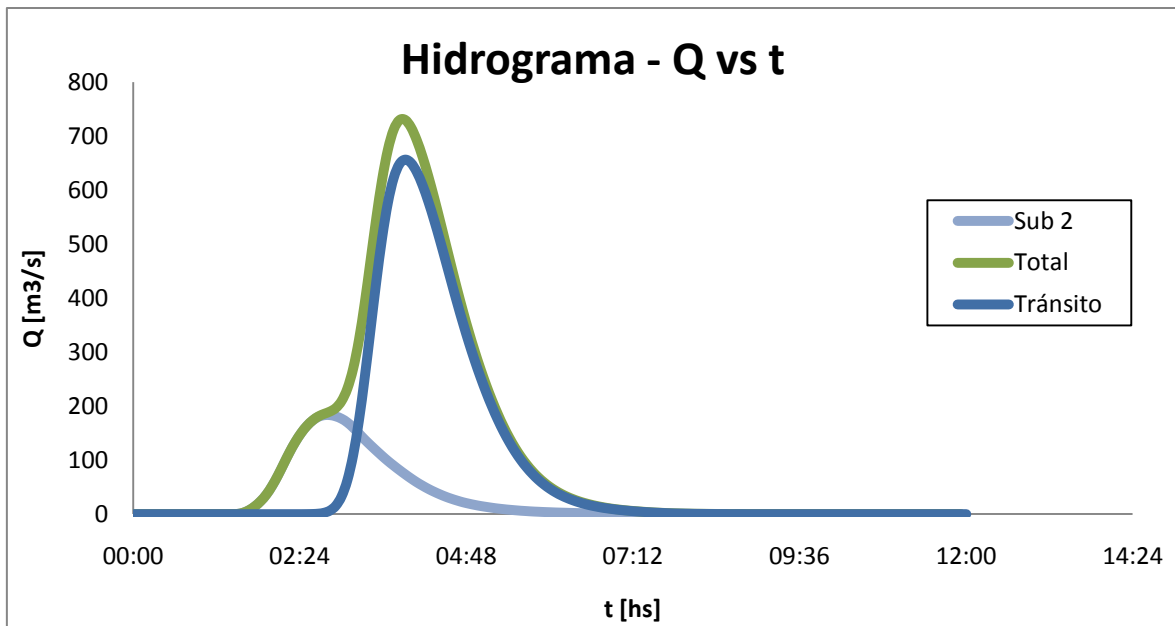


Figura 78. Hidrograma de salida de la cuenca Ambato para $Tr=100$ años

La Figura 78 corresponde al hidrograma general de la cuenca con un $Tr=100$ años, donde se puede observar que al principio el punto de cierre recibe el caudal correspondiente a la sub-cuenca 2 y luego se agrega el tránsito (ver modelo en Figura 75), el cual contiene los caudales laminados de las restantes sub-cuencas. La envolvente de estos dos caudales corresponde al hidrograma total de salida de la cuenca en el punto de cierre de la misma. Es importante aclarar que hasta aquí se han expuesto los resultados obtenidos para un $Tr=100$ años. Para los distintos tiempos de retorno los efectos resultan equivalentes y únicamente cambia el valor de los caudales. Los hidrogramas de salida de la cuenca para todos los Tr se muestran en la siguiente figura.

