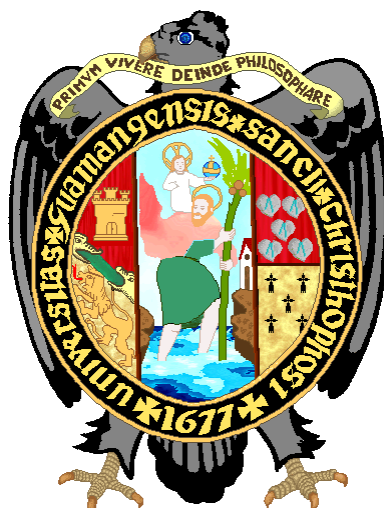


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES  
DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE  
SUCRE - AYACUCHO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**PRESENTADO POR  
FADER EDIZON ZARABIA ROMERO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2016**

## **DEDICATORIA**

*Con inmenso cariño a mis padres  
Baciliano e Irene, quienes me infundieron  
un espíritu de superación y trabajo para  
lograr mis metas.*

*A mis hermanos y familiares, por el  
apoyo incondicional que en todo instante me  
brindaron.*

*A mi esposa y mis retoños, que son  
el motor y razón de mis días. A quienes les  
dedico este trabajo por ser la fuerza de mi  
superación.*

***Fader Edizon***

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por haberme concedido la existencia y la sabiduría para obrar en beneficio de mis semejantes.*

*A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias y la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, alma mater de mi formación profesional y esencia de mi superación. Por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mis conocimientos dentro de sus claustros.*

*De igual manera a todos los docentes de la Facultad de Ciencias Agrarias, en especial a los de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por contribuir en mi formación académica y social.*

*Al Ingeniero Leónidas Arias Baltazar, asesor del presente trabajo, quien me brindó su apoyo y orientación, haciendo posible el presente trabajo de investigación.*

*Al Ingeniero Joel Iwanaga Oré, quién me inculcó con gran motivación desarrollar esta especialidad del SIG aplicado a la Hidrología, compartiendo su valioso conocimiento.*

*A todas aquellas personas que han contribuido de alguna forma, para el cumplimiento y materialización del presente trabajo.*

# ÍNDICE

|   |            |
|---|------------|
| <b>DEDICATORIA</b> .....  | <b>i</b>   |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....  | <b>ii</b>  |
| <b>ÍNDICE</b> .....   | <b>iii</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....   | <b>vi</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....  | <b>vii</b> |
| <b>ABREVIATURAS</b> .....   | <b>xiv</b> |
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>xv</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>1</b>   |
| <b>I. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....  | <b>3</b>   |
| <b>1.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)</b> .....                          | <b>3</b>   |
| 1.1.1 Concepto de SIG .....   | 3          |
| 1.1.2 Componentes del SIG .....   | 3          |
| 1.1.3 Topologías, modelos de datos en el SIG.....                                 | 4          |
| 1.1.3.1 Objetos vector.....   | 4          |
| 1.1.3.2 Objetos ráster (tramas).....  | 5          |
| 1.1.4 Georreferenciación .....  | 5          |
| 1.1.4.1 Datum.....  | 5          |
| 1.1.4.2 Datum WGS-84 sistema GPS .....  | 6          |
| 1.1.4.3 Sistema de coordenadas UTM.....   | 6          |
| 1.1.4.4 Sistema de coordenadas geográficas.....                                   | 6          |
| 1.1.5 Los SIG en las modelizaciones hidrológicas .....                            | 7          |
| 1.1.6 Aplicaciones de los SIG en la modelización hidrológica .....                | 7          |
| 1.1.7 Los errores en los SIG y sus implicancias en los modelos hidrológicos.....  | 8          |
| 1.1.8 Limitaciones de los SIG en las modelizaciones hidrológicas .....            | 8          |
| 1.1.9 Software utilizado para el procesamiento de los SIG .....                   | 9          |
| 1.1.9.1 ArcGIS Desktop.....   | 9          |
| 1.1.9.2 Autocad Civil 3D .....  | 10         |
| 1.1.9.3 HEC-HMS .....   | 10         |
| 1.1.9.4 HEC-GeoHMS.....   | 11         |
| 1.1.9.5 EL HEC-RAS.....   | 12         |
| 1.1.9.6 EL HEC-GeoRAS.....  | 12         |
| <b>1.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA EN CUENCAS</b> ..... | <b>14</b>  |
| 1.2.1 Cuenca hidrográfica.....  | 14         |
| 1.2.2 Clasificación de cuencas hidrográficas por su área.....                     | 15         |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 1.2.3      | <i>Determinación de tormentas de diseño</i>   | 16        |
| 1.2.3.1    | <i>Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia</i>                                    | 17        |
| 1.2.3.2    | <i>Hietogramas de precipitación de diseño usando el método IILA-SENAMHI-UNI</i>     | 19        |
| 1.2.3.3    | <i>Método del bloque alterno</i>  | 21        |
| 1.2.3.4    | <i>Método de hietograma sintéticos de tormenta del SCS</i>                          | 21        |
| 1.2.4      | <i>Tasa de infiltración, por pérdidas con el método del número de curva del SCS</i> | 22        |
| 1.2.5      | <i>Hidrogramas unitarios sintéticos</i>   | 24        |
| 1.2.5.1    | <i>Hidrograma sintético triangular del SCS</i>                                      | 24        |
| 1.2.5.2    | <i>Método del hidrograma unitario sintético de Snyder</i>                           | 25        |
| 1.2.5.3    | <i>Convolución discreta para un sistema lineal</i>                                  | 28        |
| 1.2.5.4    | <i>Deducción del hidrograma unitario</i>  | 28        |
| 1.2.6      | <i>Determinación de hidrogramas</i>   | 29        |
| 1.2.7      | <i>Transito hidrológico</i>   | 30        |
| 1.2.7.1    | <i>Modelo de Muskingum y Muskingun Cungue</i>                                       | 31        |
| <b>1.3</b> | <b><i>MODELACIÓN HIDRÁULICA EN UN CANAL NATURAL (RÍOS)</i></b>                      | <b>34</b> |
| 1.3.1      | <i>Ecuaciones para cálculo de perfil básico</i>                                     | 34        |
| 1.3.1.1    | <i>Ecuación de Energía</i>  | 34        |
| 1.3.2      | <i>Características y clasificación de los perfiles de flujo</i>                     | 39        |
| 1.3.3      | <i>Métodos de cálculo de superficie libre de agua</i>                               | 43        |
| 1.3.3.1    | <i>Método de la ecuación de energía (Método del paso estándar)</i>                  | 43        |
| 1.3.4      | <i>Coefficiente de rugosidad de Manning “n” compuesto para el canal principal</i>   | 48        |
| 1.3.5      | <i>Evaluación de la carga de energía cinética media</i>                             | 50        |
| 1.3.6      | <i>Evaluación de las pérdidas por fricción</i>                                      | 51        |
| 1.3.7      | <i>Evaluación de las pérdidas por expansión y contracción</i>                       | 52        |
| 1.3.8      | <i>Procedimiento computacional</i>  | 53        |
| 1.3.8.1    | <i>Método numérico de la secante usado por el HEC-RAS</i>                           | 54        |
| 1.3.9      | <i>Determinación de las profundidades críticas</i>                                  | 58        |
| 1.3.10     | <i>Cálculos a régimen de flujo mixto</i>  | 65        |
| <b>II.</b> | <b><i>MATERIALES Y MÉTODOS</i></b>  | <b>68</b> |
| <b>2.1</b> | <b><i>DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DEL ESTUDIO</i></b>                                    | <b>68</b> |
| 2.1.1      | <i>Ubicación política</i>   | 68        |
| 2.1.2      | <i>Ubicación geográfica</i>   | 69        |
| 2.1.3      | <i>Clima y zonas de vida</i>  | 70        |
| 2.1.4      | <i>Suelos</i>   | 70        |
| 2.1.5      | <i>Cobertura vegetal</i>  | 71        |
| 2.1.6      | <i>Vías de comunicación</i>   | 73        |

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>2.2</b>  | <b>MATERIALES Y EQUIPOS</b> .....  | <b>74</b>  |
| 2.2.1       | Materiales.....  | 74         |
| 2.2.2       | Equipos.....   | 74         |
| 2.2.3       | Software.....  | 74         |
| <b>2.3</b>  | <b>MÉTODOS</b> .....   | <b>75</b>  |
| 2.3.1       | Fase preliminar.....   | 76         |
| 2.3.2       | Fase de campo .....  | 76         |
| 2.3.3       | Fase de gabinete “Modelación hidrológica de precipitación y escorrentía en cuencas” .....                                | 79         |
| 2.3.3.1     | Modelos de Elevación Digital (MED).....  | 80         |
| 2.3.3.2     | Pre procesamiento del MED utilizando el HEC-GeoHMS .....   | 83         |
| 2.3.3.3     | Procesamiento del MED utilizando el HEC-GeoHMS .....   | 84         |
| 2.3.3.4     | Creación de un proyecto utilizando el HEC-GeoHMS .....   | 92         |
| 2.3.3.5     | Procesamiento de la cuenca utilizando el HEC-GeoHMS.....   | 94         |
| 2.3.3.6     | Características de la cuenca y río .....   | 95         |
| 2.3.3.7     | Parámetros hidrológicos.....   | 97         |
| 2.3.3.8     | Integración de HEC-GeoHMS con el HEC-HMS.....  | 99         |
| 2.3.3.9     | Determinación de parámetros hidrológicos en el HEC-HMS.....  | 103        |
| 2.3.3.10    | Determinación del hietograma de diseño .....   | 106        |
| 2.3.3.11    | Determinación de hidrogramas en el punto de aforo para los diferentes períodos de retorno en el entorno de HEC-HMS ..... | 108        |
| 2.3.4       | Fase de gabinete “Modelación hidráulica en ríos”.....  | 115        |
| 2.3.4.1     | Preparación de data desde el modelo raster y vectorial.....  | 116        |
| 2.3.4.2     | Introducción a ArcGIS - HEC-GeoRAS y su entorno .....  | 116        |
| 2.3.4.3     | Aspectos básicos de HEC-GeoRAS.....  | 118        |
| 2.3.4.4     | PreRAS.....  | 118        |
| 2.3.4.5     | Integración de HEC-GeoRAS con el HEC-RAS .....   | 127        |
| 2.3.4.6     | Post RAS.....  | 134        |
| 2.3.4.7     | Creación de mapas de inundación del tramo baños termales de Larcay .....   | 136        |
| <b>III.</b> | <b>RESULTADOS</b> .....  | <b>139</b> |
| <b>IV.</b>  | <b>DISCUSIÓN</b> .....   | <b>162</b> |
| <b>V.</b>   | <b>CONCLUSIONES</b> .....  | <b>167</b> |
| <b>VI.</b>  | <b>RECOMENDACIONES</b> .....   | <b>168</b> |
|             | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | <b>170</b> |
|             | <b>ANEXOS</b> .....  | <b>173</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabla 1.1: Rangos de área para cada unidad hidrográfica .....</i>   | <i>16</i>  |
| <i>Tabla 1.2: Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora.....</i>                                | <i>18</i>  |
| <i>Tabla 1.3 : Características de los perfiles.....</i>  | <i>42</i>  |
| <i>Tabla 1.4: Coeficiente de rugosidad Manning “n” recomendados .....</i>  | <i>48</i>  |
| <i>Tabla 1.5: Modelos recomendados para la pendiente de fricción .....</i>                                       | <i>52</i>  |
| <i>Tabla 1.6: Coeficientes de contracción y expansión.....</i>   | <i>53</i>  |
| <i>Tabla 2.1: Clasificación de zonas de vida de la cuenca del río Chicha Soras .....</i>                         | <i>70</i>  |
| <i>Tabla 2.2: Clasificación de los suelos por su Capacidad de Uso Mayor en la cuenca Chicha Soras.....</i>       | <i>71</i>  |
| <i>Tabla 2.3: Descripción de las unidades de cobertura vegetal.....</i>  | <i>72</i>  |
| <i>Tabla 2.4: Unidades que utiliza HMS para las diferentes características de los tramos y las cuencas .....</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 2.5: Ubicación de las estaciones comprendidas .....</i>   | <i>106</i> |
| <i>Tabla 3.1: Características morfométricas de las sub cuencas del río Chicha .....</i>                          | <i>142</i> |
| <i>Tabla 3.2: Características de los ríos de las sub cuencas del río Chicha.....</i>                             | <i>143</i> |
| <i>Tabla 3.3: Precipitaciones para distintos períodos de retorno .....</i>                                       | <i>145</i> |
| <i>Tabla 3.4: Altura de precipitación-duración-periodo de retorno.....</i>                                       | <i>146</i> |
| <i>Tabla 3.5: Resultado de los caudales máximos de la cuenca en estudio.....</i>                                 | <i>148</i> |
| <i>Tabla 4.1: Valores recomendados de riesgo admisible.....</i>  | <i>163</i> |
| <i>Tabla 4.2: Valores de períodos de retorno T (Años).....</i>   | <i>164</i> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1.1: Componentes del SIG</i> .....   | 4  |
| <i>Figura 1.2: Diagrama de procesos de escurrimiento en una cuenca mediante HEC-HMS</i> .....                  | 11 |
| <i>Figura 1.3: Cuenca hidrográfica delimitada</i> .....  | 15 |
| <i>Figura 1.4: Ejemplo de hietograma de diseño</i> .....   | 21 |
| <i>Figura 1.5 : Distribución temporal de precipitación de 24 horas</i> .....                                   | 22 |
| <i>Figura 1.6: Hidrograma unitario triangular del SCS</i> .....  | 25 |
| <i>Figura 1.7: Representación de un tránsito en un cauce</i> .....   | 30 |
| <i>Figura 1.8: Almacenamiento en prisma y cuña en un tramo de cauce</i> .....                                  | 31 |
| <i>Figura 1.9: muestra el efecto de coeficientes K y X de Muskingum</i> .....                                  | 33 |
| <i>Figura 1.10: Deducción de la ecuación para perfiles de superficie de agua</i> .....                         | 35 |
| <i>Figura 1.11: Curva de energía específica</i> .....  | 36 |
| <i>Figura 1.12: Clasificación de perfiles de flujo gradualmente variados</i> .....                             | 43 |
| <i>Figura 1.13: Representación de términos en la ecuación de energía</i> .....                                 | 44 |
| <i>Figura 1.14 Método de subdivisión de la conductividad definido por el HEC-RAS</i> .....                     | 46 |
| <i>Figura 1.15: Método de subdivisión de la conductividad definido por el HEC-2</i> .....                      | 46 |
| <i>Figura 1.16 Definición de la pendiente para el cálculo de la rugosidad compuesta</i> .....                  | 47 |
| <i>Figura 1.17 Nomograma para resolver la fórmula de Manning</i> .....   | 50 |
| <i>Figura 1.18: Ejemplo de la obtención de la energía media</i> .....  | 51 |
| <i>Figura 1.19 Subdivisión por franjas de una sección transversal típica (Método paso estándar)</i><br>.....   | 56 |
| <i>Figura 1.20 Aplicación del principio de momentum</i> .....  | 61 |
| <i>Figura 1.21: Subdivisión por franjas de una sección transversal típica (principio de momentum)</i><br>..... | 64 |
| <i>Figura 1.22: Ejemplo de perfil en el HEC-RAS a régimen de flujo mixto</i> .....                             | 67 |
| <i>Figura 2.1: Ubicación política del área de la investigación a nivel nacional y regional</i> .....           | 68 |
| <i>Figura 2.2: Ubicación geográfica de la cuenca del río Chicha</i> .....                                      | 69 |
| <i>Figura 2.3 Praderas con problemas de sobrepastoreo en el distrito de Larcay</i> .....                       | 71 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 2.4: Pastizales en zonas altas de la cuenca Chicha.....</i>  | <i>72</i> |
| <i>Figura 2.5: Bosque de matorral arbolado en las planicies alto andinas de la cuenca Chicha.....</i>                                      | <i>73</i> |
| <i>Figura 2.6: Plantaciones exóticas, bosque de eucaliptos en la margen derecha de la cuenca río Chicha.....</i>                           | <i>73</i> |
| <i>Figura 2.7: Flujograma metodológico del presente investigación .....</i>  | <i>75</i> |
| <i>Figura 2.8: Toma de puntos de control con un GPS para clasificación de suelos .....</i>   | <i>77</i> |
| <i>Figura 2.9: Referenciación del cauce tributario del río Chicha.....</i>   | <i>77</i> |
| <i>Figura 2.10: Análisis y planificación de los trabajos del tramo baños termales de Larcay ....</i>                                       | <i>78</i> |
| <i>Figura 2.11: Coordinación del levantamiento topográfico, apoyado en los trabajos de la fase preliminar .....</i>                        | <i>78</i> |
| <i>Figura 2.12: levantamiento topográfico del cauce, riberas y planicies de posible inundación de tramo baños termales de Larcay. ....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 2.13: Portal web, para descargar los MED .....</i>   | <i>81</i> |
| <i>Figura 2.14 Global Mapper. a) Vista inicial, b) Archivos o carpetas que conforman el MED .....</i>                                      | <i>81</i> |
| <i>Figura 2.15 Cambio de coordenadas geográficas a UTM.....</i>  | <i>82</i> |
| <i>Figura 2.16: Modelo digital de elevación (MED).....</i>   | <i>82</i> |
| <i>Figura 2.17: Exportar MED.....</i>  | <i>83</i> |
| <i>Figura 2.18: Proceso de llenado de vacíos en raster.....</i>  | <i>84</i> |
| <i>Figura 2.19: Zonas planas y depresiones en los MED .....</i>  | <i>84</i> |
| <i>Figura 2.20: Interpretación de la dirección de flujo .....</i>  | <i>85</i> |
| <i>Figura 2.21: Procesamiento de dirección de flujo.....</i>   | <i>86</i> |
| <i>Figura 2.22: Interpretación de la acumulación de flujo.....</i>   | <i>86</i> |
| <i>Figura 2.23: Procesamiento de acumulación de flujo.....</i>   | <i>87</i> |
| <i>Figura 2.24: Procesamiento de la delineación de cuencas y ríos.....</i>   | <i>88</i> |
| <i>Figura 2.25: Segmentación de ríos.....</i>  | <i>89</i> |
| <i>Figura 2.26: Procesamiento de delineación de sub cuenca .....</i>   | <i>89</i> |
| <i>Figura 2.27: Procesamiento de sub cuencas .....</i>   | <i>90</i> |
| <i>Figura 2.28: Procesamiento de la línea de Drenaje .....</i>   | <i>91</i> |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 2.29: Adición de sub cuencas .....</i>  | <i>91</i>  |
| <i>Figura 2.30: Iniciar un nuevo proyecto en HEC-GeoHMS a) HMS Project Setup, b) Opciones por default, c) Características del proyecto, d) Indicaciones para agregar puntos de proyecto. ....</i> | <i>92</i>  |
| <i>Figura 2.31: Creación del punto de salida o punto de aforo de la cuenca .....</i>  | <i>93</i>  |
| <i>Figura 2.32: Delimitación preliminar de la cuenca .....</i>  | <i>93</i>  |
| <i>Figura 2.33: Cuenca delimitado con su conjunto de sub cuencas .....</i>  | <i>94</i>  |
| <i>Figura 2.34: Agrupamiento de la subcuencas en áreas mayores .....</i>  | <i>94</i>  |
| <i>Figura 2.35: Unión de varios tramos de ríos de acuerdo a las subcuencas agrupadas .....</i>  | <i>95</i>  |
| <i>Figura 2.36: Menú de basin characteristics.....</i>  | <i>95</i>  |
| <i>Figura 2.37: Ejecución del comando slope.....</i>  | <i>96</i>  |
| <i>Figura 2.38: Longitud más larga del flujo .....</i>  | <i>96</i>  |
| <i>Figura 2.39: Cálculo del centroide de la cuenca .....</i>  | <i>96</i>  |
| <i>Figura 2.40: Cálculo del centroide de la corriente con mayor longitud.....</i>   | <i>97</i>  |
| <i>Figura 2.41: Componentes del menú parámetros.....</i>  | <i>97</i>  |
| <i>Figura 2.42: Datos considerados para el procesamiento .....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Figura 2.43: Conformación de los elementos del modelo .....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Figura 2.44: Generación de las leyendas de los elementos hidrológicos entorno HEC-HMS .....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Figura 2.45: Opción de preparación de data a exportar.....</i>   | <i>102</i> |
| <i>Figura 2.46: Exportación del modelo para el HEC-HMS.....</i>   | <i>102</i> |
| <i>Figura 2.47: Contenido de la carpeta exportado para el HEC-HMS.....</i>  | <i>103</i> |
| <i>Figura 2.48: Creación de proyecto en el entorno HEC-HMS.....</i>   | <i>104</i> |
| <i>Figura 2.49: Importación del modelo generado en el HEC-GeoHMS.....</i>   | <i>104</i> |
| <i>Figura 2.50: Modelo hidrológico importado del HEC-GeoHMS, en entorno HEC-HMS.....</i>  | <i>104</i> |
| <i>Figura 2.51: Modelo hidrológico importado del HEC-GeoHMS, en entorno HEC-HMS adicionado el mapa base de la sub cuenca y ríos del modelo .....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Figura 2.52: Datos de cuenca importados del entorno HEC-GeoHMS.....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Figura 2.53: Datos de los canales de transito hidrológico, importados del entorno.....</i>   | <i>106</i> |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 2.54: Determinación de la estación de influencia por el método de polígono de Thiessen para el estudio.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura 2.55: Tratamiento estadístico para la obtención de precipitaciones para distintos períodos de retorno .....</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura 2.56: Resultados obtenidos tras los análisis estadísticos utilizando el software HidroEsta V.2.....</i>         | <i>108</i> |
| <i>Figura 2.57: Creación de modelo meteorológico .....</i>  | <i>109</i> |
| <i>Figura 2.58: Muestra de los 5 modelos meteorológicos .....</i>   | <i>109</i> |
| <i>Figura 2.59: Selección del modelo meteorológico, para la simulación de la cuenca.....</i>                              | <i>110</i> |
| <i>Figura 2.60: Integración de las subcuencas al modelo meteorológico.....</i>  | <i>110</i> |
| <i>Figura 2.61: Ingreso del hietograma de la tormenta generado.....</i>   | <i>111</i> |
| <i>Figura 2.62: Establecimiento de un punto de control, para el análisis de los resultados.....</i>                       | <i>112</i> |
| <i>Figura 2.63: Generación de los distintos escenarios para la corrida .....</i>  | <i>112</i> |
| <i>Figura 2.64: Ejecución de los escenarios, en forma satisfactoria.....</i>  | <i>113</i> |
| <i>Figura 2.65: Resultado en modo tabla, del hidrograma de una subcuenca.....</i>   | <i>113</i> |
| <i>Figura 2.66: Presentación del hidrograma de una sub cuenca, en forma gráfica .....</i>                                 | <i>114</i> |
| <i>Figura 2.67: Presentación de un hidrograma en un punto de unión de varias subcuencas... </i>                           | <i>114</i> |
| <i>Figura 2.68: Hidrograma en el punto de aforo, salida total de la cuenca.....</i>                                       | <i>114</i> |
| <i>Figura 2.69: Fichero CAD utilizado para generar el MED vectorial.....</i>  | <i>116</i> |
| <i>Figura 2.70: Activación de las extensiones 3D Analyst y Spatial Analys .....</i>                                       | <i>117</i> |
| <i>Figura 2.71: Activación de la aplicación HEC-GeoRAS .....</i>  | <i>117</i> |
| <i>Figura 2.72: Menú plegable creación de capas en HEC-GeoRAS .....</i>   | <i>118</i> |
| <i>Figura 2.73: Herramienta del Editor .....</i>  | <i>119</i> |
| <i>Figura 2.74: Creación y edición de cada uno de los elementos en HEC-GeoRAS.....</i>                                    | <i>119</i> |
| <i>Figura 2.75: Edición del eje del cauce “river.shp” .....</i>   | <i>120</i> |
| <i>Figura 2.76: Asignación de un nombre al eje del cauce “river.shp”. .....</i>   | <i>120</i> |
| <i>Figura 2.77: Edición de los límites del cauce o “banks.shp”. .....</i>   | <i>121</i> |
| <i>Figura 2.78: Pregunta del Software para convertir el “river.shp” en otro elemento adicional .....</i>                  | <i>121</i> |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 2.79: Conversión del “river.shp” en Flowpaths .....</i>   | <i>122</i> |
| <i>Figura 2.80: Edición de los “flowpaths.shp” .....</i>  | <i>122</i> |
| <i>Figura 2.81: Creación de las secciones .....</i>   | <i>122</i> |
| <i>Figura 2.82: Edición de las secciones transversales o “XScutlines.shp”. en forma automática .....</i>  | <i>123</i> |
| <i>Figura 2.83: Elementos necesarios para definir la geometría del cauce.....</i>                         | <i>124</i> |
| <i>Figura 2.84: Asignación de atributos al “Centerline”. .....</i>  | <i>124</i> |
| <i>Figura 2.85: Asignación de atributos a las “Secciones”. .....</i>                                      | <i>125</i> |
| <i>Figura 2.86: Confección de un mapa del “n” coeficiente de Manning .....</i>                            | <i>125</i> |
| <i>Figura 2.87: Asignación del “n” coeficiente de Manning a los cálculos.....</i>                         | <i>126</i> |
| <i>Figura 2.88: Proceso de extracción del “n” coeficiente de Manning .....</i>                            | <i>126</i> |
| <i>Figura 2.89: Preparación de la data requerida para la exportar del SIG.....</i>                        | <i>127</i> |
| <i>Figura 2.90: Proceso de exportación del SIG hacia el HEC-RAS.....</i>                                  | <i>127</i> |
| <i>Figura 2.91: Características de la importación.....</i>  | <i>128</i> |
| <i>Figura 2.92: Se puede verificar la importación en la ventana de datos de geometría en HEC-RAS.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Figura 2.93: Verificación del “n” coeficientes de Manning, en los datos importados.....</i>            | <i>129</i> |
| <i>Figura 2.94: Verificación de la geometría de las secciones importadas .....</i>                        | <i>129</i> |
| <i>Figura 2.95: Guardar la geometría importada.....</i>   | <i>130</i> |
| <i>Figura 2.96: Edición de las condiciones de caudal para la simulación respectiva.....</i>               | <i>130</i> |
| <i>Figura 2.97: HEC-RAS: Edición de los datos de flujo.....</i>   | <i>130</i> |
| <i>Figura 2.98: Salvar los datos de flujo.....</i>  | <i>131</i> |
| <i>Figura 2.99: Creación de un plan de simulación y su posterior ejecución.....</i>                       | <i>131</i> |
| <i>Figura 2.100: Verificación de los datos ingresados y ejecutados.....</i>                               | <i>131</i> |
| <i>Figura 2.101: Nueva revisión de las secciones transversales con los niveles de inundación.....</i>     | <i>132</i> |
| <i>Figura 2.102: Vista de perfil y los elementos hidráulicos para su interpretación.....</i>              | <i>132</i> |
| <i>Figura 2.103: Vista isométrica de los elementos hidráulicos para su interpretación .....</i>           | <i>132</i> |
| <i>Figura 2.104: Resultados de la hidráulica por sección .....</i>  | <i>133</i> |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Figura 2.105: Resultados de la hidráulica por múltiples secciones.</i>                                    | 133 |
| <i>Figura 2.106: Preparación de la data para exportar al SIG.</i>  | 134 |
| <i>Figura 2.107: Preparación de la data para exportar al SIG.</i>  | 134 |
| <i>Figura 2.108: Conversión de la data exportada dentro del SIG, para el Post RAS</i>                        | 134 |
| <i>Figura 2.109: Proceso de transformación de la data dentro del SIG, para su visualización</i>              | 135 |
| <i>Figura 2.110: Finalización de la transformación entorno SIG.</i>  | 135 |
| <i>Figura 2.111: Resultado de la lectura del archivo de exportación.</i>                                     | 136 |
| <i>Figura 2.112: Proceso de conversión a planicies de inundación para cada plan.</i>                         | 136 |
| <i>Figura 2.113: Llanura de inundación para el período de retorno considerado.</i>                           | 137 |
| <i>Figura 2.114: Grid de profundidad.</i>  | 137 |
| <i>Figura 2.115: Finalización de la elaboración de planicies de inundación con fondo de una orthoimagen.</i> | 138 |
| <i>Figura 2.116: Evaluación de los resultados</i>  | 138 |
| <i>Figura 3.1: Cuenca y subcuencas del río Chicha, Sucre – Ayacucho, obtenidas con el HEC-GeoHMS</i>         | 139 |
| <i>Figura 3.2: Modelo Hidrológico de la cuenca entorno HEC-HMS.</i>  | 144 |
| <i>Figura 3.3: Determinación de la influencia de cada estación meteorológica.</i>                            | 146 |
| <i>Figura 3.4: Altura de precipitación ingresada al software HEC-HMS</i>                                     | 147 |
| <i>Figura 3.5: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 10 años.</i>                              | 147 |
| <i>Figura 3.6: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 20 y 50 años</i>                          | 147 |
| <i>Figura 3.7: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 100 y 1000 años.</i>                      | 148 |
| <i>Figura 3.8: Data generada del tramo baños termales de Larcay, en entorno SIG.</i>                         | 149 |
| <i>Figura 3.9: Data generada en entorno SIG, e importada en forma satisfactoria al HEC-RAS</i>               | 150 |
| <i>Figura 3.10: La data geométrica importada al HEC-RAS, desde el entorno SIG en forma satisfactoria.</i>    | 151 |
| <i>Figura 3.11: Resultado del “n” coeficiente de Manning obtenido con el SIG</i>                             | 152 |
| <i>Figura 3.12: verificación de las secciones geométricas del tramo de interés</i>                           | 152 |
| <i>Figura 3.13: Ingreso de datos de caudales y definir las condiciones de simulación.</i>                    | 153 |

|  |            |
|--|------------|
| <i>Figura 3.14: Elaboración de un plan y su posterior ejecución .....</i>  | <i>153</i> |
| <i>Figura 3.15: Resultado de superficie de flujo para un TR de 10 años, en la estación 1015.81 .....</i>   | <i>153</i> |
| <i>Figura 3.16: Resultado de superficie de flujo para un TR de 20, 50, 100 y 1000 años, en la estación 1015.81.....</i>  | <i>154</i> |
| <i>Figura 3.17: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 10 años.....</i>   | <i>155</i> |
| <i>Figura 3.18: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 20 años.....</i>   | <i>156</i> |
| <i>Figura 3.19: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 50 años.....</i>   | <i>157</i> |
| <i>Figura 3.20: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 100 años.....</i>  | <i>158</i> |
| <i>Figura 3.21: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 1000 años.....</i>   | <i>159</i> |
| <i>Figura 3.22: Vista isométrica de las planicies de inundación en entorno HEC-RAS para un TR: 1000 años.....</i>  | <i>160</i> |
| <i>Figura 3.23: Vista de las planicies de inundación en sus efectos para los distintos periodos de retorno, frente al complejo turístico de los baños termales de Larcay .....</i> | <i>161</i> |

## ABREVIATURAS

|                  |  |
|------------------|--|
| CN               | : <i>Curva Número</i>  |
| ESRI             | : <i>Environmental Systems Research Institute</i>  |
| GIS              | : <i>Geografic Information System</i>  |
| GPS              | : <i>Global Positioning System</i>   |
| HEC              | : <i>Hydrologic Engineering Center</i>   |
| HMS              | : <i>Hydrologic Modeling System</i>  |
| HU               | : <i>Hidrograma Unitario</i>   |
| IDF              | : <i>Intensidad-Duración-Frecuencia</i>  |
| IDT              | : <i>Intensidad – Duración – Tiempo de retorno</i>   |
| IILA             | : <i>Instituto Italo-Latino Americano (IILA)</i>   |
| Imax             | : <i>Intensidad Máxima</i>   |
| MED              | : <i>Modelo de Elevación Digital</i>   |
| MINAGRI          | : <i>Ministerio de Agricultura y Riego</i>   |
| MTC              | : <i>Ministerio de Transporte y Comunicaciones</i>   |
| P <sub>24h</sub> | : <i>Precipitación máxima en 24 horas</i>  |
| PIP              | : <i>Proyecto de Inversión Pública</i>   |
| PLANGRACC-A      | : <i>Plan de Gestión de Riesgos y Adaptación de Cambio Climático en el Sector Agrario 2012 – 2021.</i> |
| RAS              | : <i>River Analysis System</i>   |
| SCS              | : <i>Soil Conservation Service</i>   |
| SENAMHI          | : <i>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología</i>  |
| SIG              | : <i>Sistema de Información Geográfica</i>   |
| TIN              | : <i>Triangulated irregular network</i>  |
| TR               | : <i>Tiempo de Retorno</i>   |
| UNI              | : <i>Universidad Nacional de Ingeniería</i>  |
| UTM              | : <i>Universal Transversal de Mercator</i>   |
| WGS              | : <i>World Geodetic System</i>   |
| ZEE              | : <i>Zonificación Económica y Ecológica</i>  |

## RESUMEN

La investigación se realizó dentro del ámbito de la Región Ayacucho, Provincia de Sucre y Distrito de San Pedro de Larcay, ubicando el punto de aforo entre la unión de los ríos Chicha Soras y Larcay, tramo baños termales en una longitud de 1.30 km, requiriéndose estudios de hidrología de cuencas e hidráulica de ríos, como parte de los estudios básicos del PIP para la defensa ribereña en el tramo mencionado. Un tema que siempre generó gran interés dentro de esta especialidad, es la simplificación de los procedimientos de cálculo y obtención de resultados fehacientes. Sin duda, obtener estos valores es una labor compleja y tediosa, ya que presenta un doble inconveniente, la subjetividad y el empleo de técnicas manuales. Para ayudar a resolver estos problemas se ha establecido la utilización del SIG, como una propuesta metodológica válida e innovadora que permita dar una nueva orientación a dichos estudios, generando resultados analíticos y de un aspecto visual fácil de interpretar, agilizando los procedimientos de cálculos y reduciendo el costo final del estudio. La primera parte consistió en utilizar el SIG como una herramienta que permitió obtener las características físicas de la cuenca del río Chicha con un área de 1,425.42 km<sup>2</sup>, divididos en 15 subcuencas y 200.22 km de red de drenaje, data que requiere el modelo HEC-HMS, adicionando datos de precipitación máxima en 24 horas y realizado la simulación hidrológica, se obtuvo hidrogramas máximas para TR de 10, 20, 50, 100 y 1000 años, las mismas que fueron utilizadas en el modelo HEC-RAS. En la segunda parte, utilizando el SIG se obtuvo los datos físicos del río tramo baños termales, en 50 secciones que incluye el coeficiente de Manning y pendiente del cauce, datos que requiere el modelo HEC-RAS, luego de la simulación hidráulica se obtuvo los perfiles y la superficie de agua para TR de 10, 20, 50, 100 y 1000 años. Finalmente, los resultados del HEC-RAS importados al SIG (Post RAS), obteniendo una visualización de las superficies de inundación para los distintos TR, visualizando que para los TR de 100 y 1000 años el complejo turístico de baños termales de Larcay y las áreas agrícolas adyacentes son severamente afectados.

**Palabras Clave:** *Sistema de Información Geográfica, cuenca hidrográfica, simulación, Hidrología, Hidráulica, Modelo, HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS.*

## **INTRODUCCIÓN**

El Cuerpo de Ingenieros de USA, ha sido tradicionalmente los líderes en realizar estudios e investigaciones de descargas e inundaciones, utilizando el Sistema de Cuencas, mediante el Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) y el Sistema de Ríos, mediante el River Analysis System (HEC-RAS).

Estos sistemas se aplican con relativa precisión, haciendo falta el aspecto de representación visual que facilite la interpretación del estudio, que implica utilizar métodos manuales para trazar y/o representar los resultados calculados en los mapas, y que esta se convierte en un labor complicada y tienen un alto porcentaje de error, además, estos modelos requieren una gran cantidad de recolección de datos de campo, que es un proceso que prolonga el tiempo de los estudios incrementando los costos y adicionalmente carecen de resultados visuales convincentes que dificultan tanto el análisis del estudio como también optar criterios para la toma de decisiones. (Andrysiak & Maidment, 2000)

Por estas consideraciones, se ha incluido al Sistema de Información Geográfica (SIG), teniendo en cuenta las enormes ventajas y facilidades que ofrecen en este tipo de estudios y que al mismo tiempo han demostrado su eficiencia en el campo del ordenamiento y planificación territorial (Bosque, 1992). Sin embargo, en los estudios hidrológicos e hidráulicos aún se presentan limitaciones por desconocimiento en el uso de esta herramienta de trabajo. En la actualidad, las investigaciones con respecto a la aplicación del SIG en el campo de la hidrología de cuencas e hidráulica de ríos son crecientes, el interés de los profesionales sigue desarrollando metodologías e incluso los desarrolladores del software cada vez más integran su programación a este campo.

Esta investigación tiene por objeto reflejar los resultados con una estrategia metodológica, cuyo objetivo es la integración de los modelos HEC-HMS y HEC-RAS con el SIG, para simular el modelo determinando hidrogramas de máximas avenidas, superficies de inundación y su respectiva representación visual.

En base a estas informaciones, los profesionales de la ingeniería tomarán referencias importantes que les permita plantear adecuadamente el dimensionamiento de las Obras hidráulicas, por ejemplo: el diseño de la luz y la ubicación de los estribos de un puente, dimensionar el vertedero de una represa de almacenamiento, dimensionamiento de canales de evacuación pluvial, diseño de defensas ribereñas, entre otros.

### **Objetivo general**

Realizar la Simulación Hidrológica e Hidráulica de Cuencas y Canales del río Chicha Soras, mediante la integración de los modelos HEC-HMS y HEC-RAS con el SIG, para la obtención del hidrograma de máximas avenidas y visualizar las superficies de inundación para distintos períodos de retorno.

### **Objetivos específicos**

- 1) Generar la data en entorno SIG, para el procesamiento y obtención de características fisiográficas y morfológicas de la cuenca del río Chicha Soras, mediante el software ArcGIS y la extensión HEC-GeoHMS.
- 2) Integrar los resultados del HEC-GeoHMS al modelo HEC-HMS.
- 3) Determinar los parámetros hidrológicos, como el hidrograma de precipitación para TR: 10, 20, 50, 100 y 1000 años.
- 4) Obtener los Hidrogramas de máximas avenidas, para TR: 10, 20, 50, 100 y 1000 años.
- 5) Generar la data en SIG, para su posterior procesamiento y caracterización del cauce del tramo baños termales de Larcay, mediante el software ArcGIS, aplicando la extensión HEC-GeoRAS.
- 6) Integrar la data de características geométricas obtenidas con el HEC-GeoRAS al modelo HEC-RAS.
- 7) Determinar los parámetros de simulación en el modelo HEC-RAS.
- 8) Obtener y visualizar las planicies de inundación para los TR: 10, 20, 50, 100 y 1000 años, para el tramo baños termales de Larcay.

# **I. REVISIÓN DE LITERATURA**

## **1.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

### **1.1.1 Concepto de SIG**

SIG procede del acrónimo del Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, Geographic Information System). Técnicamente se puede definir un SIG como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten trabajar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con esto siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal). (Ramos & Achuy, 2006)

Un SIG puede definirse como un Sistema de hardware, software y procedimientos, elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos especialmente referenciados; para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

Las definiciones tradicionales describen a los SIG como un conjunto de hardware, software, datos geográficos, personas y procedimientos; organizados para capturar, almacenar, actualizar, manejar, analizar y desplegar eficientemente rasgos de información referenciada geográficamente. (Burrough & McDonnel, 1998)

### **1.1.2 Componentes del SIG**

Una definición más actual, corta y puntual sería: Un Sistema de Información Geográfica es un sistema que por medio de computadoras y datos geográficos ayuda a nuestro mejor entendimiento del mundo en que vivimos y nos permite resolver los problemas que diariamente afrontamos.

Un SIG sirve para resolver problemas y es simplemente una herramienta muy poderosa, cada vez más utilizada, para hacer de nuestro mundo un mejor lugar donde vivir. (Buzai, 1997)



*Figura 1.1: Componentes del SIG*

*Fuente: Gacano's Blog.WordPress.com weblog*

El uso del SIG, ha crecido dramáticamente, sobre la década pasada, siendo ahora común en los negocios, instituciones gubernamentales y académicas. En consecuencia, hay varias definiciones de SIG, sin embargo, quizá la más concisa, es la que ofrece la Asociación de Información Geográfica; "Es un sistema para la captura, almacenamiento, análisis y despliegue de datos que se encuentran espacialmente referidos a la tierra».

### **1.1.3 Topologías, modelos de datos en el SIG**

En función de Modelo de datos implementados en cada sistema, podemos distinguir tres grandes grupos: SIG Vectoriales, SIG Ráster y SIG con modelo de datos Orientados a Objetos. En realidad, la mayor parte de los sistemas existentes en la actualidad pertenecen a los dos primeros grupos (vectoriales y ráster). (Ramos & Achuy, 2006)

#### **1.1.3.1 Objetos vector**

Son aquellos Sistemas de Información Geográfica que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.