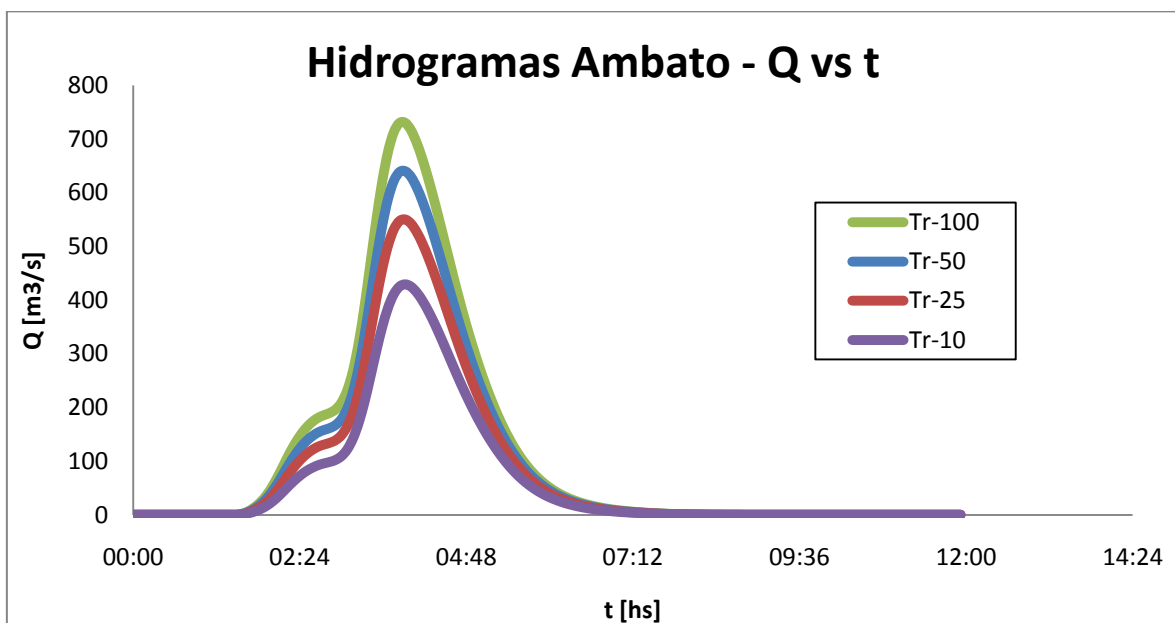


Figura 79. Hidrogramas de salida de cuenca Ambato

Finalmente, lo analizado para el río Ambato es válido para los ríos Seco, Siján y Saujil, ya que los modelos son equivalentes (Ver Anexo 8.1.1, 8.1.2 y 8.1.3), presentando un tránsito hasta el punto de cierre más el aporte de la sub-cuenca restante.

Un caso particular y que merece un análisis aparte es el del río Los Nogales, ya en el mismo se presentan dos tránsitos en el modelo.

➤ Cuenca río Los Nogales

El modelo ingresado en el HEC-HMS para este río es el de la siguiente figura.

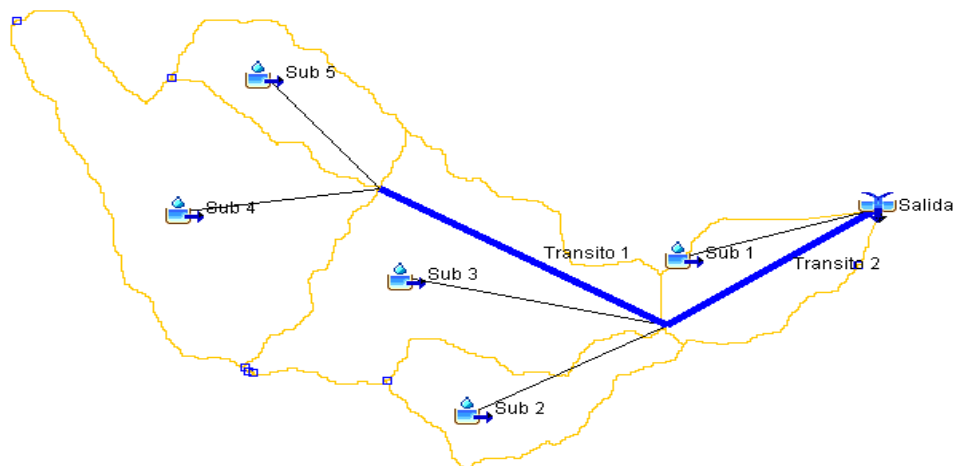


Figura 80. Modelo río Los Nogales HEC-HMS

En la Figura 80 se puede observar la disposición de las cinco sub-cuencas. La 4 y la 5 convergen en un punto y luego transitan a través de la 3 (tránsito 1). Esta última converge con la 2 y transitan en conjunto con el tránsito 1 a través de la sub-cuenca 1 (tránsito 2). La Figura 81 corresponde al hietograma de la sub-cuenca 1 del río Los Nogales para un $Tr=100$ años.