Con para de coordenadas y su altitud un punto (e.g. un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. (Ramos & Achuy, 2006)

Los objetos vectoriales incluyen tres tipos de elementos: puntos, líneas y polígonos. Un punto se define por un solo conjunto de coordenadas cartesianas [este (x), Norte (y)]. Una línea se define por una serie de puntos en los que el principio y al final se denominan nodos, y los

puntos intermedios se llaman vértices. Una línea recta se compone de dos nodos y no hay vértices mientras que una línea curva se compone de dos nodos y un número variable de vértices. Tres o más líneas que se conectan para formar un área cerrada definen un polígono. (Maidment, 1996)

### **1.1.3.2 Objetos ráster (tramas)**

Los Sistemas de Información Ráster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad en los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denominan pixels) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular (el tamaño de pixel es constante) y que, conociendo la posesión en coordenadas del centro de una celda, se puede decir que todo los pixels están georreferenciadas. (Ramos & Achuy, 2006)

La estructura de datos de trama consiste en una malla rectangular de puntos unidos con las líneas, la creación de una red de células cuadradas de tamaño uniforme. Cada celda se le asigna un valor numérico que define la condición de que una cantidad espacialmente variado deseado. Las rejillas son la base del análisis de SIG ráster y se utilizan normalmente para el modelado espacial de estado estacionario y representación de la superficie de dos dimensiones. Una representación de la superficie de la tierra en el dominio de la rejilla se llama un Modelo de Elevación Digital. (Tate, 1998)

### **1.1.4 Georreferenciación**

Son representaciones matemáticas de los espacios. Para los SIG y cartografía en general, un sistema de coordenadas es el marco de referencia matemático en el cual se ubican los objetos. La georreferenciación es precisamente la ubicación de los objetos en estos espacios de coordenadas.

Existen dos tipos: sistema de coordenadas planas y sistema de coordenadas esféricas. Los sistemas de coordenadas planas existen por la antigua dificultad de cómputo manual el uso de las coordenadas esféricas y por qué en espacios relativamente pequeños el factor de curvatura del terreno es insignificante. (Ramos & Achuy, 2006)

#### **1.1.4.1 Datum**

El Datum es un conjunto de mediciones que definen la orientación de un elipsoide determinado en la superficie terrestre. El Datum nos define los siguientes aspectos:

a. Elipsoide en uso

b. La ubicación (posición inicial) y orientación del norte (acimut inicial) y la distancia entre el geoide y el elipsoide en la ubicación inicial.

Por lo tanto, el Datum establece una superficie de referencia permanente para la cartografía de un país o un continente. (Inter American Geodetic Survey, 1950)

#### **1.1.4.2 Datum WGS-84 sistema GPS**

Con el empleo de nuevas técnicas de posicionamiento, en especial la constelación de GPS, (Sistema de Posicionamiento global, creado por el departamento de Defensa de los estados Unidos (DoD)) se hace necesario disponer de un sistema para posesionar una situación geográfica con referencia a un Datum Universal con la cobertura en toda la superficie terrestre, evitándose así la territorialidad del resto de los Datum existentes.

Para ello fue creado en sistema WGS, (world geodetic system, Sistema Geodésico Mundial), con el primer sistema denominado WGS-74, revisado y modificado, estando actualmente vigente y en uso el sistema WGS-84.

Las coordenadas se obtienen de la constelación de satélites, pueden ser cartesianas en el espacio respecto al centro de masas de la tierra ( $x,y,z$ ) o geodésicas. (Fernandez & Coppel, 2001)

#### **1.1.4.3 Sistema de coordenadas UTM**

En la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección Universal Transversal de Mercator, la cual da lugar al sistema de coordenadas UTM. Este sistema, desarrollado por el ejército de los Estados Unidos, no es simplemente una proyección, sino que se trata de un sistema completo para cartografiar la práctica totalidad de la Tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. Aunque en la actualidad se emplea un único elipsoide (WGS-84), originalmente este no era único para todas las zonas. (Olaya, 2011)

#### **1.1.4.4 Sistema de coordenadas geográficas**

El sistema de coordenadas geográficas es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares: que son la *latitud* y la *longitud*. Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad, especialmente cuando se trabaja con grandes regiones. No obstante, no se trata de un sistema cartesiano, y tareas como la medición de áreas o distancias es mucho más complicada. Si bien la distancia entre dos paralelos es prácticamente constante (es decir, un grado de latitud equivale más o menos a una misma distancia en todos los puntos), la distancia entre dos meridianos no lo es, y varía entre unos 11,3 kilómetros en el Ecuador hasta los cero kilómetros en los polos, donde los meridianos convergen. (Olaya, 2011)

### **1.1.5 Los SIG en las modelizaciones hidrológicas**

Debemos tener en cuenta dos consideraciones que ayudan a entender mejor el valor que los SIG están adquiriendo en la construcción de modelos hidrológicos. La primera de ellas es la aceptación generalizada de que son una herramienta muy productiva. El segundo argumento hace referencia a sus importantes aportaciones de cara a la aprehensión de los sistemas y modelos hidrológicos. Estas dos circunstancias legitiman su utilización en investigaciones vinculadas a la hidrología. Más si cabe cuando en el futuro los avances en este campo dependerán de nuevas visiones y adelantos conceptuales, muchos de los cuales pueden surgir de la utilización de modelos hidrológicos en los SIG (Morad & Triveño, 2001)

En lo que se refiere a la modelización del componente espacial estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos. Los SIG pueden actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos (elaboración de prototipos). No debemos olvidar que los lenguajes macro disponibles en muchos programas proporcionan comandos de alto nivel para ejecutar funciones analíticas. Estos construyen los modelos con mayor rapidez y eficacia que las técnicas de programación estándar. Puesto que la complejidad y el tiempo de codificación y depuración de errores son directamente proporcionales a la potencia del programa; un modelo hidrológico puede ser implementado en menos tiempo del que sería necesario con un lenguaje estándar.

Otra de las cualidades bien valoradas de los SIG son sus aportaciones para la mejor interpretación y análisis de modelos y sistemas. La estructura de datos en capas o estratos de información son intuitivas y posibilita que los modelos puedan ser interpretados con menor esfuerzo. Esta herramienta brinda al investigador la posibilidad de visualizar y entender con claridad las relaciones espaciales.

Las estructuras y operaciones de los SIG garantizan que no se pierde la coherencia espacial en ninguno de los pasos de la modelización. Los valores de entrada, intermedios y de salida preservan en todo momento la georreferenciación y sus relaciones topológicas. Además, el usuario no está obligado a trabajar con la totalidad del sistema, sino que puede determinar qué procesos están sucediendo y qué salidas se están generando en cualquier localización del área estudiada. Eso sí, todos los parámetros y procesos permanecen distribuidos dentro del sistema o modelo.

### **1.1.6 Aplicaciones de los SIG en la modelización hidrológica**

Maidment, (1996) ha agrupado las aplicaciones de los SIG en hidrología de la siguiente manera:

- Evaluación e inventarios hidrológicos.

- Determinación de parámetros hidrológicos.
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

La mayor parte de las aplicaciones hidrológicas llevadas a cabo en los SIG son evaluaciones de riesgos naturales y estudios de localización. Ambas tienen muchos aspectos en común e incluso poseen un cierto parecido, aunque disponen de un tratamiento diferente.

En las modelizaciones hidrológicas debemos diferenciar con claridad lo que es el conjunto de procedimientos y recursos utilizados en el proceso de modelización, de la manera en que estos se implementan en los SIG. La mayor parte de los investigadores utilizan esta herramienta para generar parámetros que den un sentido lógico a la modelización. Para ello se emplean procedimientos de cálculo ya existentes que normalmente han sido ideadas fuera del campo de los SIG convirtiéndolos en una herramienta para la gestión de información geográfica.

#### **1.1.7 Los errores en los SIG y sus implicancias en los modelos hidrológicos**

Es un hecho aceptado que los errores son consustanciales a los propios datos y que obviamente los SIG no pueden obtener resultados con una resolución de salida mejor que la de entrada. Ello es motivo suficiente para que los usuarios siempre procuraran averiguar el grado de fiabilidad de la información antes de utilizarla. Estas afirmaciones son particularmente ciertas cuando se pretende hacer uso de los datos en modelizaciones hidrológicas. No obstante, un error de pequeña magnitud da lugar a entradas erráticas que ocasionan importantes desviaciones en la componente espacial del modelo.

El origen de los errores es muy diverso, valgan como muestra los procesos de generalización cartográfica, la vectorización y rasterización de datos, los cambios de escala, etc. A grandes rasgos los errores se cometen debido a la ignorancia de la calidad de la fuente suministradora de información, y al desconocimiento de cómo operan las instrucciones y procedimientos de los programas SIG. La utilización de datos de escasa calidad provoca la propagación de errores dentro del mismo modelo, y consecuentemente tiene efectos negativos sobre los resultados. Si nos referimos a los errores en la componente espacial de los modelos hidrológicos debemos hacer mención a los modelos digitales de elevaciones MED. Resulta conveniente destacar que el conjunto de datos digitales necesarios para construir un MED es asimismo considerado esencial en los modelos hidrológicos. (Maidment, 1996)

#### **1.1.8 Limitaciones de los SIG en las modelizaciones hidrológicas**

Los trabajos realizados con SIG para la elaboración de modelos hidrológicos están incrementándose rápidamente, y muchas cuestiones como la gestión de series temporales de datos y la generalización han sido ampliamente discutidas. A pesar de que esta herramienta

ofrece interesantes ventajas operativas a los investigadores en hidrología, aún hay algunas inquietudes que están limitando su uso.

- 1) La construcción de modelos hidrológicos en un SIG a menudo trae consigo la asunción de determinadas limitaciones, así, por ejemplo, la simple combinación de capas no considera la covarianza ni la interacción entre variables. Por otra parte, el modo en que se agregan los datos también repercute en los modelos resultantes. Estas cuestiones solamente pueden ser superadas cuando el usuario tiene una buena comprensión de la estructura de los modelos hidrológicos y de las técnicas utilizadas, además de un elevado conocimiento de las funciones y los modelos de datos de los SIG. (McDon- Nell, 1996)
- 2) La mayor parte de las mediciones hidrológicas en los SIG asumen algún grado de error. Variables como la topografía y los suelos son comunes en todos los modelos hidrológicos, aunque cada vez son más necesarias informaciones espaciales específicas. En este sentido los sistemas remotos están siendo muy utilizados como fuente de datos (Giles, 1994). La interpolación y generalización de información con diversos orígenes inducen múltiples errores que deben ser controlados.
- 3) La integración en los SIG de los procesos hidrológicos de aguas superficiales y subterráneas aún no está muy lograda. El principal problema reside en la combinación de estos procesos con la escala, el espacio y el tiempo. Un mapa puede ser dibujado a cualquier escala, pero no está claro hasta qué punto los modelos pueden ser aplicados a diferentes escalas (Maidment, 1996).

### **1.1.9 Software utilizado para el procesamiento de los SIG**

#### **1.1.9.1 ArcGIS Desktop**

ArcGIS Desktop es la herramienta primaria usado por los profesionales del SIG para crear, modelar y usar la información geográfica. Está Disponible en tres niveles funcionales ArcView, ArcEditor y ArcInfo. ArcGIS Desktop integra una serie aplicaciones comprensivos: ArcMap, ArcCatalogTM, ArcToolboxTM y ArcGlobeTM. Cada uno de las aplicaciones tiene un sistema rico de herramientas y funciones. ArcGIS Desktop puede también ser ampliado por una gama de extensiones opcionales que agregan especiales capacidades.

Considerándose la herramienta más potente del mercado para manejo de sistemas de información geográfica. Con esta nos posibilita la implementación de soluciones, a través de su comprometido desarrollo de las mejores herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Además, Provee mejoras en sus interfaces, soporte para diseño geográfico cartográfico sofisticado, herramientas avanzadas de modelado para análisis y soporte de CAD. (Burrough & McDonnel, 1998)

### **1.1.9.2 Autocad Civil 3D**

Autocad Civil 3D es un programa BIM (Building Information Modeling) de soluciones 3D para el programa AutoCAD. Se basa en la planificación, diseño y gestión de infraestructuras y proyectos de ingeniería. Es utilizado frecuentemente por usuarios del área de la construcción, ingenieros topográficos, y técnicos.

Es un software de Autodesk el cual permite a los ingenieros de la rama de construcción a optimizar el desempeño de los proyectos con análisis geoespacial para identificar el mejor sitio del proyecto, análisis pluvial para diseños más sostenibles, cálculo de cantidades y cálculos dinámicos de la obra para optimizar la utilización de materiales, y visualizaciones 3D para entender mejor los impactos del proyecto en el medio ambiente.

La principal característica del programa es que está diseñado por Autodesk para que todos los componentes del diseño estén relacionados, los objetos al ser modificados automáticamente regeneran el diseño y recalculan la información en tablas y perfiles, todo esto nos ayudará a la hora de hacer cambios en nuestra propuesta sin tener que rehacer todo el proyecto de nuevo. (Ugarte, 2012)

### **1.1.9.3 HEC-HMS**

Es un programa computacional del sistema de modelación hidrológica del centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica.

El HEC-HMS es una versión mejorada para el entorno Windows del HEC-1 con un avance significativo en términos de computación e ingeniería hidrológica. Este programa simula los procesos de precipitación – escurrimiento y procesos de tránsito de avenidas.

El programa está diseñado para ser utilizado de manera interactiva con el usuario, tiene capacidad de ser ejecutado en ambiente multi - usuario y puede ser utilizado en Microsoft Windows. (Villón, 2010)

Principales características computacionales El HEC-HMS posee una interfaz gráfica (denominada GUI), componentes integrados de análisis hidrológico, almacenamiento de datos y capacidad de manejo y facilidades para gráficos y reportes. El sistema de almacenamiento de datos (HEC-DSS) se usa para almacenar y recuperar las series temporales.

La interfaz gráfica (GUI) permite contener los elementos o componentes de la cuenca, la entrada de datos para dichos componentes y vista de los resultados. Asimismo, tiene la capacidad para esquematizar la representación de una red de elementos hidrológicos (Subcuencas, segmentos de cauces, confluencias, etc.).

El usuario puede configurar de manera esquemática mediante la selección y conexión de iconos que representan los elementos de la cuenca. Una vez que el esquema ha sido desarrollado, se tienen menús que pueden ser invocados desde los iconos de los elementos. El menú brinda acceso a un editor para ingresar o editar datos asociados con los elementos hidrológicos y pantallas que muestran los resultados de la simulación para cada elemento.

Los resultados de la corrida o ejecución activa, pueden ser vistos e impresos en forma tabular o gráfica. El programa puede desplegar los datos tabulares en tres tipos: (1) Una tabla resumen con una única línea de información por cada elemento hidrológico, (2) una tabla resumen elemental con información por tipo de elemento (3) una tabla con la serie temporal del elemento que muestra los resultados para cada intervalo de tiempo. También el programa dispone de una pantalla gráfica para cada tipo de elemento.

El modelo funcional de simulación con el que trabaja HEC-HMS se muestra en la figura siguiente un diagrama del sistema del proceso de escurrimiento en una cuenca.

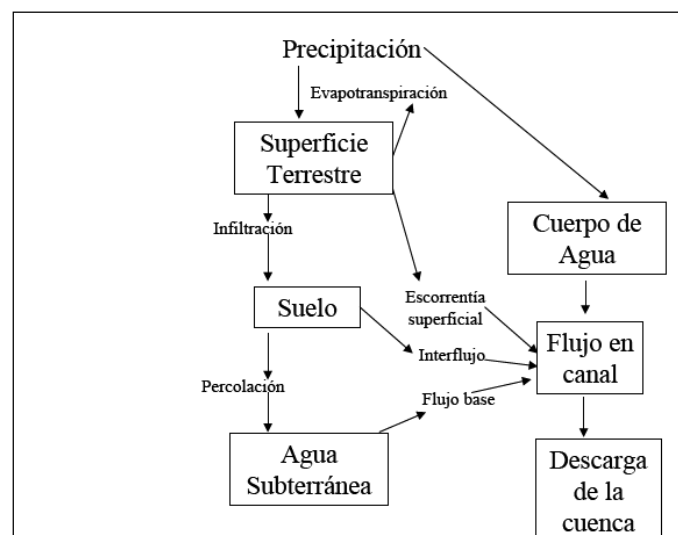


Figura 1.2: Diagrama de procesos de escurrimiento en una cuenca mediante HEC-HMS

(Fuente: Manual Técnico de HEC-HMS, 2009)

El programa HEC-HMS utiliza modelos individuales para representar cada uno de los componentes del proceso de escurrimiento:

Modelos que determinan el hidrograma de escurrimiento directo (escurrimiento superficial e interflujo).

#### 1.1.9.4 HEC-GeoHMS

La extensión geoespacial Hydrologic Modeling (HEC-GeoHMS) se ha desarrollado como un conjunto de herramientas geoespaciales hidrología para los ingenieros e hidrólogos con limitada experiencia en SIG y la extensión HEC-GeoHMS utiliza ArcView y la extensión

Spatial Analyst para desarrollar una serie de entradas de modelado hidrológico para el sistema de modelado hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica, el HEC-HMS. ArcView GIS y su extensión Spatial Analyst están disponibles en el Environmental Systems Research Institute (ESRI). Analizando los datos digitales del terreno, HEC-GeoHMS transforma las vías de drenaje y los límites de cuencas en una estructura de datos hidrológicos que representa la red de drenaje. El programa permite a los usuarios visualizar la información espacial, características del documento de cuencas, el análisis espacial, y delinear subcuencas y arroyos. Trabajar con HEC-GeoHMS a través de sus interfaces, menús, herramientas, botones y ayuda contextual en línea permite al usuario crear oportunamente los insumos hidrológicos para HEC-HMS. (US Army, 2009)

#### **1.1.9.5 EL HEC-RAS**

HEC-RAS, modelo de dominio público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interface gráfica de usuario que facilita las labores de pre proceso y pos proceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre. Tiene como características técnicas:

- Cálculo hidráulico de estructuras (puentes, aliviaderos, alcantarillas, etc.).
- Visualización gráfica de datos y resultados
- Edición gráfica de secciones.
- Ejecutable en entorno Microsoft Windows.

Tiene Aplicaciones en modelación hidráulica en régimen permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales. (Villón, 2009)

#### **1.1.9.6 EL HEC-GeoRAS**

HEC-GeoRAS es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento de datos geospaciales en ArcGIS mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI). La interfaz permite la preparación de los datos geométricos para la importación en HEC-RAS y los resultados de los procesos de simulación exportados desde HEC-RAS. Para crear el archivo de importación, el usuario debe disponer de un modelo digital de elevación (MED) del sistema fluvial en el formato TIN ArcInfo. El usuario crea una serie de temas pertinentes al desarrollo de la línea de datos geométricos para HEC-RAS. Los temas creados son la línea

central Stream, líneas centrales de rutas de flujo (opcional), los principales bancos de canal (opcional), y cruzar las líneas de corte de sección que se refiere a los temas de RAS.

Otros Temas RAS se puede crear y/o utilizar para extraer datos geométricos adicionales para la importación en HEC-RAS. Estos temas incluyen Uso de la Tierra, alineación del dique, Áreas ineficaces de flujo y áreas de almacenamiento.

Aguas superficiales y los datos del perfil de velocidad de datos exportados desde HEC-RAS simulaciones pueden ser procesados por HEC-GeoRAS para el análisis SIG para el mapeo de llanura de inundación, los cálculos de daños por inundaciones, restauración de ecosistemas, y la respuesta de alerta sobre inundaciones y la preparación. (US Army, 2009)

## **1.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA EN CUENCAS**

De todos los diversos procesos meteorológicos que ocurren continuamente en la atmósfera, los más importantes para la hidrología son la de precipitación y la evaporación, en los cuales la atmósfera interactúa con el agua superficial. La mayor parte del agua que se precipita sobre la superficie terrestre proviene de las humedades que se evapora en los océanos y que se transporta en la circulación atmosférica al largo de grandes distancias

El proceso de precipitación dentro del ciclo hidrológico de una cuenca muestra una marcada variabilidad temporal y espacial, independientemente de la escala de trabajo a la que se está realizando el análisis.

Las consecuencias dramáticas de la variabilidad espacial de la precipitación como sequías y avenidas extremas han determinado grandes pérdidas humanas y económicas desde tiempos ancestrales. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

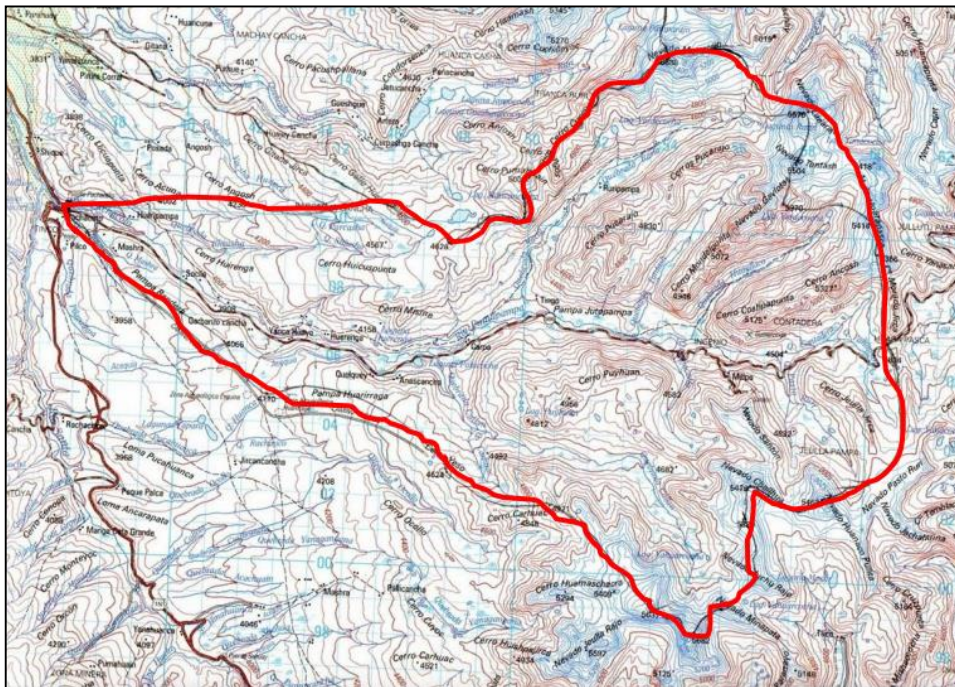
Importancia de las precipitaciones en la ingeniería en el diseño de muchas obras de ingeniería civil son profundamente influenciadas por factores climáticos, entre los que se destaca por su importancia las precipitaciones pluviales. En efecto, un correcto dimensionamiento del drenaje garantizará la vida útil de una carretera, una vía férrea, un aeropuerto. El conocimiento de las precipitaciones pluviales extremas y el consecuente dimensionamiento adecuado de los órganos extravasores de las represas garantizarán su seguridad y la seguridad de las poblaciones y demás estructuras que se sitúan aguas abajo de la misma. El conocimiento de las lluvias intensas, de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano, y así evitar inundaciones en los centros poblados. (Chavarri, 2002)

### **1.2.1 Cuenca hidrográfica**

Una cuenca es el área de terreno que drena hacia una corriente en un lugar dado. Se puede definir también como un territorio o parte de la superficie terrestre ocupada por un sistema de drenaje desde el cual las aguas escurren, real o potencialmente, hacia un colector común, que puede ser un río, el mar o un lago. En igual forma se habla de una cuenca tributaria, área tributaria, región tributaria, hoya hidrográfica y hoya tributaria. En un sentido más restringido cuenca o hoya es el territorio del cual proviene o pueden provenir las aguas que escurren por una determinada sección de un río respecto a la cual se define la cuenca (punto de concentración). (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Extensión del territorio cuyas aguas convergen hacia un río principal. Concavidad de la superficie terrestre limitadas por la línea divisoria de aguas o Divortium Aquarum. Así también se define como cuenca al espacio delimitado por la unión de todas las cabeceras que forman el

río principal o el territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas. El uso de los recursos naturales se regula administrativamente separando el territorio por cuencas hidrográficas, y con miras al futuro las cuencas hidrográficas se perfilan como las unidades de división funcionales con más coherencia, permitiendo una verdadera integración social y territorial por medio del agua. (Chavarri, 2002)



*Figura 1.3: Cuenca hidrográfica delimitada*

### **1.2.2 Clasificación de cuencas hidrográficas por su área**

La cuenca hidrográfica comprende la totalidad del área drenada por vía corriente o sistema de cauces, donde las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua y son descargados por una única salida.

En síntesis, una cuenca es un territorio y un área geográfica (suelo, clima, agua, precipitación, escorrentía, etc.) delimitados por la colección del agua que se deriva en una fuente de agua. Esta contiene determinados recursos naturales que otorgan posibilidades a la vida humana y animal. Su hilo conductor es el ciclo hidrológico y la cultura de población que ocupa y se relaciona con la naturaleza. (Vásquez, 2000)

Tabla 1.1: Rangos de área para cada unidad hidrográfica

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | ÁREA (km <sup>2</sup> ) |
|---------------------|-------------------------|
| Cuenca              | 500 – 8000              |
| Subcuenca           | 50 – 500                |
| Microcuenca         | < 50                    |

Fuente: Vásquez, *Manejo de Cuencas Altoandinas 2001 Tomo I*, pág. 25

### 1.2.3 Determinación de tormentas de diseño

Muchas veces la información en forma de curva IDF no será bastante, y será necesario considerar un hietograma de diseño que nos dé una idea del reparto de lluvia en el tiempo.

Existen diferentes métodos para su obtención, más o menos adecuados en función de las características hidrológicas de la cuenca (lluvia uniforme, hietograma triangular, etc.). Dado que todos son el resultado de repartir la cantidad de lluvia obtenida a través de la curva IDF con hipótesis más o menos razonables, se puede considerar que el método de los bloques alternados, dada su sencillez y su claro significado físico, es uno de los más recomendables. (Villon, 2002)

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación de una zona o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. (Icg, 2011)

Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas.

Para determinación de la tormenta de diseño sería recomendable contar con información obtenida a través de un pluviógrafo, ya que este equipo provee información instantánea, sin embargo, la mayoría de estaciones de medición de precipitaciones solo cuentan con pluviómetros que solo proveen de valores medios.

### 1.2.3.1 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. comúnmente se utiliza la intensidad promedio, que puede expresarse como:

$$i = \frac{P}{Td} \quad (1-1)$$

Donde P es la profundidad de lluvia (mm) y Td es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del período de retorno, T, que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Las curvas intensidad – duración – frecuencia son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de la misma y la frecuencia con la que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno. (Icg, 2011)

En nuestro país, debido a la escasa cantidad de información pluviográfica con que se cuenta, difícilmente pueden elaborarse estas curvas. Ordinariamente solo se cuenta con lluvias máximas en 24 horas, por lo que el valor de la Intensidad de la precipitación pluvial máxima generalmente se estima a partir de la precipitación máxima en 24 horas, multiplicada por un coeficiente de duración; en la Tabla 1.2, se muestran coeficientes de duración, entre 1 hora y 48 horas, los mismos que podrán usarse, con criterio y cautela para el cálculo de la intensidad, cuando no se disponga de mejor información. (Villón, 2012)

Tabla 1.2: Coeficientes de duración lluvias entre 48 horas y una hora

| Duración de la precipitación en horas | Coefficiente |
|---------------------------------------|--------------|
| 1                                     | 0.25         |
| 2                                     | 0.31         |
| 3                                     | 0.38         |
| 4                                     | 0.44         |
| 5                                     | 0.5          |
| 6                                     | 0.56         |
| 8                                     | 0.64         |
| 10                                    | 0.73         |
| 12                                    | 0.79         |
| 14                                    | 0.83         |
| 16                                    | 0.87         |
| 18                                    | 0.9          |
| 20                                    | 0.93         |
| 22                                    | 0.97         |
| 24                                    | 1            |
| 48                                    | 1.32         |

Fuente: Manual para el Diseño de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito Pavimentadas, MTC (2008)

Se puede establecer como un procedimiento lo siguiente:

1. Seleccionar las lluvias mayores para diferentes tiempos de duración.
2. Ordenar de mayor a menor.
3. Asignar a cada valor ordenado una probabilidad empírica.
4. Calcular el tiempo de retorno de cada valor.
5. Graficar la curva intensidad-frecuencia-duración.

El modelo de discretización de Grobe, también conocido como el de Dyck y Peschke, tomado de las publicaciones: Hidrología y Recursos Hídricos, Introducción para Ingenieros y Fundamentos de Hidrología (Grundlagen der Hydrologie de Siegfried Dyck y Ger Peschke, Berlin – Alemania, 1995), el cual nos permite, a partir de datos de precipitaciones máximas diarias  $P_{24h}$ , medidas en los pluviómetros, generar la curva Intensidad – Duración – Periodo de retorno (IDT). (Villón, 2012)

Según este criterio de discretización de Grobe o Dyck y Peschke, las lluvias de Duración corta  $D$ ,  $P_d$ , es función de la precipitación de 24 horas, es decir, que este criterio se puede aplicar a precipitaciones máximas de 24 horas,  $P_{24h}$ , de acuerdo a la siguiente ecuación empírica se puede generar las curvas Intensidad-Duración-Período de retorno (IDT):

$$P_d = P_{24h} \left( \frac{d}{1440} \right)^{0.25} \quad (1-2)$$

Donde:

$P_d$ : precipitación máxima de duración  $D$ , en el intervalo  $15' < D < 1440'$  (mm)

$D$ : duración de la lluvia, en minutos.

$P_{24h}$ : precipitación máxima diaria en 24 horas (mm)

Si la duración  $D > 24$  h (1440 min), lo cual son necesarias para cuecas con áreas grandes,  $P_D$ , se calcula con la siguiente ecuación empírica:

$$P_D = P_{24h} D^{0.40} \quad (1-3)$$

donde:

$P_D$ : precipitación máxima de duración  $D > 24$  h, en mm

$D$ : duración de la lluvia, en horas

$P_{24h}$ : precipitación máxima diaria, en mm

La intensidad se halla dividiendo la precipitación  $P_d$  entre la duración.

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia, se han calculado indirectamente, mediante la siguiente relación:

$$I = \frac{KT^m}{t^n} \quad (1-4)$$

Donde:

$I$ : Intensidad máxima (mm/h)

$K, m, n$ : factores característicos de la zona de estudio

$T$ : período de retorno en años

$t$ : duración de la precipitación equivalente al tiempo de concentración (min)

### 1.2.3.2 Hietogramas de precipitación de diseño usando el método IILA-SENAMHI-UNI.

La Metodología de la ecuación regional del estudio dada por el Instituto Ítalo Latino Americano (Convenio Internacional IILA-SENAMHI-UNI), este método en principio nos permitirá calcular las intensidades máximas, para luego obtener las precipitaciones de diseño. (Icg, 2011)

El estudio muestra las siguientes ecuaciones:

Para períodos menores a 3 horas la ecuación modificada es:

$$i_{(t,T)} = a(1 + K \log T)(t + b)^{n-1} \quad (1-5)$$

Para períodos comprendidos entre 3 y 24 horas es

$$i_{(t,T)} = a(1 + K \log T)(t)^{n-1} \quad (1-6)$$

Donde:

$i$  = Intensidad de la lluvia (mm/h)

$a$  = Parámetro de Intensidad (mm)

$K$  = Parámetro de frecuencia (adimensional)

$b$  = Parámetro de zona (horas)

$n$  = Parámetro de duración (adimensional)

$t$  = Duración (horas)

$$P_{24} = \varepsilon_g(1 + k \log T) \quad (1-7)$$

Donde:

$$a = \left( \frac{1}{t_g} \right)^n \varepsilon_g \quad (1-8)$$

$P_{24}$  = Máxima precipitación en 24 horas, en (mm)

$T$  = Período de retorno en años

$t_g$  = Duración de la lluvia diaria, asumido un promedio de 15.2 en Perú

$b$  = 0.5 horas (Costa, centro y sur)

0.4 horas (Sierra)

0.2 horas (Costa norte y Selva)

$\varepsilon_g$  = Parámetro para determinar  $P_{24}$

Los parámetros para las ecuaciones anteriores se indican en el Anexo A.

### 1.2.3.3 Método del bloque alterno

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva-duración-frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación en  $n$  intervalos de tiempo sucesivos de duración  $\Delta t$ , sobre una duración total de  $T_d = n \cdot \Delta t$ . (Icg, 2011)

Después de seleccionar el período de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ ,  $4\Delta t$ , ... y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo  $\Delta t$ . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida  $T_d$  y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Figura 1.4).

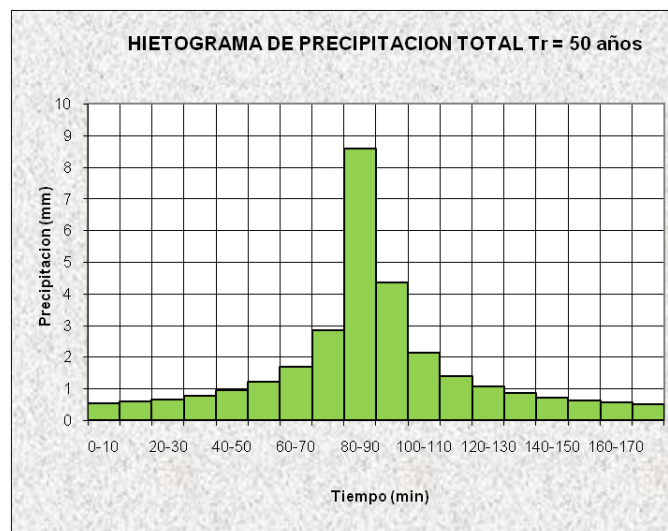


Figura 1.4: Ejemplo de hietograma de diseño

### 1.2.3.4 Método de hietograma sintéticos de tormenta del SCS

La distribución temporal de una tormenta tiene un rol importante en la respuesta hidrológica de cuencas de tamaño medio. Para una altura de lluvia dada y una duración, la elección de la distribución temporal de la lluvia adimensional permite el desarrollo del hietograma de una tormenta de diseño.

Para una cierta altura de lluvia y una duración, una distribución temporal uniforme producirá una respuesta lenta, con un pico relativamente bajo y un tiempo de base largo. Por el contrario, una distribución temporal altamente no uniforme producirá una respuesta rápida, con un pico relativamente alto y un tiempo de base corto.

Una distribución temporal de diseño puede ser derivada localmente o regionalmente. Las distribuciones de lluvia temporal adimensionales están expresadas como duración de la lluvia en las abscisas y porcentaje de altura de lluvia en las ordenadas. (Icg, 2011)

El Servicio de Conservación de Suelos ha desarrollado varias distribuciones temporales generalizadas aplicables a los Estados Unidos, para las 24-h Tipos I, IA, II, y III (ver Figura 1.5).

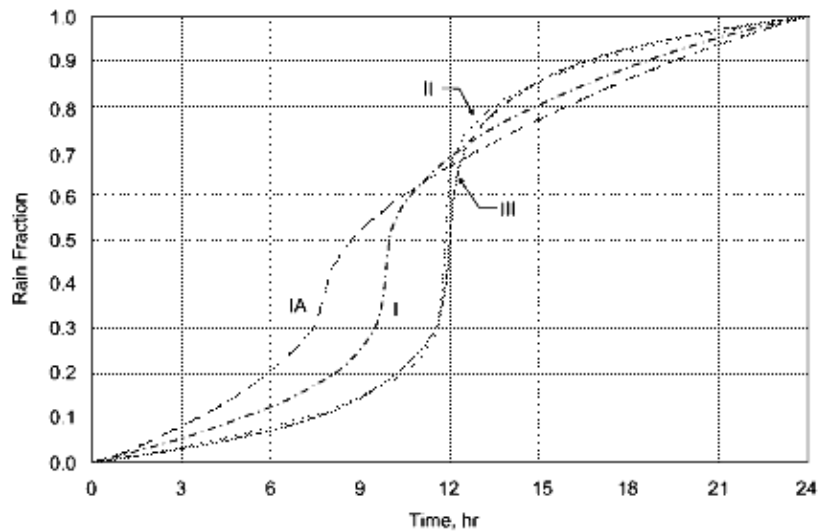


Figura 1.5 : Distribución temporal de precipitación de 24 horas

Fuente: (Soil Conservation Service, 1986)

Estas distribuciones temporales de 24 horas intentan abarcar las intensidades de lluvia asociadas con tormentas de corta duración, que van desde 30 minutos a 12 horas. Por ello, son típicamente tormentas de alta intensidad adaptables a cuencas similares en tamaño a aquellos usados por el SCS, esto es aquellas áreas menores a 250 km<sup>2</sup>.

#### 1.2.4 Tasa de infiltración, por pérdidas con el método del número de curva del SCS

Desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), a partir de los datos de sus cuencas plantean la conservación de masa:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (1-9)$$

Donde:

$P$  = Precipitación total acumulada, (mm)

$P_e$  = Precipitación neta acumulada, (mm)

$I_a$  = Abstracción Inicial, (mm)

$F_a$  = Pérdidas acumuladas después de iniciada la escorrentía, (mm)

Hipótesis propuesta por el método del SCS.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1-10)$$

Introducen el concepto de capacidad máxima de retención de la cuenca “S”

Combinando la hipótesis del SCS con ecuación de conservación de masa tenemos:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1-11)$$

Expresión que nos proporciona la precipitación neta en base a dos parámetros; S e  $I_a$ .

Se hace una reducción del número de parámetros

$$I_a = 0.2S \quad (1-12)$$

en base a esto se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1-13)$$

acotación del rango de variación de parámetros  $S\{0, \infty\}$ , introduce la variable del Número de Curva  $CN\{0,100\}$ ,

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1-14)$$

La relación anterior es para obtener S en mm. Las tablas para el cálculo del Número de Curva CN para una cuenca pueden estimarse según el Anexo C.

Si se cuenta con varios tipos de suelos y usos de terreno, se calcula el CN Compuesto:

$$CN_{\text{compuesto}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (1-15)$$

Donde:

$CN_{\text{compuesto}}$  = Número de curva compuesto

$i$  = Número de subdivisiones de la cuenca

$CN_i = CN$  para la subdivisión  $i$

$A_i = \text{Área de drenaje para la subdivisión } i$

### 1.2.5 Hidrogramas unitarios sintéticos

Además de los hidrogramas naturales, existen hidrogramas sintéticos que son simulados, artificiales y se obtienen usando las características fisiográficas y parámetros de la cuenca de interés. Su finalidad es representar o simular un hidrograma representativo del fenómeno hidrológico de la cuenca, para determinar el caudal pico para diseñar.

#### 1.2.5.1 Hidrograma sintético triangular del SCS

Con base en la revisión de un gran número de HU, el SCS sugiere este hidrograma donde el tiempo está dado en horas y el caudal en  $m^3/s.cm$ .

El volumen generado por la separación de la lluvia en neta y abstracciones es propagado a través del río mediante el uso del hidrograma unitario.

El tiempo de recesión,  $tr$ , puede aproximarse a:

$$tr = 1.67T \quad (1-16)$$

Como el área bajo el HU debe ser igual a una escurrentía de 1 cm, puede demostrarse que:

$$q_p = \frac{2.08A}{Tp} \quad (1-17)$$

Donde:

A: es el área de drenaje en  $(km^2)$ .

$Tp$ : es el tiempo de ocurrencia del pico en horas. Adicionalmente, un estudio de muchas cuencas ha demostrado que:

$$tp = 0.6tc \quad (1-18)$$

Donde:

$tp$ : Tiempo de retardo (entre el centroide del hidrograma y el pico de caudal) (h)

$tc$ : Tiempo de concentración de la cuenca.

El tiempo de ocurrencia del pico,  $Tp$ , puede expresarse como:

$$Tp = \frac{D}{2} + tp \quad (1-19)$$

Donde:

D: duración de la lluvia (h)

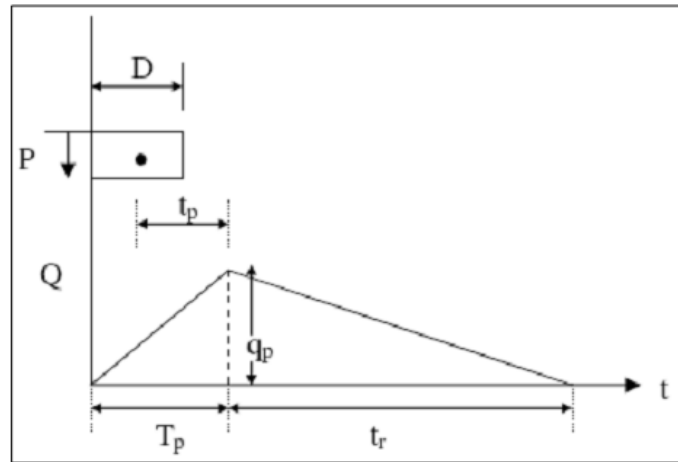


Figura 1.6: Hidrograma unitario triangular del SCS

(Fuente: Hidrología Aplicada – Chow (1994))

Este método es recomendable tan solo para cuencas de hasta a 30 km<sup>2</sup>. Es muy usado en cuencas sin muchos datos hidrológicos.

Para cuencas urbanas, donde  $t_p$  y  $t_c$  disminuyen por la impermeabilización y canalización se aplica:

$$t_p = t_p (\text{cuenca natural}) \cdot f1 \cdot f2 \quad (1-20)$$

$$f1 = 1 - Ma K \quad (1-21)$$

$$f2 = 1 - Mc K \quad (1-22)$$

Donde:

Ma: Porcentaje de aumento de áreas impermeables

Mc: Porcentaje de áreas canalizadas

$$k = (-0.02185CN^3 - 0.4298CN^2 + 355CN - 6789) * 10^{-6} \quad (1-23)$$

### 1.2.5.2 Método del hidrograma unitario sintético de Snyder

El método está basado en las características geométricas y morfológicas de la cuenca, que a partir de ellas se pueden deducir los parámetros. Para un hidrograma unitario estándar encontró que:

**a. Tiempo de retardo (h):**

$$t_{lag} = 0.7517C_t(LL_c)^{0.3} \quad (1-24)$$

Donde:

$C_t$  = Coeficiente Adimensional, 1.8 a 2.2 (Bedient, 1992); tomando valores menores para cuencas con grandes inclinaciones.