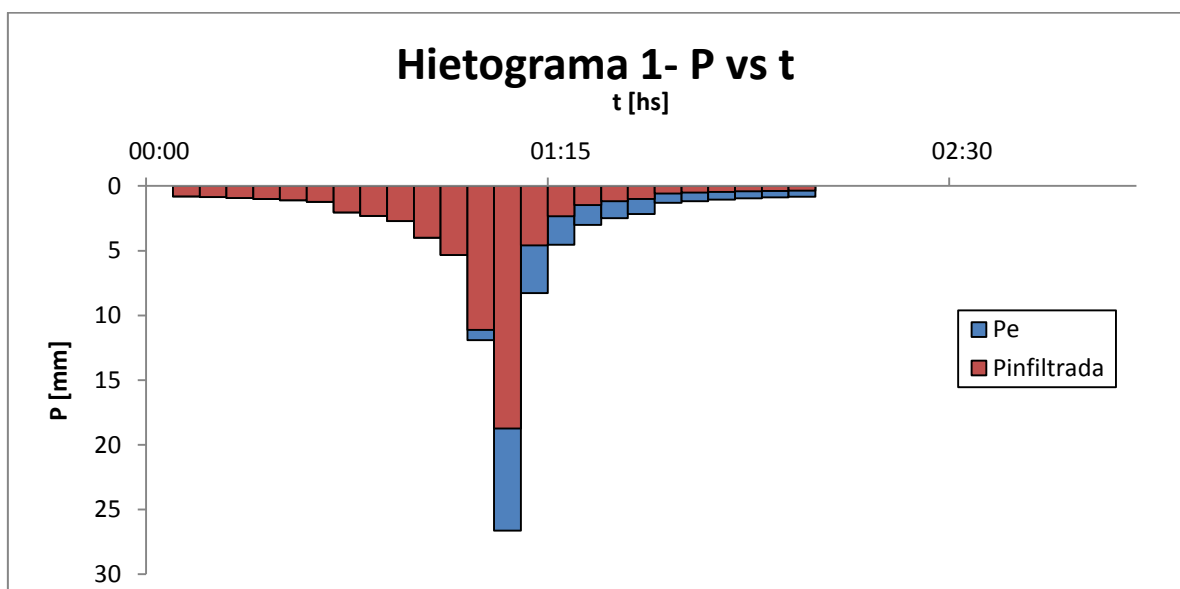


Figura 81. Hietograma sub-cuenca 1 de río Los Nogales para $Tr=100$ años

En el mismo se puede observar la fracción de la precipitación que se infiltra y la efectiva. Estas serán distintas para cada sub-cuenca, ya que el CN varía.

En la Figura 82 se muestra el hidrograma del tránsito 1.

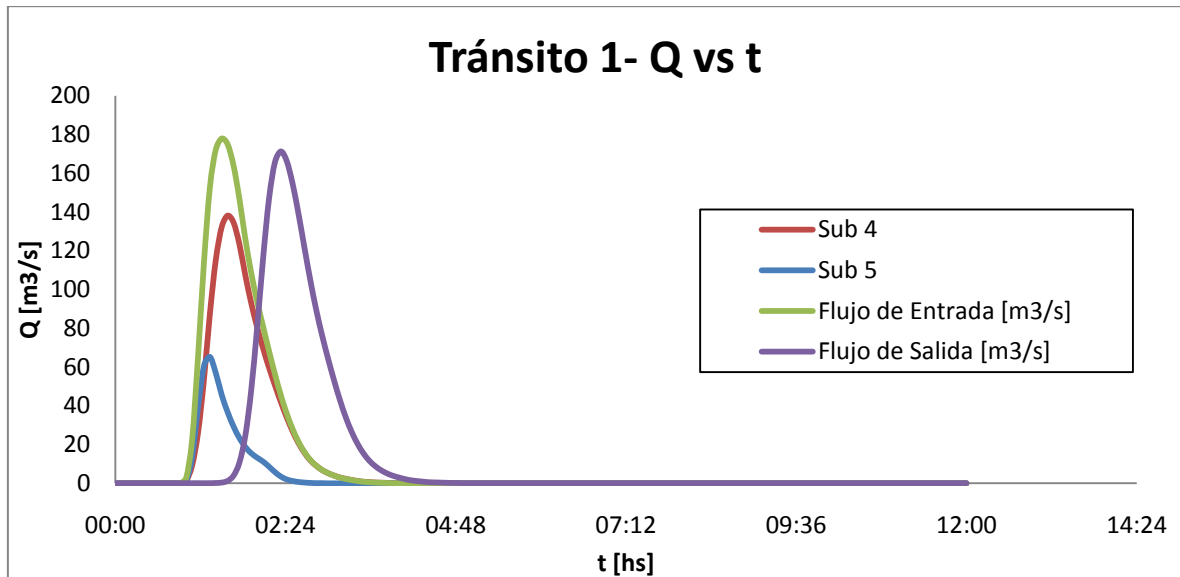


Figura 82. Hidrograma de tránsito 1 en cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años

Se observan los caudales de las sub-cuencas 4 y 5 (para $Tr= 100$ años), los cuales confluyen en un punto y conforman el flujo de entrada del tránsito por sub-cuenca 3, el cual es la envolvente de 4 y 5 (ver modelo en Figura 80). Estos transitan a lo largo de sub-cuenca 3 hasta llegar al punto donde también confluyen esta misma y la sub-cuenca 2, obteniendo así un flujo de salida. En el gráfico se puede observar la atenuación existente entre el flujo de entrada al tránsito y el de salida, además de su desfase en el tiempo. En la siguiente figura se observa el hidrograma del tránsito 2.

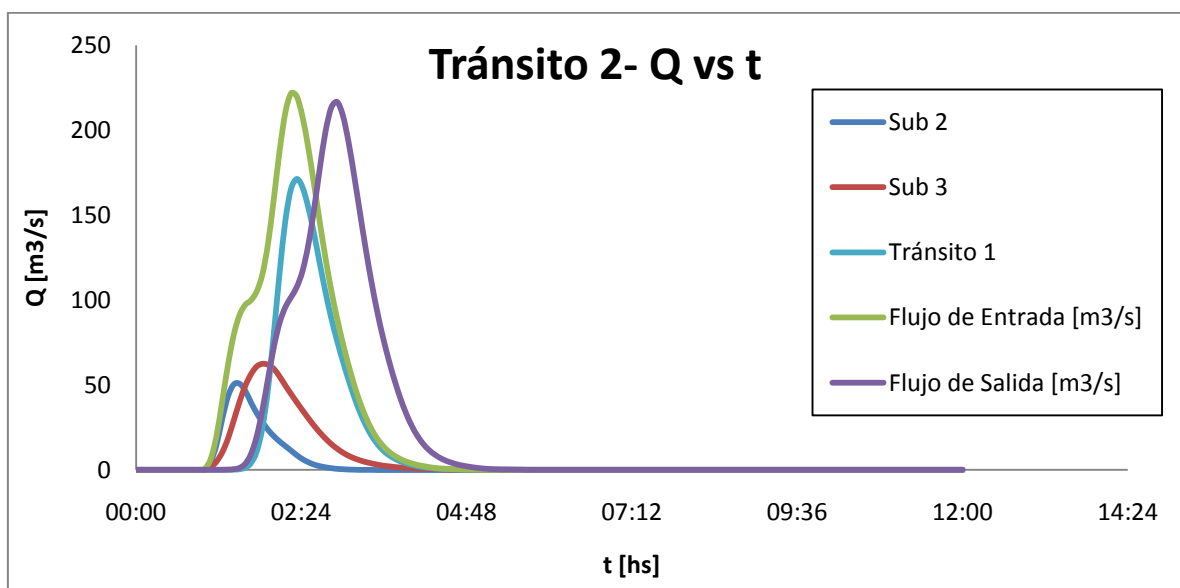


Figura 83. Hidrograma de tránsito 2 en cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años