$L$  = Longitud del río principal (km).

$L_c$  = Distancia desde la salida de la cuenca hasta el punto de la corriente más cercana al centroide del área de la cuenca (km).

**b. Duración de la lluvia neta (h):**

$$t_r = \frac{t_{lag}}{5.5} \quad (1-25)$$

**c. Caudal pico del hidrograma unitario (m<sup>3</sup>/s/mm):**

$$q_p = \frac{0.275C_p A}{t_{lag}} \quad (1-26)$$

Donde:

$A$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$C_p$  = Coeficiente Adimensional, 0.4 a 0.8 (Bedient, 1992); tomando valores mayores para cuencas con grandes inclinaciones.

**d. Tiempo base de la escorrentía superficial (h):**

$$T = \frac{55.6t_{lag}}{q_p} \quad (1-27)$$

Donde:

$T$  = Tiempo base de la escorrentía superficial (h)

Para otra lluvia neta de duración  $t_R$  diferente de  $t_r$ , el tiempo de retardo correspondiente  $t_{lagR}$ , el caudal pico  $q_{pR}$ , y el tiempo base  $T_R$  según (Linsley, 1977) son:

$$t_{lagR} = t_{lag} - \frac{t_r - T_R}{4} \quad (1-28)$$

$$q_{pR} = \frac{0.275C_p A}{t_{pR}} \quad (1-29)$$

$$T_R = \frac{55.6t_{lagR}}{q_{pR}} \quad (1-30)$$

Adicionalmente:

$$W_{75} = \frac{0.10192}{q_p^{1.08}} \quad \text{ó} \quad W_{75R} = \frac{0.10192}{q_{pR}^{1.08}} \quad (1-31)$$

$$W_{50} = \frac{0.17836}{q_p^{1.08}} \quad \text{ó} \quad W_{50R} = \frac{0.17836}{q_{pR}^{1.08}} \quad (1-32)$$

Donde:

$W_{50}, W_{50R}$  = Valor del hidrograma unitario para un ancho del 50% (h)

$W_{75}, W_{75R}$  = Valor del hidrograma unitario para un ancho del 75% (h)

Con:

$$q'_p = \frac{q_p}{A} \left( \frac{\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}}{\text{km}^2} \right) \quad (1-33)$$

#### *Transformación de precipitación – escorrentía*

La transformación precipitación-escorrentía se realiza por medio de la Convolución del hidrograma unitario con el hidrograma de precipitación efectiva.

### 1.2.5.3 Convolución discreta para un sistema lineal

#### a. Principio de Proporcionalidad

Para una lluvia efectiva de una duración dada, el volumen de lluvia, que es igual al volumen de escorrentía directa, es proporcional a la intensidad de dicha lluvia. Como los hidrogramas de escorrentía directa correspondientes a lluvias efectivas de la misma duración, tienen el mismo tiempo base, se concluye que las ordenadas de dichos hidrogramas serán proporcionales a la intensidad de la lluvia afectiva.

#### b. Principio de Superposición

Los caudales de un hidrograma total de escorrentía directa producidos por lluvias efectivas sucesivas pueden ser hallados sumando los caudales de los hidrogramas de escorrentía directa correspondientes a las lluvias efectivas individuales, teniendo en cuenta los tiempos en que ocurren tales lluvias.

La aplicación de los principios de proporcionalidad y superposición llevan a la definición de la llamada ecuación de Convolución Discreta:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (1-34)$$

Donde:

$Q_n$  = Ordenada del hidrograma de tormenta en un tiempo  $n\Delta t$ , en  $m^3/s$ .

$P_m$  = Profundidad del exceso de lluvia en un intervalo de tiempo  $m\Delta t$  a  $(m+1)\Delta t$ , en mm.

$M$  = Número total de pulsaciones de la precipitación discreta.

$U_{n-m+1}$  = Ordenada del hidrograma unitario en un tiempo  $(n-m+1)\Delta t$ , en  $m^3/s/mm$ .

Dicho de otra manera;  $Q_n$  es el caudal de escorrentía directa en el instante  $n$ ,  $P_m$  la precipitación efectiva del bloque  $m$  y  $U_{n-m+1}$  los caudales por unidad de precipitación efectiva del hidrograma unitario.

### 1.2.5.4 Dedución del hidrograma unitario

De la ecuación (1.34), dado una precipitación efectiva  $P$  y el hidrograma de escorrentía directa de la cuenca  $Q$ , pueden deducirse las otras ordenadas de Hidrograma Unitario  $U$  mediante el proceso llamado **Deconvolución**.

Si existen  $M$  pulsos de precipitación neta y  $N$  pulsos de escorrentía directa, pueden escribirse  $N$  ecuaciones para  $Q_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , en términos de  $N-M+1$  valores desconocidos del hidrograma unitario:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= P_1 U_1 \\
 Q_2 &= P_2 U_1 + P_1 U_2 \\
 Q_3 &= P_3 U_1 + P_2 U_2 + P_1 U_3 \\
 &\vdots \\
 Q_M &= P_M U_1 + P_{M-1} U_2 + \dots + P_1 U_M \\
 Q_{M+1} &= 0 + P_M U_2 + \dots + P_2 U_N + P_1 U_{M+1} \\
 &\vdots \\
 Q_{N-1} &= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + P_M U_{N-M} + P_{M-1} U_{N-M+1} \\
 Q_N &= 0 + 0 + \dots + 0 + 0 + \dots + 0 + P_M U_{N-M+1}
 \end{aligned}$$

Puede observarse que este sistema de ecuaciones está sobredimensionado, ya que tenemos más ecuaciones que incógnitas. El número de ecuaciones es  $N$ , mientras que las incógnitas son sólo  $N-M+1$ , donde  $M > 1$ . Estas ecuaciones pueden resolverse por eliminación gaussiana.

Algunas veces, el hidrograma unitario resultante, puede mostrar algunas variaciones erráticas e incluso tener valores negativos. La causa de las variaciones erráticas puede deberse a la no linealidad en la relación lluvia neta-escorrentía directa en la cuenca considerada. además, las tormentas reales no son siempre uniformes en el tiempo y en el espacio, tal como requiere la teoría, incluso dividiendo el hietograma de lluvia neta en bloques de corta duración.

### 1.2.6 Determinación de hidrogramas

El hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, etc. para un río, arroyo o canal, si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo; esto es equivalente a decir que es el gráfico de la descarga de un flujo en función del tiempo. Éstos pueden ser hidrogramas de tormenta e hidrogramas anuales, los que a su vez se dividen en perennes y en intermitentes. (Villón, 2004)

El hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica; siendo el hidrograma unitario de una cuenca, el hidrograma de escorrentía directa que se produciría en la salida de la cuenca si sobre ella se produjera una precipitación neta unidad de una duración determinada (por ejemplo, 1 mm. durante 1 hora).

El hidrograma unitario es el método lineal propuesto por Sherman en 1932, como un hidrograma típico para la cuenca. Se denomina unitario puesto que, el volumen de escorrentía bajo el hidrograma se ajusta generalmente a 1 cm (ó 1 pulg).

El hidrograma unitario se puede considerar como un impulso unitario en un sistema lineal. Por lo tanto, es aplicable el principio de superposición; 2 cm de escorrentía producirán un hidrograma con todas las ordenadas dos veces más grandes que aquellas del hidrograma unitario, es decir, la suma de dos hidrogramas unitarios.

Matemáticamente, el hidrograma unitario es la función Kernel  $U(t-T)$  dada por:

$$q(t) = \int i(t)U(t-T)dt \quad (1-35)$$

Donde:

$q(t)$ : función del hidrograma de salida

$i(t)$ : función del hidrograma de entrada

Se debe tomar en cuenta que aun cuando las características físicas de la cuenca permanezcan relativamente constantes, las características variables de las tormentas producen cambios en la forma de los hidrogramas resultantes.

Las características de una tormenta son: La duración de la lluvia, el patrón intensidad – tiempo, la distribución espacial de la lluvia y la cantidad de escorrentía. Podemos concluir, que el hidrograma unitario es el hidrograma de un centímetro (o una pulgada) de escorrentía directa de una tormenta con una duración especificada.

### 1.2.7 Transito hidrológico

Se denomina tránsito de avenidas, transito de hidrograma, propagación de caudales, al procedimiento que a través del cual se puede determinar el hidrograma del caudal, en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba.

Si en el extremo de un canal seco se arroja un volumen de agua. (Figura 1.7) El pequeño hidrograma generado será inicialmente más alto y de menor duración (Posición A del dibujo), a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los puntos B y C, cada vez con un hidrograma más aplanado. Si se supone que no existe pérdidas de volumen (por infiltración o evaporación), en área comprendida bajo los tres hidrogramas serán idénticas

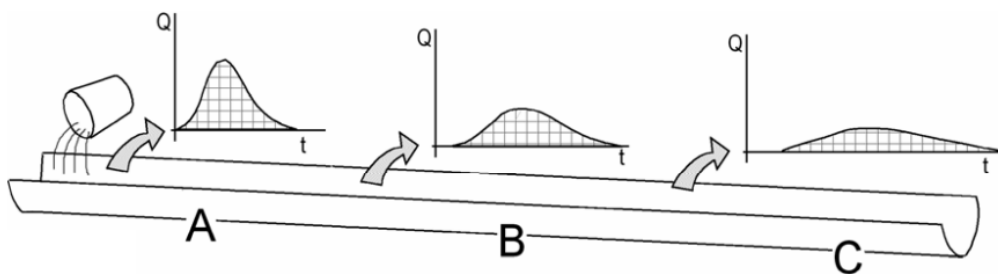


Figura 1.7: Representación de un tránsito en un cauce

Calcular el tránsito de avenidas, es obtener el hidrograma del punto C a partir del hidrograma del punto A. la utilidad práctica del procedimiento es evidente. Por ejemplo, el carácter catastrófico de una avenida está relacionado directamente con la altura del pico del hidrograma (el caudal máximo), de modo que es fundamental calcular como pico va disminuyendo a medida que se mueve aguas abajo.

### 1.2.7.1 Modelo de Muskingum y Muskingun Cungue

El método Muskingum está basado en la ecuación de continuidad y la relación de almacenamientos, caudales de ingreso y de salida. El método asume estos volúmenes de almacenamiento en el canal en un instante de tiempo como una función lineal ponderado al caudal de ingreso y de salida, el cual esta expresado en la siguiente ecuación:

$$S = K[xI + (1 - x)O] \quad (1-36)$$

Donde, S es el almacenamiento, I y O son los caudales de ingreso y salida al inicio y final del intervalo de tiempo, X y K son parámetros de Muskingum. x es un factor de ponderación que varía entre 0.0 a 1.0 representando la relativa importancia del caudal de ingreso sobre el de la salida y K representa el tiempo de viaje en el cauce.

Este modelo representa el volumen de almacenamiento constituido por dos sumandos: uno de almacenamiento en prisma y otro en cuña., tal como se esquematiza en la Fíg. 1.8.

Durante la fase de crecimiento del hidrograma, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, produciéndose un almacenamiento en forma de cuña positiva. Por el contrario, durante la fase de recesión, el caudal de salida es mayor que el de entrada, dando como resultado el desarrollo de una cuña negativa.

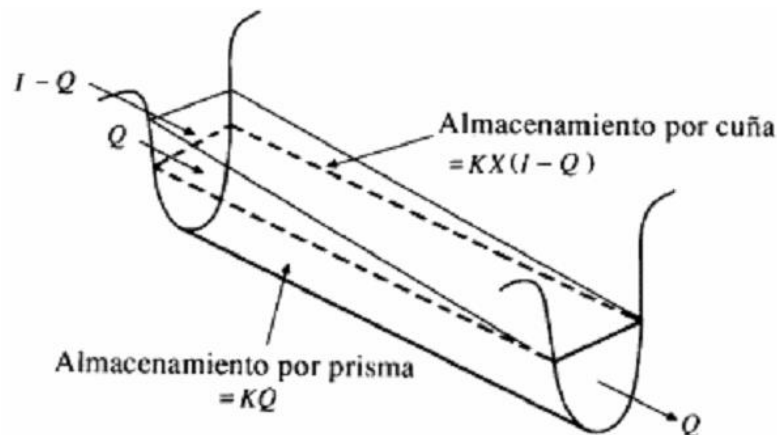


Figura 1.8: Almacenamiento en prisma y cuña en un tramo de cauce

La salida (O2) al final de un intervalo de tiempo se relaciona con el ingreso (I2) del final del  $\Delta t$ , el ingreso del inicio del ingreso del siguiente  $\Delta t$  (I1) y la salida al inicio del  $\Delta t$  (O1) por la siguiente ecuación:

$$O_2 = C_1 I_2 + C_2 I_1 + C_3 O_1 \quad (1-37)$$

Donde, si,  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de análisis, entonces,

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (1-38)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t + Kx}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (1-39)$$

$$C_3 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (1-40)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (1-41)$$

Cuando tenemos ríos con tramos largos, este se sub-divide en varios sub tramos en base a la siguiente ecuación.

$$n = \text{int} \left[ \frac{L}{3\Delta t V} \right] + 1 \quad (1-42)$$

Esta subdivisión de cauces mejora la estabilidad numérica. Aquí los cauces largos se refieren a esos donde falla la condición:  $K \leq K < \Delta < 3$ .

Donde n es el número de subcanales, L es la longitud del cauce,  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de análisis, V es la velocidad promedio del flujo en el cauce.

El parámetro K tiene un significado análogo al del tiempo de retardo mencionado al exponer el modelo Lag. En realidad, el modelo Lag constituye un caso particular del modelo de Muskingum, cuando  $X = 0,5$  y  $K = \Delta t$ .

En el caso de que se disponga de hidrogramas observados a la entrada y a la salida, se puede utilizar un procedimiento relativamente simple para determinar los valores de los parámetros K y X. Así, suponiendo varios valores de X y utilizando valores conocidos del caudal de entrada y de salida del tramo, se pueden calcular diferentes valores de K, mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{0,5 \Delta t [(I_{t+\Delta t} + I_t) - (O_{t+\Delta t} + O_t)]}{X (I_{t+\Delta t} - I_t) + (1 - X) (O_{t+\Delta t} - O_t)} \quad (1-43)$$

Este tipo de representación da lugar, para cada valor de  $X$ , a una figura que tiene forma de bucle, más o menos ancho según el valor de  $X$ , adoptando como valor de este parámetro el que está asociado a un bucle cuyas dos ramas se confunden prácticamente en una línea recta. De acuerdo con la expresión anterior, el valor de  $K$  se identifica con la pendiente de dicha línea recta.

Los valores de  $K$  y  $X$  así determinados son válidos, en sentido estricto, sólo para el tramo analizado y el hidrograma considerado. Su extensión a otras situaciones (diferente tramo y/o diferente hidrograma) hay que considerarla con cierta cautela.

En cuanto al valor del parámetro  $X$ , en el caso de ríos, dicho valor se encuentra en un rango comprendido entre 0 y 0,3. Desde el punto de vista práctico, se considerado un valor del orden de 0,25 para los tramos situados en las cuencas altas y un valor ligeramente menor, del orden de 0,20, para los tramos situados en la parta baja de la cuenca.

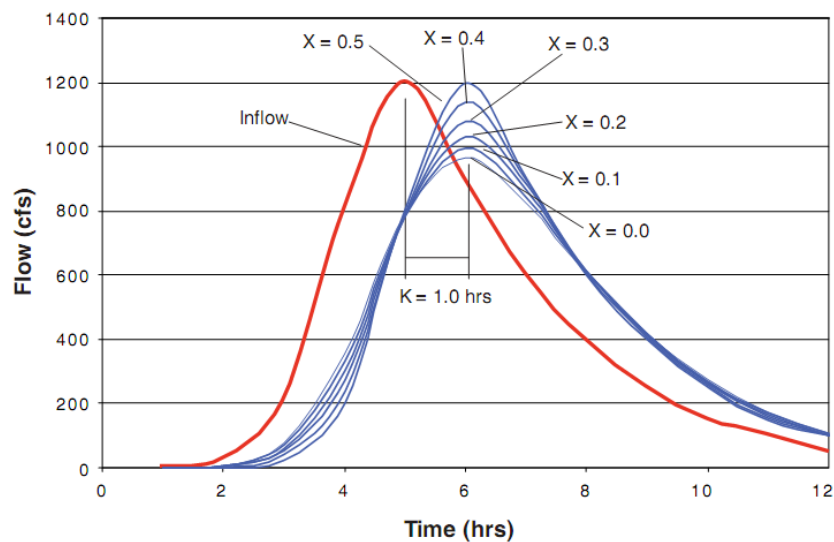


Figura 1.9: muestra el efecto de coeficientes  $K$  y  $X$  de Muskingum.

Por otro lado, hay que destacar que existen variantes del modelo (Método de Muskingun Cunge, por ejemplo) que permiten considerar un valor de  $K$  variable en función de siempre que se tenga un conocimiento detallado de las características de la sección.

### 1.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA EN UN CANAL NATURAL (RÍOS)

En el presente capítulo se estudia las características y clasificación de los perfiles de superficie de agua y además se describen al detalle la teoría básica para el cálculo de dichos perfiles para flujo unidimensional y permanente; para ello se aplican las ecuaciones fundamentales de energía y momentum. Finalmente se describen los procesos de cálculo a régimen de flujo mixto y la distribución de flujo.

La hidráulica fluvial trata de las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación al aprovechamiento de los recursos o a la reducción de los riesgos de daño. Para comprender esta materia se debe tener conocimientos de Hidráulica, Hidrología y de obras hidráulicas.

Sin embargo esta la hidráulica fluvial conlleva al ingeniero a pensar más allá de estos conocimientos, puesto que cuando hablamos del diseño de un canal, los parámetros a manejar llámese caudal, requerimientos hídricos, trazo del canal, que tipo de revestimiento, como observamos nosotros tenemos la potestad de manejar de uno u otro modo estos datos; para un río por el contrario no hay determinaciones previas, sino que las respuestas son en todo caso materia de estudio de la hidrología, la geomorfología o la hidráulica fluvial.

Las simulaciones hidráulicas nos presentan una manera de análisis de la interrelación entre la topografía del cauce de un río, los volúmenes de agua y sedimentos transportados, así como la manera que influyen en el nivel de agua las obstrucciones u obras hidráulicas que se presenten en su cauce. Siendo una herramienta muy útil para entender estos temas y darles soluciones a problemas planteados en el manejo de cauces naturales, con el software HEC-RAS.

#### 1.3.1 Ecuaciones para cálculo de perfil básico

Para el análisis hidráulico de los perfiles de superficie de agua, se usará las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, la Ecuación de Energía y la Ecuación de Cantidad de Movimiento o Momentum, estas dos ecuaciones son una herramienta importante en el análisis hidráulico ya que mediante su uso se puede plantear un modelo matemático, que nos permita resolver el problema de las elevaciones. Además de ello se usarán las relaciones empíricas como son el Método de Yarnell y el Método del WSPRO, para el caso de sobreelevaciones en puentes.

##### 1.3.1.1 Ecuación de Energía

La altura total de energía por encima del nivel de referencia en la sección 1 aguas arriba (Fig 1.10) es:

$$H = z + y \cos \theta + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1-44)$$

Donde:

$H$  = Altura total de energía, (m).

$y$  = Profundidad de la sección de flujo, (m)

$Z$  = Distancia vertical del fondo del canal desde sobre el nivel de referencia, (m)

$\theta$  = Ángulo de la pendiente del fondo, ( $^{\circ}$ )

$\alpha$  = Coeficiente de corrección de la velocidad.

$g$  = Aceleración de la gravedad, ( $m/s^2$ )

$V$  = Velocidad media, (m/s)

Con el fin de tener en cuenta una distribución no uniforme de velocidades se usa el coeficiente  $\alpha$  de energía para corregir este efecto.