En el hidrograma del tránsito 2, el flujo de entrada corresponde a la envolvente de los caudales de la sub-cuenca 2 y la 3, los cuales llegan primeros, y luego se adiciona los del tránsito 1, correspondientes a las sub-cuencas 4 y 5. Todos estos transitan por sub-cuenca 1 hasta el punto de cierre de la cuenca de Los Nogales, obteniendo así el flujo de salida. En el gráfico se puede observar la atenuación existente entre el flujo de entrada al tránsito y el de salida, además de su desfase en el tiempo.

La Figura 84 muestra el hidrograma total de salida de la cuenca de Los Nogales para $Tr=100$ años.

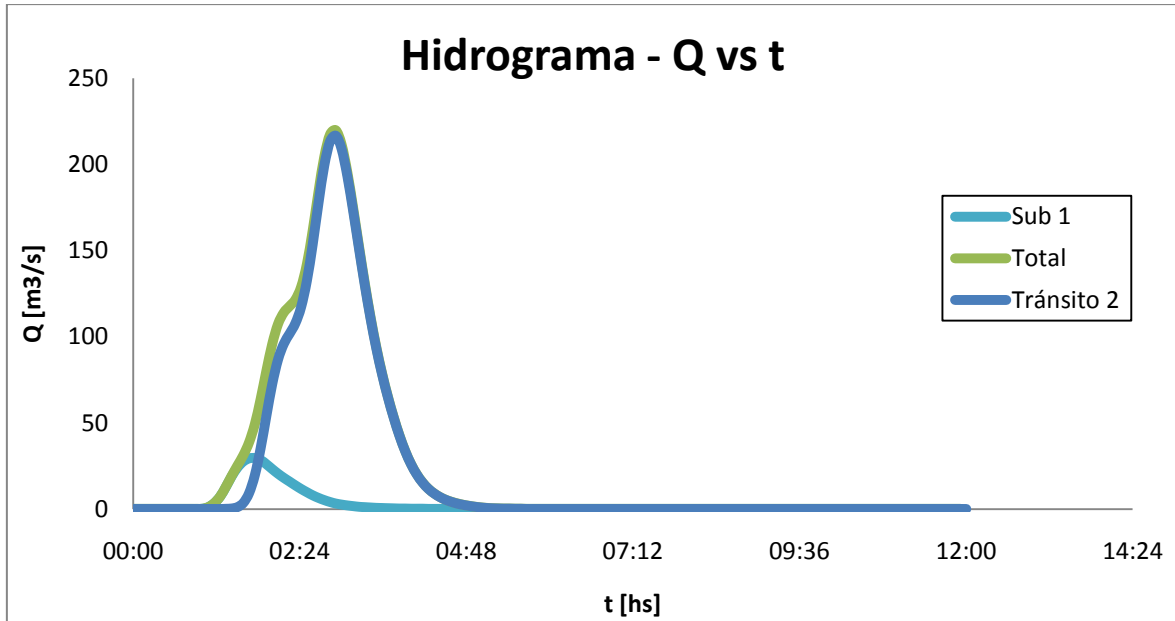


Figura 84. Hidrograma total de la cuenca Los Nogales para $Tr=100$ años

Se puede observar que al principio el punto de cierre recibe el caudal correspondiente a la sub-cuenca 1 y luego se agrega el tránsito 2 (ver modelo en Figura 80). La envolvente de estos dos caudales corresponde al hidrograma total de salida de la cuenca en el punto de cierre de la misma. Es importante aclarar que hasta aquí se han expuesto los resultados obtenidos para un $Tr=100$ años. Para los distintos tiempos de retorno los efectos resultan equivalentes y únicamente cambia el valor de los caudales. Los hidrogramas de salida de la cuenca para todos los Tr se muestran en la siguiente figura.

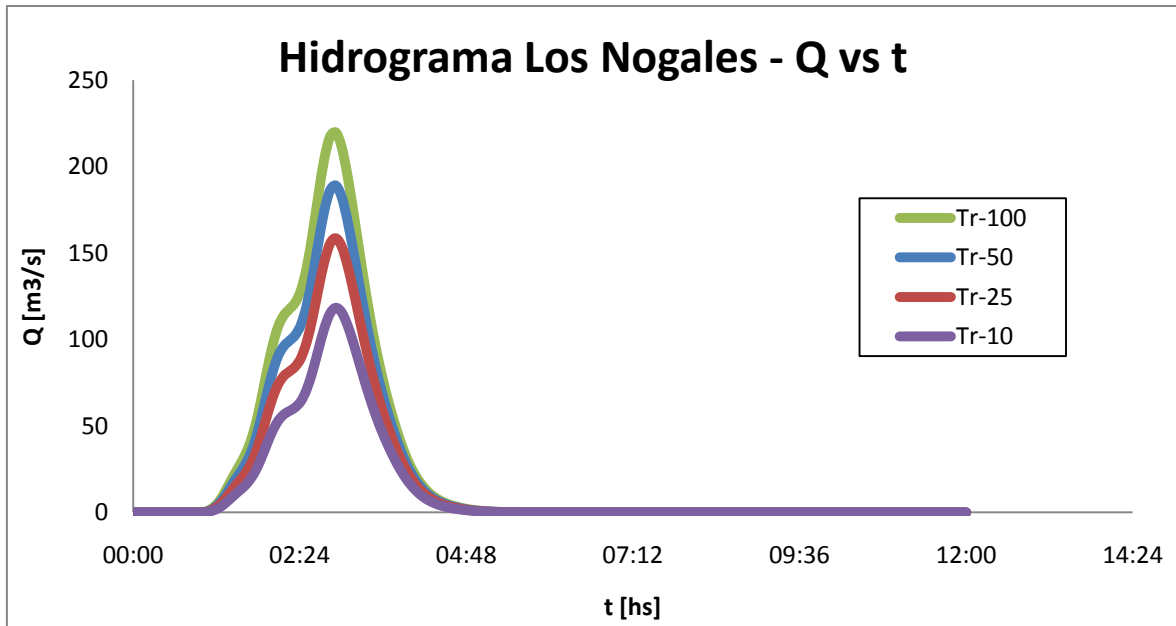


Figura 85. Hidrogramas de salida de cuenca Los Nogales



CAPITULO 7



7 CAPITULO 7.- Conclusiones

En el presente capítulo se exponen las conclusiones del proyecto y sobre la experiencia de la práctica supervisada.

7.1 Sobre el proyecto

Se ha logrado realizar una recopilación de antecedentes de estudios previos y un estudio hidrológico en cinco cuencas ubicadas en los Departamentos Ambato y Pomán en la Provincia de Catamarca a través del uso de herramientas informáticas, obteniendo así los caudales de diseño para diferentes escenarios hidrológicos. Para esto:

- Se analizó la información existente de estudios previos, destacando como fortalezas a la información útil para este estudio, y como debilidades las áreas de vacancia que estos estudios presentaban.
- Se definió un procedimiento para suplir las áreas de vacancia y poder así llevar adelante la modelación hidrológica de cada una de las cuencas.
- Se adquirieron conocimientos y se realizó un entrenamiento previo en el uso de herramientas informáticas específicas (IDRISI y HEC-HMS) a través de las cuales se modelaron cada una de las cuencas.
- Se determinaron los parámetros morfométricos de las cinco cuencas (área, pendiente y longitud de cauce principal...) y las características del suelo y la vegetación.
- Dado que la cuenca de Andalgalá ubicada a 85Km de las cuencas estudiadas posee un registro histórico de caudales y resultó homogénea a las mismas, se aplicó la metodología de regionalización de caudales, a los fines de validar los resultados de la modelación hidrológica.
- Se determinaron los parámetros hidrológicos básicos de las cinco cuencas (tiempo de concentración, tiempo de retorno, lluvia de diseño, CN e infiltración inicial)
- Se plantearon diferentes escenarios de simulación para tiempos de retorno de 100, 50, 25 y 10 años, y se realizaron las modelaciones hidrológicas obteniendo los correspondientes caudales de diseño.
- La importancia de la cuencas en relación a los caudales que generan son Ambato, Seco, Los Nogales, Saujil y Siján.