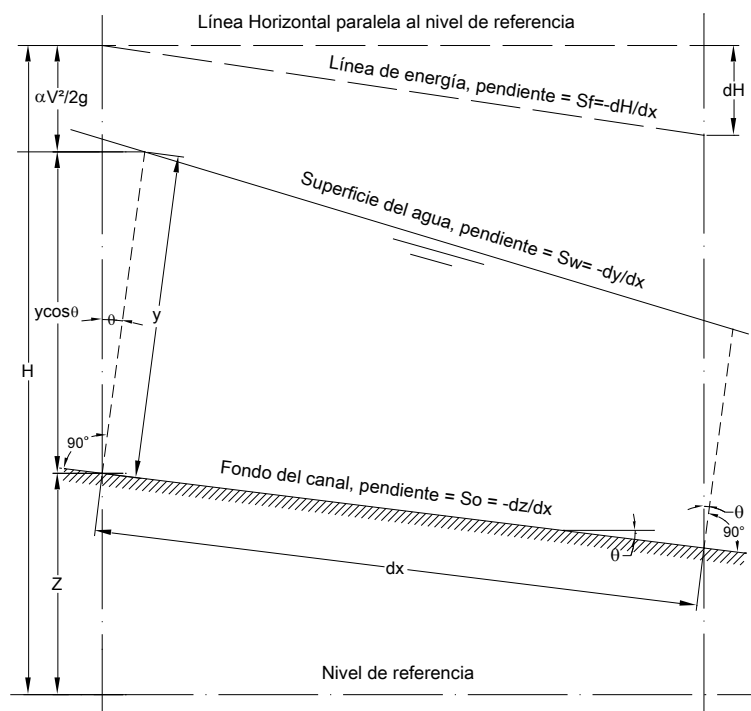


Figura 1.10: Deducción de la ecuación para perfiles de superficie de agua

La energía específica en una sección del canal es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad:

$$E = y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1-45)$$

Si graficamos la profundidad versus la energía específica en una sección del canal y caudal determinados, se obtiene la Curva de Energía Específica (Figura 1.11).

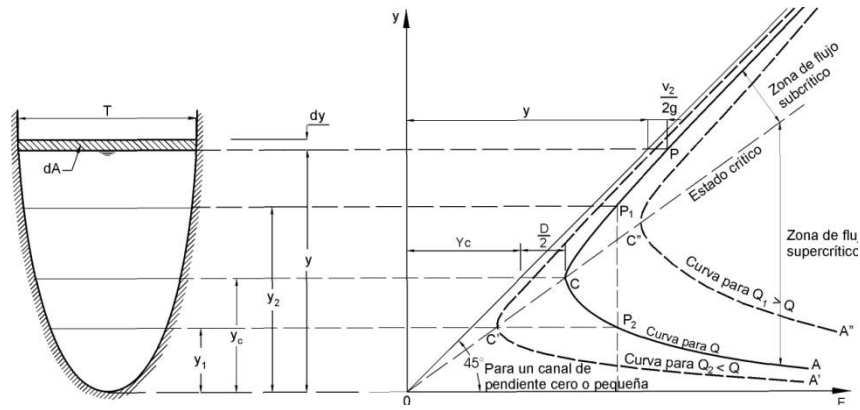


Figura 1.11: Curva de energía específica

Ella muestra la profundidad baja  $y_1$  y la profundidad alta  $y_2$  (que son alternas), también indica la energía específica mínima que corresponde al flujo crítico, es decir una profundidad crítica  $y_c$  que, si la profundidad de flujo es mayor que ésta, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica y por consiguiente el flujo es subcrítico, de lo contrario si la profundidad de flujo es menor que la crítica, el flujo es supercrítico.

Ahora si se suponen que  $\theta$  y  $\alpha$  son constantes a través del tramo del canal en consideración, y derivando la ecuación (1.44) con respecto a la longitud x:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \cos \theta \frac{dy}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1-46)$$

De la (Figura 1.10)

la pendiente de energía y la pendiente del fondo del canal son respectivamente:

$$S_f = -\frac{dH}{dx} \quad (1-47)$$

$$S_o = \text{sen} \theta = -\frac{dz}{dx} \quad (1-48)$$

Al sustituir estas pendientes en la ecuación (1.46) y resolver para  $dy/dx$ :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{\cos \theta + \alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right)} \quad (1-49)$$

Esta es la ecuación general del flujo gradualmente variado para el análisis de los perfiles.

Ahora como  $V = Q/A$ ,  $Q$  es constante y  $dA/dy = T$ , el término de la altura de la velocidad puede desarrollarse de la siguiente manera:

$$\alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right) = \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{A^2} \right) = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = -\frac{\alpha Q^2 T}{gA^3} \quad (1-50)$$

Además, el Número de Froude es:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{V}{\sqrt{gA/T}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gA/T}} \rightarrow F_r^2 = \frac{Q^2 T}{gA^3} \quad (1-51)$$

Entonces:

$$\alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right) = F_r^2 \quad (1-52)$$

Donde:

$D = A/T =$  Profundidad Hidráulica, (m)

$Q =$  Caudal, (m<sup>3</sup>/s)

$T =$  Ancho superficial, (m)

Reemplazando la última relación en la ecuación (1.49), considerando  $\theta$  pequeño,  $\cos \theta \approx 1$  y  $\alpha$  constante e igual a la unidad, tenemos:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 + F_r^2} \quad (1-53)$$

Ahora bien, cuando se utiliza la ecuación de Manning, la pendiente de la línea de energía es:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (1-54)$$

Cuando se utiliza la ecuación de Chezy:

$$S_f = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (1-55)$$

Donde:

$R =$  Radio hidráulico, (m).

$n =$  coeficiente de rugosidad de Manning

$C = 1/n =$  Factor de resistencia de Chezy.

Expresando en forma general en términos de la conductividad K (capacidad de transporte de la sección del canal):

$$S_f = \frac{Q^2}{K^2} \quad (1-56)$$

Con:

$$K = \frac{AR^{2/3}}{n}, \text{ para la ecuación de Manning, y } K = CAR^{1/2}, \text{ para la ecuación Chezy}$$

Suponiendo un flujo uniforme con caudal igual a Q ocurre en la sección. La pendiente de la línea de energía será igual a la pendiente del fondo y la ecuación (1.56) puede escribirse como:

$$S_o = \frac{Q^2}{K_n^2} \quad (1-57)$$

Donde  $K_n$  es la conductividad del flujo para flujo uniforme con una profundidad  $y_n$ . Al dividir la ecuación (1.57) entre la (1.56), tenemos:

$$\frac{S_f}{S_o} = \frac{K_n^2}{K^2} \quad (1-58)$$

Una forma conocida del flujo gradualmente variado puede ser fácilmente deducida como:

$$\frac{dy}{dx} = S_o \frac{1 - (K_n/K)^2}{1 - r(K_n/K)^2} \quad (1-59)$$

Donde:

$$r = S_o / S_c = \text{Relación de pendiente del canal}$$

$$S_c = \text{Es la pendiente crítica}$$

La pendiente crítica es obtenida considerando un canal rectangular de ancho B ( $B \gg y$ ), con  $A = By$ ,  $R \approx y$ , así:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \rightarrow V = \sqrt{gA/T} = \frac{R^{2/3} S_c^{1/2}}{n} \rightarrow S_c = \frac{gAn^2}{TR^{4/3}} = \frac{gByn^2}{By^{4/3}} = \frac{gn^2}{y^{1/3}} \quad (1-60)$$

Reemplazando esta última relación en la ecuación (1.59) tenemos:

Cuando se usa la ecuación de Manning:

$$\frac{dy}{dx} = S_o \frac{1 - (y_n / y)^{10/3}}{1 - (y_c / y)^3} \quad (1-61)$$

Cuando se usa la ecuación de Chezy:

$$\frac{dy}{dx} = S_o \frac{1 - (y_n / y)^3}{1 - (y_c / y)^3} \quad (1-62)$$

Donde:

$y_n$  = Profundidad normal

$y$  = Profundidad del agua

$y_c$  = Profundidad crítica

Las últimas ecuaciones se usarán para el análisis de los perfiles de superficie libre de agua.

### 1.3.2 Características y clasificación de los perfiles de flujo

La ecuación dinámica de flujo gradualmente variado (1.49) expresa la pendiente longitudinal del flujo con respecto al fondo del canal. Para propósitos de simplicidad se considerará el canal como prismático y se usará las ecuaciones (1.53) y (1.62) para el análisis.

El perfil del flujo representa la curva de la superficie del flujo; sería una curva de remanso, si la profundidad de flujo se incrementa en la dirección del flujo ( $dx/dy$  es positiva) y una curva de caída, si la profundidad disminuye con la dirección del flujo ( $dx/dy$  es negativa).

Si es una curva de remanso,  $dx/dy$  es positiva, la ecuación (1.62), proporciona dos posibles casos:

1.  $1 - (y_n / y)^3 > 0$  y  $1 - (y_c / y)^3 > 0$

2.  $1 - (y_n / y)^3 < 0$  y  $1 - (y_c / Y)^3 < 0$

El primer caso indica que  $y > y_n$  y  $y > y_c$ . Como  $y > y_c$ , el flujo debe ser subcrítico. Si  $y > y_n > y_c$ , el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal suave (canal con pendiente subcrítica). Por otro lado, si  $y > y_c > y_n$ , el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal empinado (canal con pendiente supercrítica). De modo similar el segundo caso indica que  $y < y_n$  y  $y < y_c$ . El flujo correspondiente debe ser supercrítico, y éste ocurre en un canal suave si  $y_n > y_c > y$  y en canal empinado si  $y_c > y_n > y$ .

Para una curva de caída,  $dy/dx$  es negativo y la ecuación (1.62) da dos posibles casos:

1.  $1 - (y_n/y)^3 > 0$  y  $1 - (y_c/y)^3 < 0$
2.  $1 - (y_n/y)^3 < 0$  y  $1 - (y_c/y)^3 > 0$

El primer caso indica que  $y_c > y > y_n$  y, por tanto, que el flujo es supercrítico y ocurre en un canal empinado. Del mismo modo, el segundo caso indica que  $y_n > y > y_c$ , luego el flujo es subcrítico y ocurre en un canal suave.

Cuando la superficie del agua es paralela al fondo del canal,  $dy/dx=0$ , la ecuación (1.62) da  $1 - (y_n/y)^3 = 0$  de donde  $y = y_n$ , el cual indica un flujo uniforme. El flujo es uniforme subcrítico si  $y = y_n > y_c$ , uniforme crítico si  $y = y_n = y_c$  y uniforme supercrítico si  $y_c = y_n = y$ .

En un canal con pendiente horizontal  $S_0 = 0$ , la ecuación (1.64) da  $y_n = \infty$ , luego la ecuación (1.62) toma la siguiente forma:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-S_f}{1 - F_r^2} \quad (1-63)$$

Considerando  $y_n = \infty$  la ecuación (1.65) indica dos condiciones posibles:

1.  $y_n > y < y_c (F_r^2 < 0)$
2.  $y_n > y_c < y (F_r^2 > 0)$

La primera condición representa un flujo subcrítico con una curva de caída, porque  $dy/dx$  se muestra como negativo.

La segunda condición representa un flujo supercrítico con una curva de remanso, porque  $dy/dx$  se muestra como positivo.

En un canal de pendiente adversa,  $S_0 < 0$  la ecuación (1.53) da dos casos posibles:

1. Un flujo subcrítico cuando,  $y > y_c (F_r < 0)$

2. Un flujo supercrítico cuando,  $y < y_c (F_r > 0)$

En el primer caso,  $dy/dx$  es negativo, el cual indica que el perfil de flujo es una curva de caída. En el segundo caso  $dy/dx$  es positivo, el cual indica que el perfil de flujo es una curva de remanso.

Para un caudal y unas condiciones de canal determinados de las líneas de profundidad normal y las líneas de profundidad crítica dividen el espacio de un canal en tres zonas:

Zona 1: Espacio por encima de la línea superior.

Zona 2: Espacio entre las dos líneas.

Zona 3: Espacio por debajo la línea superior.

Luego los perfiles de flujo pueden dividirse en trece tipos diferentes; estos se designan como: H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; y A2, A3; donde la letra describe la pendiente así:

H para la horizontal, M para suave (subcrítica), C para crítica, S para empinada (supercrítica) y A para pendiente adversa, y el número representa el número de zona. Las características de estos perfiles se dan en la Tabla 1.4, y sus formas se muestran en la Figura 1.12.

Tabla 1.3 : Características de los perfiles

| Pendiente del canal                | Designación |        |        | Relación de Y con Yn y Yc |        |        | Tipo General de curva       | Tipo de flujo |
|------------------------------------|-------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|-----------------------------|---------------|
|                                    | Zona 1      | Zona 2 | Zona 3 | Zona 1                    | Zona 2 | Zona 3 |                             |               |
| <b>Horizontal</b><br>$S_0=0$       | Ninguno     |        |        | $Y > Y_n > Y_c$           |        |        | Ninguno                     | Ninguno       |
|                                    | H2          |        |        | $Y_n > Y > Y_c$           |        |        | Caída                       | Supercrítico  |
|                                    | H3          |        |        | $Y_n > Y_c > Y$           |        |        | Remanso                     | Supercrítico  |
| <b>Suave</b>                       | M1          |        |        | $Y > Y_n > Y_c$           |        |        | Remanso                     | Subcrítico    |
|                                    | M2          |        |        | $Y_n > Y > Y_c$           |        |        | Caída                       | Subcrítico    |
|                                    | M3          |        |        | $Y_n > Y_c > Y$           |        |        | Remanso                     | Supercrítico  |
| <b>Crítica</b> $S_0 = S_c > 0$     | C1          |        |        | $Y > Y_c > Y_n$           |        |        | Remanso                     | Subcrítico    |
|                                    | C2          |        |        | $Y_c = Y = Y_n$           |        |        | Paralelo al fondo del canal | Crítico       |
|                                    | C3          |        |        | $Y_n > Y > Y_c$           |        |        | Remanso                     | Supercrítico  |
| <b>Empinada</b><br>$S_0 > S_c > 0$ | S1          |        |        | $Y > Y_c > Y_n$           |        |        | Remanso                     | Subcrítico    |
|                                    | S2          |        |        | $Y_c > Y > Y_n$           |        |        | Caída                       | Supercrítico  |
|                                    | S3          |        |        | $Y_c > Y_n > Y$           |        |        | Remanso                     | Supercrítico  |
| <b>Adversa</b> $S_0 < 0$           | Ninguno     |        |        | $Y_n > (Y_n)_+ > Y_c$     |        |        | Ninguno                     | Ninguno       |
|                                    | A2          |        |        | $(Y_n)_+ > Y > Y_c$       |        |        | Caída                       | Subcrítico    |
|                                    | A3          |        |        | $(Y_n)_+ > Y_c > Y$       |        |        | Remanso                     | Supercrítico  |

(\*)  $Y_n$  en paréntesis se supone como valor positivo.

Fuente: Ven Te Chow – Hidráulica de Canales Abiertos (Pág. 220)

|                                     | Perfiles en la zona 1:<br>$Y > Y_n; Y > Y_c$ | Perfiles en la zona 2:<br>$Y \geq Y_n \geq Y_c; Y_c \geq Y \geq Y_n$ | Perfiles en la zona 3:<br>$Y < Y_n; Y < Y_c$ |
|-------------------------------------|--|--|--|
| Pendiente Horizontal<br>$Y_n > Y_c$ | Ninguno                                      | H2   | H2   |
| Pendiente Suave<br>$Y_n > Y_c$      | M1   | M2   | M3   |
| Pendiente Crítica<br>$Y_n = Y_c$    | C1   | C2   | C3   |
| Pendiente Empinada<br>$Y_n < Y_c$   | S1   | S2   | S3   |
| Pendiente Adversa                   | Ninguno                                      | A2   | Ninguno                                      |

Figura 1.12: Clasificación de perfiles de flujo gradualmente variados  
Fuente: Ven Te Chow – Hidráulica de Canales Abiertos (Pág. 221)

### 1.3.3 Métodos de cálculo de superficie libre de agua

#### 1.3.3.1 Método de la ecuación de energía (Método del paso estándar)

Como en canales naturales los elementos hidráulicos no son independientes de la distancia a lo largo del canal, es necesario llevar a cabo estudios de campo para recolectar los datos requeridos de todas las secciones consideradas en el cálculo, y el cálculo se lleva cabo mediante pasos de estación a estación, en las cuales se han determinado las características hidráulicas, es decir las distancias entre estaciones son conocidas y el detalle está en determinar la profundidad del flujo en estas estaciones, el procedimiento es iterativo.

Para el cálculo del perfil por lo general es necesario contar con la siguiente información, y seguir los pasos:

- 1.- El caudal.
- 2.- Elevación de la superficie del agua en la sección de control, si no se cuenta con este dato, tomar una elevación supuesta en una sección lo suficientemente lejos de la sección inicial a través del cual se desea calcular el perfil.

3.- Tener los elementos geométricos en varias secciones a lo largo del tramo (estos datos pueden obtenerse por batimetría, fotografía aérea, nivelación o por el Sistema de Información Geográfica (GIS)).

4.- La rugosidad del canal y las pérdidas por remolino (Eddies) en varias secciones (éste puede obviarse).

Los perfiles de superficie de agua son calculados de una sección a la siguiente resolviendo la ecuación de energía mediante un procedimiento iterativo, llamado el **Método del Paso Estándar**. La ecuación de energía está escrita como sigue:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (1-64)$$

Donde:

$Y_1, Y_2$  = Profundidad del agua en las secciones 1 y 2, en (m).

$Z_1, Z_2$  = Elevación del fondo del canal, sobre el nivel de referencia, en (m).

$V_1, V_2$  = Velocidad media en las secciones 1 y 2, en (m/s).

$\alpha_1, \alpha_2$  = Coeficiente corrección de la velocidad en las secciones 1 y 2, adimensional

$g$  = Aceleración de la gravedad, en (m/s<sup>2</sup>).

$h_e$  = Pérdida de altura de energía, en (m).

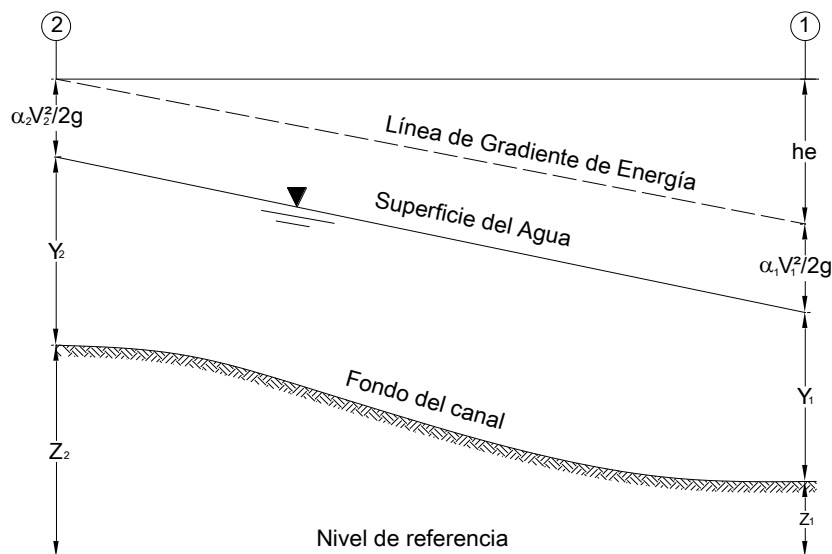


Figura 1.13: Representación de términos en la ecuación de energía

Las pérdidas de altura de energía ( $h_e$ ), entre dos secciones es conformada por las pérdidas por fricción más las pérdidas por contracción o expansión. La ecuación para la pérdida de altura de energía es como sigue:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (1-65)$$

Donde:

$L$  = Longitud del tramo, entre las secciones 1 y 2, en (m).

$\bar{S}_f$  = Pendiente media de fricción entre las secciones 1 y 2, en (m).

$C$  = Coeficiente de pérdida por contracción o expansión, adimensional.

#### **Cálculo de los elementos de pérdida de energía:**

La longitud entre las secciones es el ponderado que depende del caudal promedio:

$$L = \frac{L_{pii} \bar{Q}_{pii} + L_{cp} \bar{Q}_{cp} + L_{pid} \bar{Q}_{pid}}{\bar{Q}_{pii} + \bar{Q}_{cp} + \bar{Q}_{pid}} \quad (1-66)$$

Donde:

$\bar{Q}_{pii}, \bar{Q}_{cp}, \bar{Q}_{pid}$  = Caudales promedio para la planicie de inundación izquierda, cauce principal y planicie de inundación derecha, respectivamente.

$L_{pii}, L_{cp}, L_{pid}$  = Longitud entre los tramos de la planicie de inundación izquierda, cauce principal y planicie de inundación derecha, respectivamente.

El caudal en cada subdivisión es calculado así:

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (1-67)$$

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3} \quad (1-68)$$

Donde:

$K$  = Conductividad para la subdivisión

$n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión

$A$  = Área mojada para la subdivisión

$R$  = Radio hidráulico para la subdivisión

**Observación:**

Los programas HEC-2 y HEC-RAS, consideran que la longitud del tramo del cauce principal se mide sobre la línea central de las secciones y la longitud de las planicies como la distancia de los centros de masa del agua que se mueve en esa área.

Trabajan para la subdivisión de la sección transversal para la conducción de la siguiente manera; el primero toma en cuenta las coordenadas de las secciones y el segundo los coeficientes de Manning, claro basándose en los puntos de la coordenada siempre, tal como muestran las Figura 1.14 y 1.15.