7.2 Sobre la experiencia de la práctica supervisada

- Se trabajó en el marco de un proyecto profesional aplicando y profundizando los conceptos adquiridos durante los años de estudio de la carrera. Los resultados se



presentan en este informe que será de utilidad para estudios posteriores y/o análisis relacionados con la temática expuesta.

- Se incorporaron nuevos conocimientos relacionados con el uso de software de aplicación.
- Convivencia con un excelente grupo de trabajo y calidad humana, adquiriendo experiencia en trabajos grupales, existiendo cooperación en equipo para sortear las dificultades que se presentaron.



ANEXO

8 Anexo

8.1 Modelizaciones

8.1.1 Río Seco

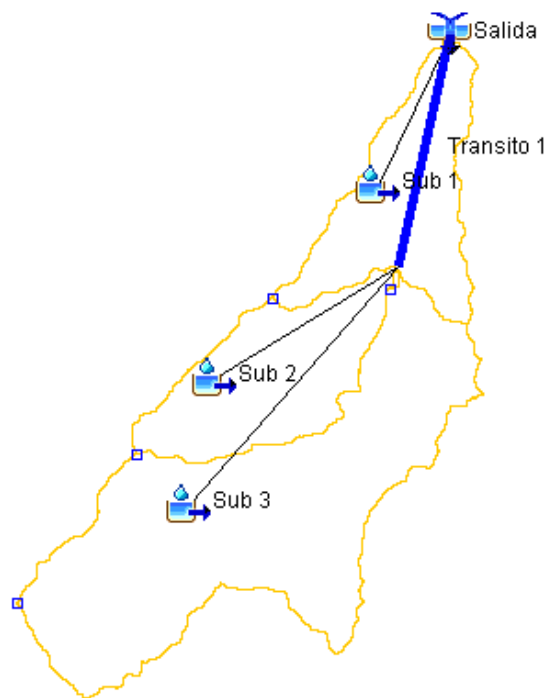


Figura 86. Modelo río Seco HEC-HMS

8.1.2 Río Saujil

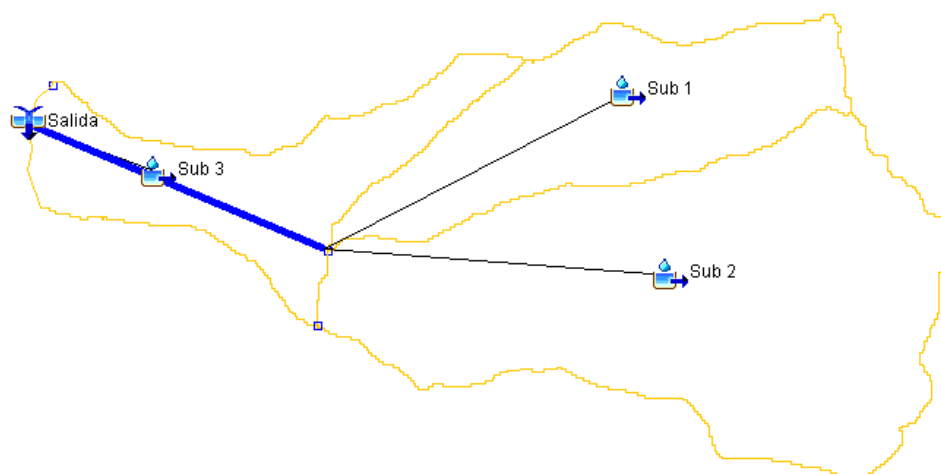


Figura 87. Modelo río Saujil HEC-HMS



8.1.3 Río Siján

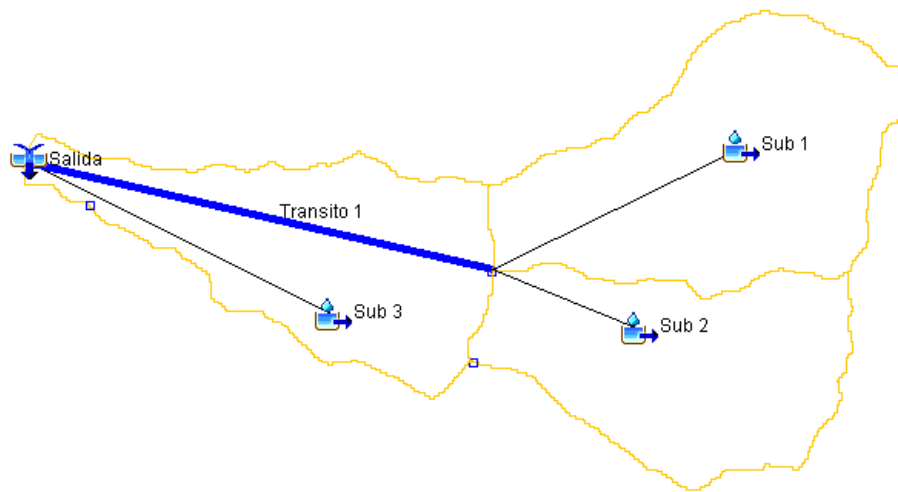


Figura 88. Modelo río Siján HEC-HMS



BIBLIOGRAFIA



9 Bibliografía

- Ing. Jorge A. Maza (Resp. Proyecto), Ing. Patricia López, Ing. Victor H. Burgos (2.012) - **DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO EN EL RODEO DEPARTAMENTO AMBATO-CATAMARCA** – INA. Instituto Nacional del Agua, Provincia de Catamarca, Secretaría de Agua y el Ambiente Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos.
- Magalí Cervio, Nicolás F. Guillén, Ada Patricia Lobo, Clarita M. Dasso, Carlos M. García - **REGIONALIZACIÓN DE LÁMINAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA** - CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua - Universidad Nacional de Córdoba - Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba; Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca; CONICET . Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas ; Centro de las Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua, Córdoba, Argentina.