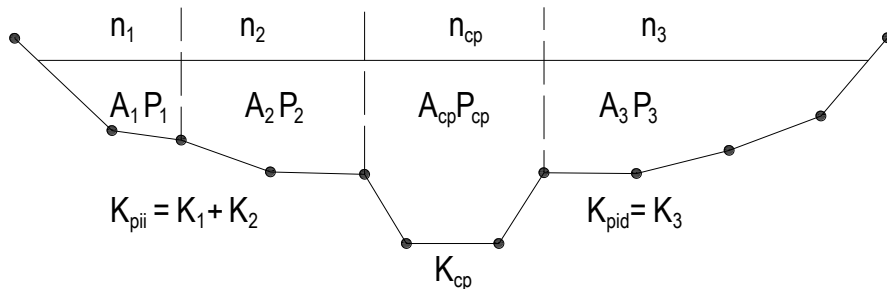


Figura 1.14 Método de subdivisión de la conductividad definido por el HEC-RAS

La conductividad total es:

$$K_T = K_{pii} + K_{cp} + K_{pid} \quad (1-69)$$

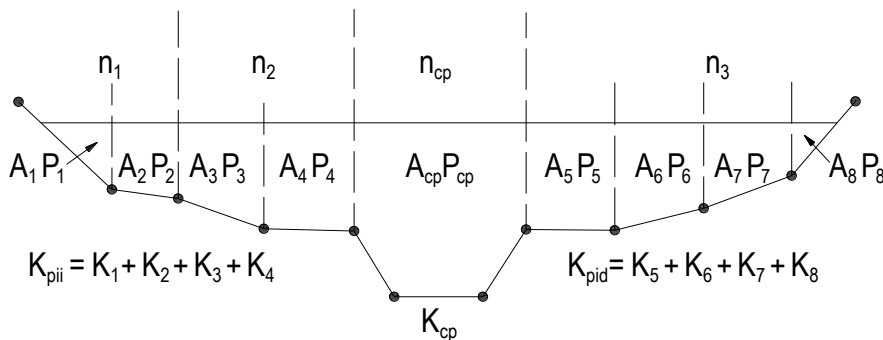


Figura 1.15: Método de subdivisión de la conductividad definido por el HEC-2

La conductividad total es:

$$K_T = K_{pii} + K_{cp} + K_{pid} \quad (1-70)$$

Tomaremos el método de subdivisión hecha por el HEC-RAS, que como se dijo depende del coeficiente de Manning; posteriormente se hará un análisis más detallado de cada uno de los parámetros que intervienen en la formulación del método del paso estándar.

Ahora si existe una variación en el coeficiente de rugosidad de Manning para el cauce principal, se puede tomar un criterio como lo hace el HEC-RAS. Tendríamos el coeficiente de rugosidad de Manning compuesto (Horton, 1933):

$$n_c = \left[ \frac{\sum^N P_i n_i^{1.5}}{P} \right]^{2/3} \quad (1-71)$$

Donde:

$n_c$  = Coeficiente de rugosidad equivalente compuesto

$P$  = Perímetro mojado del cauce principal

$P_i$  = Perímetro mojado de la subdivisión  $i$

$n_i$  = Coeficiente de rugosidad para la subdivisión  $i$

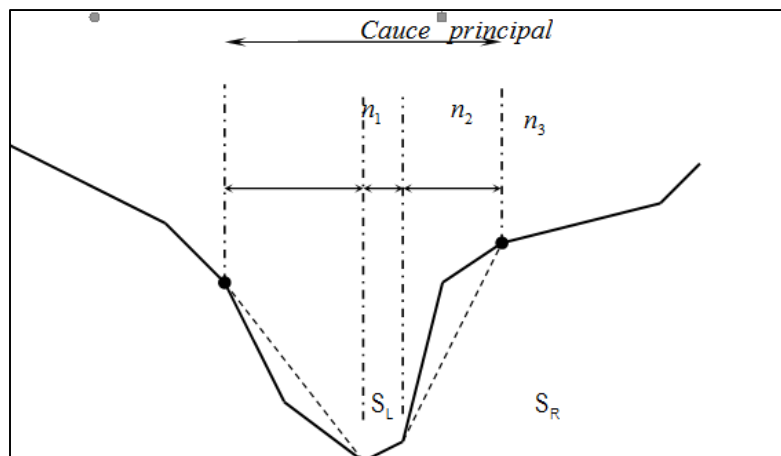


Figura 1.16 Definición de la pendiente para el cálculo de la rugosidad compuesta

El HEC-RAS considera que si las pendientes laterales del cauce principal  $S_L$  y  $S_R$  son menores que 5H: 1V se usa este criterio de la subdivisión y se toma rugosidades de Manning variables, de lo contrario se obvia y se toma un sólo valor de Manning. Esta consideración es lógica pues si el cauce principal cambia considerablemente la pendiente será porque las rugosidades están variando, (la erosión está siendo variable)

### 1.3.4 Coeficiente de rugosidad de Manning “n” compuesto para el canal principal

Según (Chow, Maidment, & Mays, 1994) nos indica que: seleccionar adecuadamente un valor de “n” significa hacer una buena estimación de la resistencia al escurrimiento en un canal dado. Una guía apropiada para la determinación del coeficiente de rugosidad tendría que pasar por comprender 4 caminos generales:

- a) Comprender los factores que afectan, el valor de “n” y así adquirir un conocimiento básico del problema y reducir el ancho campo de suposiciones.
- b) Consultar un cuadro de valores típicos n para canales de varios tipos.
- c) Examinar y hacerse familiar con la aparición de algunos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos.
- d) Determinar el valor de n a través de un procedimiento analítico basado sobre la distribución teórica de la velocidad en la sección transversal del canal y sobre los datos de medidas de velocidad o de rugosidad.

Los acercamientos en detalle los podemos apreciar en (Chow, 2000) Chow (5), en los artículos (5-8) Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning (5.9) El cuadro del coeficiente de rugosidad de Manning (5-10) Ilustraciones de canales con diferente rugosidad (8-7) Métodos para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning.

*Tabla 1.4: Coeficiente de rugosidad Manning “n” recomendados*

|        | <b>Descripción de la Corriente</b>   | <b>Mínimo</b> | <b>Normal</b> | <b>Máximo</b> |
|--------|--|---------------|---------------|---------------|
| A      | Cauces Naturales   |               |               |               |
| A.1    | Cursos Secundarios (Ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)  |               |               |               |
| A.1.1. | Cursos en Planicies  |               |               |               |
|        | - Limpios, rectos, sin fallas ni pozos   | 0.025         | 0.030         | 0.033         |
|        | - Rectos con algunas piedras y pastos  | 0.030         | 0.035         | 0.040         |
|        | - Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos   | 0.033         | 0.040         | 0.045         |
|        | - Meandros con muchas piedras y pastos   | 0.035         | 0.045         | 0.050         |
|        | - Meandros con muchas piedras  | 0.045         | 0.050         | 0.060         |
|        | - Tramos sucios, con pastos y pozos profundos  | 0.050         | 0.070         | 0.080         |
|        | - Tramos con muchos pastos, pozos profundos y cause en crecida con muchos arbustos y matorrales  | 0.075         | 0.100         | 0.150         |
| A.1.2  | Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida |               |               |               |
|        | - Causes de grava, canto rodado y algunas rocas  | 0.030         | 0.040         | 0.050         |
|        | - Causes de grava, canto rodado, con grandes rocas   | 0.040         | 0.050         | 0.070         |

|       |  |       |       |       |
|-------|--|-------|-------|-------|
| A.2   | Cursos de planicies inundadas  |       |       |       |
| A.2.1 | Zonas de pastos, sin arbustos  |       |       |       |
|       | - Pastos cortos  | 0.025 | 0.030 | 0.035 |
|       | - Pastos altos   | 0.030 | 0.035 | 0.050 |
| A.2.2 | Zonas cultivadas   |       |       |       |
|       | - Sin cultivo  | 0.020 | 0.030 | 0.030 |
|       | - Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica   | 0.025 | 0.035 | 0.045 |
|       | - Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica  | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| A.2.3 | Zonas urbanísticas   |       |       |       |
|       | - Escaso arbusto y pasto abundante   | 0.035 | 0.050 | 0.070 |
|       | - Pequeños árboles y arbustos sin follaje (Parada invernal)  | 0.035 | 0.050 | 0.060 |
|       | - Pequeños árboles y arbustos con follaje (Fase vegetativa)  | 0.040 | 0.060 | 0.080 |
|       | - Arbustos medianos a densos durante la parada invernal  | 0.045 | 0.070 | 0.110 |
|       | - Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa  | 0.070 | 0.100 | 0.160 |
| A.2.4 | Zonas arbóreas   |       |       |       |
|       | - Sauce denso, temporal invernal   | 0.110 | 0.150 | 0.200 |
|       | - Terreno claro con ramas sin brotes   | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
|       | - Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes   | 0.050 | 0.060 | 0.080 |
|       | - Zonas explotación de madera con árboles caídos, poco crecimiento en las zona baja y nivel de inundación por debajo de las ramas                                      | 0.080 | 0.100 | 0.120 |
|       | - Zonas de explotación maderera con árboles caídos poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas.                                  | 0.100 | 0.120 | 0.160 |
| A.3   | Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)  |       |       |       |
|       | En este caso los valores de coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cause secundario análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menos |       |       |       |
|       | - Sección regular sin rocas ni arbustos  | 0.025 |       | 0.060 |
|       | - Sección irregular y rugosa   | 0.035 |       | 0.100 |

Fuente: "Hidráulica de Canales Abiertos" Chow (1994)

Otra fuente que nos brinda algunos valores de “n” los encontramos en el cuadro y nomogramas siguientes encontrados en un documento de la FAO.

Esta misma Fuente nos da un nomograma interesante para resolver la fórmula de Manning. Si se conocen tres variables, es posible encontrar la cuarta.

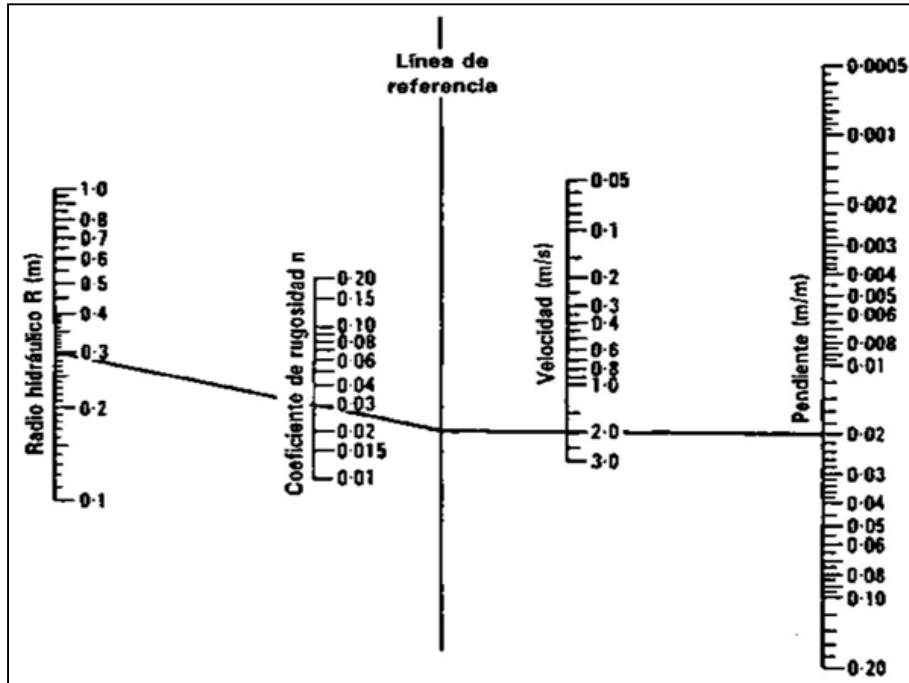


Figura 1.17 Nomograma para resolver la fórmula de Manning

### 1.3.5 Evaluación de la carga de energía cinética media

Para una superficie de elevación dada, la energía cinética media es obtenida por la evaluación de las tres subsecciones de una sección total (planicie izquierda, cauce principal y planicie derecha) como se muestra en la Figura 1.18. El cálculo de la energía cinética media es necesario para obtener el coeficiente alfa ponderado.

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} + Q_3 \frac{V_3^2}{2g}}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \quad (1-72)$$

$$\alpha = \frac{2g \left[ Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} + Q_3 \frac{V_3^2}{2g} \right]}{(Q_1 + Q_2 + Q_3) \bar{V}^2} \quad (1-73)$$

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + Q_3 V_3^2}{(Q_1 + Q_2 + Q_3) \bar{V}^2} \quad (1-74)$$

$$\alpha = \frac{A_t^2 \left( \frac{K_{pii}^3}{A_{pii}^2} + \frac{K_{cp}^3}{A_{cp}^2} + \frac{K_{pid}^3}{A_{pid}^2} \right)}{K_t^3} \quad (1-75)$$

Donde:

$A_t$  = Área total del flujo de la sección.

$A_{pii}, A_{cp}, A_{pid}$  = Áreas de flujo para la planicie de inundación izquierda, cauce principal, y planicie de inundación derecha, respectivamente.

$K_t$  = Conductividad total para la sección.

$K_{pii}, K_{cp}, K_{pid}$  = Conductividad para la planicie de inundación izquierda, cauce principal, y planicie de inundación derecha, respectivamente.

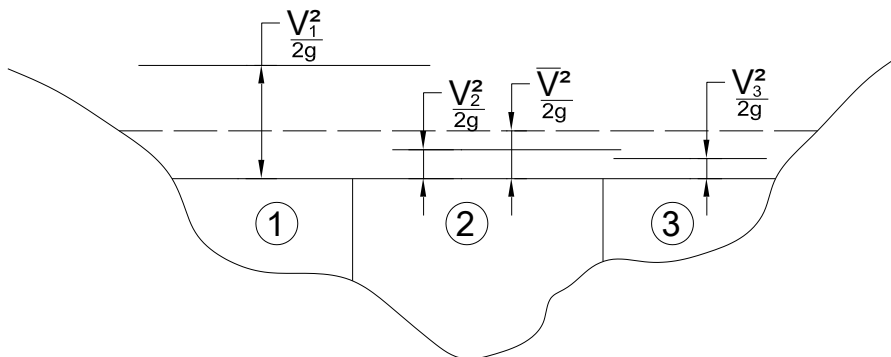


Figura 1.18: Ejemplo de la obtención de la energía media

### 1.3.6 Evaluación de las pérdidas por fricción

Se sabe que la pendiente de fricción (pendiente del gradiente de energía) para una sección transversal es calculada por la ecuación de Manning y es la siguiente:

$$S_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (1-76)$$

Alternativamente las expresiones para representar la pendiente de fricción, son las siguientes:

Promedio de la conductividad

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (1-77)$$

Promedio aritmético de la pendiente de fricción

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (1-78)$$

**Media geométrica de la pendiente de fricción**

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad (1-79)$$

Media armónica de la pendiente de fricción

$$\bar{S}_f = \frac{2}{\frac{1}{S_{f1}} + \frac{1}{S_{f2}}} = \frac{2(S_{f1} \times S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (1-80)$$

Dónde:  $K_1$  y  $K_2$ , son las conductividades totales en las secciones 1 y 2 respectivamente.

El modelo HEC-2 y HEC-RAS recomienda usar las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5, según el tipo de perfil como se indica en la Tabla 1.5:

*Tabla 1.5: Modelos recomendados para la pendiente de fricción*

| Tipo de Perfil | Modelo de pendiente fricción recomendado por Reed y Wolfkill (1976). | Modelo de pendiente fricción empleado por el HEC-2 y HEC-RAS. |
|----------------|--|---|
| M1             | Ecuac. (1.77)  | Ecuac. (1.77)   |
| M2             | Ecuac. (1.79)  | Ecuac. (1.79)   |
| M3             | Ecuac. (1.80)  | Ecuac. (1.78)   |
| S1             | Ecuac. (1.79)  | Ecuac. (1.77)   |
| S2             | Ecuac. (1.77)  | Ecuac. (1.77)   |
| S3             | Ecuac. (1.78)  | Ecuac. (1.78)   |

*Fuente: French- Hidraulica de canales abiertos - 1992 (Pág. 233)*

### 1.3.7 Evaluación de las pérdidas por expansión y contracción

Estas pérdidas ocurren debido a cambios en la sección del cauce como es natural, y son evaluados mediante la expresión:

$$C \left| \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (1-81)$$

Donde C es el coeficiente de contracción o expansión, de los datos obtenidos por estudios hechos por el HEC-1995, se recomiendan coeficientes de contracción y expansión gradual de 0.1 y 0.3 (para canales naturales) respectivamente y para contracciones típicas en puentes los valores de 0.3 y 0.5 respectivamente. Para ubicaciones cercanas a puentes donde ocurren cambios abruptos, los coeficientes pueden tomar valores mayores de 0.5 y 0.8 para contracciones y expansiones respectivamente. La siguiente tabla muestra los valores de coeficientes de contracción y expansión para flujo subcrítico y supercrítico, de ser el caso:

Tabla 1.6: Coeficientes de contracción y expansión

| Descripción                        | Contracción | Expansión |
|------------------------------------|-------------|-----------|
| <b>a. Para flujo subcrítico</b>    |             |           |
| Cálculo de pérdidas sin transición | 0.1         | 0.3       |
| Transición gradual                 | 0.3         | 0.5       |
| Secciones típicas de puentes       | 0.6         | 0.8       |
| Transición abrupta                 | 0.0         | 0.0       |
| <b>b. Para flujo supercrítico</b>  |             |           |
| Cálculo de pérdidas sin transición | 0.0         | 0.0       |
| Transición gradual                 | 0.1         | 0.1       |
| Transición abrupta                 | 0.1         | 0.2       |

Fuente: Referencia Hidráulica- HEC-RAS – 2009 (Cap. 5, Pág. 5-8)

### 1.3.8 Procedimiento computacional

El proceso es iterativo (ensayo y error), solucionando las ecuaciones (1.64) y (1.65) así:

- 1.- Asumir una elevación de la superficie de agua (aguas arriba o aguas abajo de la sección transversal si es flujo subcrítico o supercrítico).
- 2.- Con el valor asumido de la superficie de agua, determinar la correspondiente conductividad total y la carga de velocidad.
- 3.- Con el valor del paso 2, calcule  $\bar{S}_f$ , y resolver la ecuación (1.65) para obtener  $h_e$ .
- 4.- Con los valores de los pasos 2 y 3, resuelve la ecuación (1.64) para la superficie del agua  $WS_2$  (es decir para la sección 2).
- 5.- Comparar el valor calculado  $WS_2$ , con el valor asumido en el paso 1

Repetir los pasos del 1 al 5, definir una tolerancia como: (0.003 m) si es necesario.

### 1.3.8.1 Método numérico de la secante usado por el HEC-RAS

El criterio usado para asumir la elevación de la superficie de agua en el procedimiento iterativo varía de ensayo a ensayo.

1.- El primer ensayo de la superficie de agua está basado en proyectar la superficie de agua de la sección transversal anterior hacia la sección transversal actual.

2.- El segundo ensayo de la elevación de la superficie del agua es la elevación supuesta más el 70% del error del primer ensayo  $(WS_{\text{calc.}} - WS_{\text{asum}})$ , es decir:

$$WS_{\text{new}} = WS_{\text{asum}} + 0.70(WS_{\text{calc.}} - WS_{\text{asum}}) \quad (1-82)$$

$$WS_{\text{new}} = 0.30WS_{\text{asum}} + 0.70WS_{\text{calc.}}, \text{ (usado por el HEC-RAS)} \quad (1-83)$$

$$WS_{\text{new}} = \frac{1}{2}(WS_{\text{asum}} + WS_{\text{calc.}}) = 0.50WS_{\text{asum}} + 0.50WS_{\text{calc.}}, \text{ (Usado por el HEC-2)} \quad (1-84)$$

3.- El tercer y los subsecuentes ensayos se estiman por el Método de la Secante, de proyectar la razón de cambio de la diferencia entre lo calculado y las elevaciones supuestas para dos ensayos previos.

La ecuación del Método de la Secante es la siguiente:

$$WS_{\text{new}} = WS_{i-2} - \frac{Err_{i-2} \times Err_{\text{asum}}}{Err_{\text{Dif}}} \quad (1-85)$$

Donde:

$WS_{\text{new}}$  = Nueva de superficie de agua asumida.

$WS_{i-1}$  = Superficie de agua asumida en la iteración previa (1ra. iteración).

$WS_{i-2}$  = Superficie de agua asumida de dos ensayos previa (2da. iteración).

$Err_{i-2}$  = Error de dos ensayos previos (Superficie de agua calculado menos el asumido de la iteración I- 2)

$Err_{\text{asum}}$  = Diferencia entre las superficies de agua asumidas de dos ensayos previos:

$$Err_{\text{asum}} = WS_{i-2} - WS_{i-1} \quad (1-86)$$

$Err_{Diff}$  = Superficie de agua asumida menos superficie de agua calculado de las iteraciones previas (1ra. Iteración), más el error de los dos ensayos previos.