- Profesor Geól. Osvaldo Barbeito, Geól. Marcelo Lobo Rodríguez (2.000) – **EL RODEO RÍO AMBATO DIAGNÓSTICO PRELIMINAR IN-SITU DE LA SITUACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO DE LA POBLACIÓN DE EL RODEO** – Escuela de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Valérie Baumann; Noelia Carrizo; Florencio Saavedra; Lic. Graciela Marin (2.014) - **INFORME PRELIMINAR SOBRE LOS ALUVIONES OCURRIDOS EL 23 DE ENERO 2.014 EN LAS CIUDADES CATAMARQUEÑAS DE EL RODEO Y SIJÁN** – Servicio Geológico Minero Argentino –SEGEMAR
- Ibáñez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, Juan Manuel – **MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (tc) DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA** - Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Ven Te Chow et al (1.994) – **HIDROLOGÍA APLICADA** - McGraw Hill.
- Ortega Francisco, Ottaviani Marcelo (2010) - **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEPTUALES PARA PRONÓSTICO DE CRECIDAS EN UNA CUENCA DE MONTAÑA (RÍO SAN ANTONIO, PROVINCIA DE CÓRDOBA)** - Universidad Católica de Córdoba.
- Sanchez San Román, F. Javier (2011) - **HIDROLOGÍA SUPERFICIAL** - Universidad de Salamanca, España.
- Camilo Bastidas - **MANUAL HEC-HMS, VERSIÓN 3.4** - Dpto. Ingeniería Hidrometeorológica, Facultad de Ingeniería, UCV.

Páginas web consultadas:

- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>



- <http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>
- <http://culvertdesign.com/how-to-calculate-time-of-concentration-using-the-scs-method/>
- <http://www.aguaysig.com/2014/08/tiempo-de-concentracion-de-la-cuenca.html>
- http://geointa.inta.gov.ar/publico/POSTERS/HAVRYLENKO_Estimacion_del_numero_de_curva_en_la_cuenca_del_rio_arrecifes_UU01.pdf
- <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>