Con esto se puede reordenar de la siguiente manera:

$$WS_{new} = WS_{I-2} - \frac{Err_{I-2} \times (WS_{I-2} - WS_{I-1})}{WS_{I-1} - WS_{calc.I-1} + Err_{I-2}} \quad (1-87)$$

$$WS_{new} = WS_{I-2} - \frac{(WS_{calc.I-2} - WS_{I-2})(WS_{I-2} - WS_{I-1})}{(WS_{I-1} - WS_{calc.I-1}) + (WS_{calc.I-2} - WS_{I-2})} \quad (1-88)$$

El cambio de un ensayo al siguiente es restringido a un máximo de  $\pm 50\%$  de la elevación supuesta al ensayo anterior. En ocasión el método de la secante puede fallar si el valor de  $Err_{Diff}$  llega a ser demasiado pequeña. Si esto ocurre pueden variar la nueva suposición usando en este caso la relación del HEC-2 (el promedio). Estos programas están restringidos a un máximo número de iteraciones (20 por ejemplo en el HEC-RAS).

#### Formulación general por el método del paso estándar

La ecuación general del balance de energía entre las secciones 1 y 2 (Figura 1.13) es:

$$Y_2 + z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + L\bar{S}_f + C \left| \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (1-89)$$

#### Los elementos de pérdida de energía:

El coeficiente de energía obtenido mediante:

$$\alpha = \frac{A_t^2 \left( \frac{K_i^3}{A_i^2} + \dots + \frac{K_n^3}{A_n^2} \right)}{K_t^3} = \frac{A_T^2}{K_T^3} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^3}{A_i^2} \quad (1-90)$$

$$K_T = K_1 + \dots + K_n \text{ (Ecuación 1.69)}$$

$K_i$  = Conductividad para la franja o subdivisión i (ver Figura 1.19)



$$Y_2 = Y_1 + z_1 - z_2 + \frac{1}{2g} \left[ \left( \frac{A_T^2}{K_T^3} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^3}{A_i^2} \right)_1 \times \bar{V}_1^2 - \left( \frac{A_T^2}{K_T^3} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^3}{A_i^2} \right)_2 \times \bar{V}_2^2 \right] + L\bar{S}_f + \quad (1-94)$$

$$\frac{C}{2g} \left[ \left( \frac{A_T^2}{K_T^3} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^3}{A_i^2} \right)_1 \times \bar{V}_1^2 - \left( \frac{A_T^2}{K_T^3} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^3}{A_i^2} \right)_2 \times \bar{V}_2^2 \right]$$

Donde:

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R_i^{2/3} \quad ; \quad \begin{cases} A_i \rightarrow f(Y) \\ R_i = \frac{A_i}{P_i} \rightarrow f(Y) \end{cases}$$

$$V_i = \frac{Q_i}{A_i} \rightarrow f(Y)$$

$Y_1$ , es la profundidad de agua conocida.

Luego el área total de flujo y el perímetro mojado de la sección se obtienen mediante la sumatoria “por franjas”, (ver Figura 1.19) así:

a) Área de flujo para una franja cualquiera se calcula con:

$$A_i = \frac{1}{2} [(Z_1 - z_{i+1}) + (Z_1 - z_{i+2})] (x_{i+2} + x_{i+1}) \quad (1-95)$$

Y para los extremos:

$$A_o = \frac{1}{2} (Z - z_2)^2 \frac{(x_2 - x_1)}{(z_1 - z_2)} \quad (1-96)$$

$$A_f = \frac{1}{2} (Z - z_n)^2 \frac{(x_{n+1} - x_n)}{(z_{n+1} - z_n)} \quad (1-97)$$

El área total de flujo para la sección 1 es entonces:

$$A_T = A_o + \sum_{i=1}^{n-2} A_i + A_f \quad (1-98)$$

b) Perímetro mojado en el interior de la sección transversal:

$$P_i = \sqrt{(x_{i+2} - x_{i+1})^2 + (z_{i+2} - z_{i+1})^2} \quad (1-99)$$

Y para los extremos:

$$P_o = \sqrt{(Z_1 - z_2)^2 + \left[ \frac{(Z_1 - z_2)(x_2 - x_1)}{z_1 - z_2} \right]^2} \quad (1-100)$$

$$P_f = \sqrt{(Z_1 - z_n)^2 + \left[ \frac{(Z_1 - z_n)(x_{n+1} - x_n)}{z_{n+1} - z_n} \right]^2} \quad (1-101)$$

El perímetro mojado total para la sección 1 es entonces:

$$P_T = P_o + \sum_{i=1}^{n-2} P_i + P_f \quad (1-102)$$

### 1.3.9 Determinación de las profundidades críticas

Una vez obtenida la elevación correcta de la superficie del agua, se verifica que la elevación calculada se encuentre en el lado correcto de la elevación del tirante crítico para esa sección. Si la elevación se encuentra en el lado equivocado, se ha cometido un error y éste por lo común se produce cuando las longitudes de los tramos son muy grandes o de una mala representación del área de flujo de la sección transversal.

Para un perfil subcrítico, un chequeo preliminar para el régimen de flujo apropiado involucra la comprobación el número de Froude. El programa debe calcular los números de Froude de la superficie de agua equilibrada para ambos; el cauce principal y la sección total. Si ambos de estos dos números de Froude son mayores que 0.94, entonces el programa verificará el régimen de flujo calculando una estimación más exacta de la profundidad crítica usando el método de energía específica mínima. Un número de Froude de 0.94 se usa en lugar de 1.0, porque el cálculo de número de Froude en los cauces irregulares no es exacto. Por consiguiente, usar un valor de 0.94 es conservador, de esta manera trabaja el HEC-RAS.

Para un perfil supercrítico, la profundidad crítica es automáticamente calculada para cada sección, que habilita una comparación directa entre las elevaciones balanceadas y críticas.

La profundidad crítica de una sección puede ser determinada si algunas de las condiciones son satisfechas:

- 1.- Si el régimen de flujo supercrítico puede ser especificado.

- 2.- Si el cálculo de la profundidad crítica puede ser requisito por el usuario.
- 3.- Si este es un borde externo de la sección y la profundidad crítica puede ser determinado para asegurar el uso de condiciones de borde ingresados en el régimen correcto de flujo.
- 4.- Comprobar que el número de Froude para un perfil subcrítico, indique que la profundidad crítica necesita ser determinado para verificar que el régimen de flujo este asociado con la elevación balanceada.

Energía específica para una sección se determina por:

$$E = WS + \alpha \frac{V^2}{2g} = WS + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1-103)$$

La elevación crítica es la elevación para el cual se produce una energía total mínima, esta elevación se determina mediante un proceso iterativo.

#### a. Método de la Parábola

Este método es sencillo y rápido, pero solamente puede calcular una sola energía mínima. El método de la parábola involucra la determinación de los valores de E, para tres valores de WS que están espaciadas a intervalos iguales de  $\Delta WS$ . Con los valores asumidos WS se procede a calcular los valores de E, definido por una parábola pasando a través de tres puntos en un plano de E versus WS, con estos tres puntos a partir de la ecuación de la parábola se procede a calcular el vértice que nos dará un valor mínimo de E, este punto es usado como base de las siguientes suposiciones de un valor para WS. Este proceso acaba cuando la precisión establecida es satisfecha, como 0.003 m. por ejemplo como lo hace el HEC-RAS.

#### b. Método de la Secante

El tirante crítico sucede cuando la energía específica es mínima, y se cumple cuando el número de Froude  $F=1$ , como se sabe que el número de Froude tiene la siguiente relación:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD/\alpha}} = 1 \rightarrow \frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} \quad (1-104)$$

Donde:

$D$  = Profundidad crítica, (m).

$A_c$  = Área para el tirante crítico  $Y_c$ , (m<sup>2</sup>).

$T_c$  = Ancho superficial para el tirante crítico  $Y_c$ , (m).

$g$  = Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\alpha$  = Coeficiente de energía.

Una vez calculada el número de Froude para una sección dada, se sabe el tipo de flujo en esa zona luego, se procede a calcular el tirante crítico mediante un proceso iterativo como el calculado para la superficie de agua y se usa el Método de la Secante hasta satisfacer la relación (1.103).

Este segundo método realiza la búsqueda de profundidad crítica múltiple y es capaz de hallar de tres mínimos en la curva de energía.

La Búsqueda de Profundidad Crítica Múltiple rutinario toma mucho tiempo de cómputo. Este método sólo debe usarse cuando se cree que el programa está encontrando una respuesta incorrecta para la profundidad crítica.

#### a. Método de la ecuación de Momentum

Este método es aplicable a problemas específicos como: ocurrencias de resaltos hidráulicos, hidráulica de flujos bajos en puentes, confluencia de corrientes además incluyen cambios significativos en la pendiente del canal y constricciones de puentes.

Es aplicable cuando hay transiciones de flujo subcrítico a supercrítico o viceversa, cambios rápidos.

De acuerdo a la segunda ley de Newton, el cambio de momentum por unidad de tiempo en el cuerpo de agua en un canal es igual a la resultante de todas las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo. Al aplicar este principio a un canal entre las secciones 1 y 2 se tiene:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (1-105)$$

Donde:

$P_{1,2}$  = Fuerza de presión hidrostática en la localización 1 y 2.

$W_x$  = Fuerza debido al peso del agua en la dirección X.

$F_f$  = Fuerza debido a la pérdida por fricción externa de 2 a 1

$Q$  = Caudal

$\rho$  = Densidad del agua

$\Delta V_x$  = Cambio de velocidad media de 2 a 1, en la dirección X.

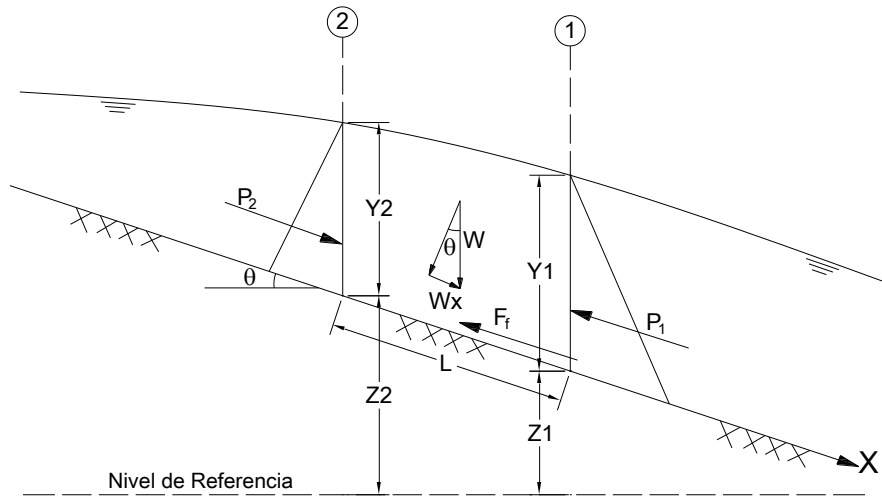


Figura 1.20 Aplicación del principio de momentum

### Fuerzas de presión hidrostática

Las fuerzas de presión hidrostática en la dirección X es:

$$P = \gamma A \bar{Y} \cos \theta \quad (1-106)$$

Se supone esta distribución de presión hidrostática es válida para pendientes menores a 1:10 (aproximadamente 6 grados). Entonces  $\cos \theta \approx 1$ , luego:

$$P_1 = \gamma A_1 \bar{Y}_1 \quad (1-107)$$

$$P_2 = \gamma A_2 \bar{Y}_2 \quad (1-108)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso unitario del agua

$A_{1,2}$  = Área mojada de la sección en la localización 1 y 2

$\bar{Y}_{1,2}$  = Profundidad de agua medida desde la superficie del agua al centroide del área de la sección en la localización 1 y 2.

### Fuerza debido al peso del agua

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

$$W = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \quad (1-109)$$

$$W_x = W \sin \theta \quad (1-110)$$

$$\sin \theta = \frac{z_1 - z_2}{L} = S_o \quad (1-111)$$

$$W_x = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_o \quad (1-112)$$

Donde:

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

$S_o$  = Pendiente del fondo del canal

$z_{1,2}$  = Elevación media del lecho del canal en la localización 1 y 2

#### **Fuerza de fricción externa**

$$F_f = \tau \bar{P} L \quad (1-113)$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante

$\bar{P}$  = Promedio del perímetro mojado entre las secciones 1 y 2

$$\tau = \gamma \bar{R} \bar{S}_f \quad (1-114)$$

Donde:

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

$\bar{S}_f$  = Pendiente de la línea gradiente de energía (pendiente de fricción)

$$F_f = \gamma \frac{\bar{A}}{\bar{P}} \bar{S}_f \bar{P} L \quad (1-115)$$

$$F_f = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \bar{S}_f L \quad (1-116)$$

#### **Masa por la aceleración**

$$ma = Q \rho \Delta V_x \quad (1-117)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ y } \Delta V = (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (1-118)$$

$$m a = \frac{Q \gamma}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (1-119)$$

Donde:

$\beta$  = Coeficiente de *momentum* que ocurre para una variación en distribución de velocidad en canales irregulares.

Sustituyendo las relaciones anteriores en la ecuación (1.104) y suponiendo que Q puede variar de 2 a 1.

$$\gamma A_2 \bar{Y}_2 - \gamma A_1 \bar{Y}_1 + \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1 \gamma \beta_1 V_1}{g} - \frac{Q_2 \gamma \beta_2 V_2}{g} \quad (1-120)$$

$$\frac{Q_2 \beta_2 V_2}{g} + A_2 \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1 V_1}{g} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (1-121)$$

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{g} \right) L S_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{g} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (1-122)$$

### Formulación general por el método de balance de Momentum

La ecuación general del balance de momentum entre las secciones 1 y 2 (Figura 1.14) es:

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{g} \right) L S_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{g} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (1-123)$$

### Los elementos de pérdida de energía:

El coeficiente de Momentum obtenido mediante:

$$\beta = \frac{A_T^2 \left( \frac{K_1^2}{A_1^2} + \dots + \frac{K_n^2}{A_n^2} \right)}{K_T^2}, \quad \beta = \frac{A_T}{K_T^2} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^2}{A_i^2} \quad (1-124)$$

La profundidad media para sección 1 y 2 es obtenido mediante la relación:

$$\bar{Y}_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1-125)$$

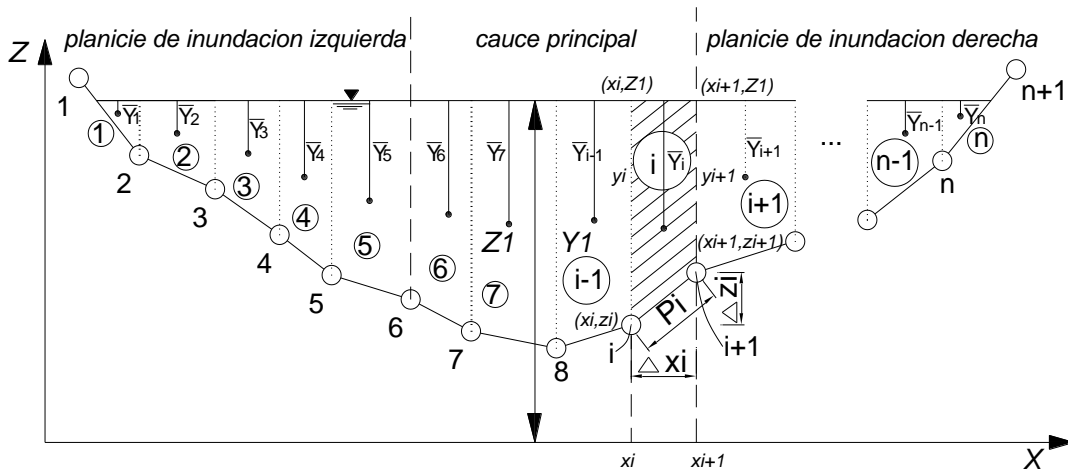


Figura 1.21: Subdivisión por franjas de una sección transversal típica (principio de momentum)

Los demás elementos son calculados igualmente al del método de conservación de energía.

Entonces la forma general del balance de momentum es:

$$\frac{1}{g} \left( \frac{A_{T2}}{K_{T2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^2}{A_i} \right)_2 \left( \frac{Q_2^2}{\sum_{i=1}^n A_i} \right)_2 + \sum_{i=1}^n (A_i \bar{Y}_i)_2 + \frac{1}{2} \left[ \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)_1 + \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)_2 \right] \times \left\{ (z_2 - z_1) - L \times \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n K_i} \right)_1^2 \right\} =$$

$$\frac{1}{g} \left( \frac{A_{T2}}{K_{T2}^2} \sum_{i=1}^n \frac{K_i^2}{A_i} \right)_1 \left( \frac{Q_1^2}{\sum_{i=1}^n A_i} \right)_1 + \sum_{i=1}^n (A_i \bar{Y}_i)_1 \sum_{i=1}^n (A_i \bar{Y}_i)_1 \quad (1-126)$$

Donde cada uno de los elementos fueron descritos anteriormente al igual que el área como el perímetro mojado.

La Profundidad de agua medida desde la superficie del agua al centroide del área de la sección en la localización cualquiera se calcula así:

a) En una franja cualquiera  $i$  de la sección 1 por ejemplo:

$$\bar{Y}_i = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{3} \left( \frac{2(Z_1 - z_i) + (Z_1 - z_{i+1})}{(Z_1 - z_i) + (Z_1 - z_{i+1})} \right) \quad (1-127)$$

b) En los extremos:

$$\bar{Y}_1 = \frac{(Z - z_2)}{3} \quad (1-128)$$

$$\bar{Y}_n = \frac{(Z - z_n)}{3} \quad (1-129)$$

### 1.3.10 Cálculos a régimen de flujo mixto

La ecuación de Fuerza Específica se usa para determinar qué régimen de flujo se está controlando, así como la localización de algunos saltos hidráulicos. La ecuación para la fuerza específica es derivada de la ecuación de momentum (ecuación 1.123). Cuando se aplica la ecuación de momentum a un tramo muy corto del río, la fuerza externa de fricción y la fuerza debido al peso del agua son muy pequeños, y pueden ser no considerados. Entonces la ecuación de momentum se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{Q^2 \beta_1}{gA} + A_1 \bar{Y}_1 = \frac{Q^2 \beta_2}{gA_2} + A_2 \bar{Y}_2 \quad (1-130)$$

Donde:

$Q$  = Caudal en cada sección, (m<sup>3</sup>/s).

$\beta$  = Coeficiente de momentum.

$A$  = Área del flujo total, (m<sup>2</sup>).

$\bar{Y}$  = Profundidad desde la superficie del agua al centroide del área, m.

$g$  = Aceleración de la gravedad, (m/s<sup>2</sup>).

Como puede observarse los componentes de la ecuación son análogos, y puede expresarse en cualquier sección como una función general:

$$F = \frac{Q^2\beta}{gA} + A\bar{Y} \quad (1-131)$$

La función generalizada (ecuación 3.81) consiste de dos términos. El primer término es el momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo. Esta porción de la ecuación es considerada como el componente dinámico. El segundo término representa el momentum del componente estático, el cual es la fuerza externa por la presión hidrostática del agua. Ambos términos son esencialmente fuerza por unidad de peso del agua. La suma de los dos términos es denominada la Fuerza Específica.

Cuando la ecuación de la fuerza específica se aplica a canales naturales, esta es escrita de la siguiente manera:

$$F = \frac{Q^2\beta}{gA_m} + A_t\bar{Y} \quad (1-132)$$

Donde:

$A_m$  = Área del flujo en el cual hay movimiento, (m<sup>2</sup>).

$A_t$  = Área total del flujo, incluido áreas de flujos inefectivos, (m<sup>2</sup>).

Los cálculos a régimen de flujo mixto se desarrollan como sigue:

1. Primero, el perfil de superficie de agua subcrítico es calculado iniciando desde condiciones de borde aguas abajo conocido. Durante los cálculos subcríticos, todas las localizaciones donde existe una profundidad crítica son enlazados para un análisis adicional.
2. Luego iniciar los cálculos de perfil supercrítico iniciando con el uso de las condiciones de borde especificadas aguas arriba. Si la condición de borde es supercrítico, el programa verifica si este tiene una fuerza específica mayor que los cálculos previos para una superficie de agua subcrítico en esta localización. Si la condición de borde supercrítico tiene una fuerza específica mayor, entonces este es asumido como una sección de control, y se procede a iniciar calculando un perfil supercrítico desde esta sección. Si la respuesta subcrítica tiene una fuerza específica mayor, entonces inicia buscando aguas abajo con el fin de encontrar una localización donde exista una profundidad crítica. Cuando la profundidad crítica es localiza, se usa como una condición de borde para iniciar los cálculos de perfil supercrítico.
3. Se procede con los cálculos de perfil supercrítico en la dirección aguas abajo hasta alcanzar una sección que tenga ambas respuestas válidas; supercrítico y subcrítico. Cuando esto

ocurre se calcula la fuerza específica de ambas elevaciones de superficie de agua. Cualquiera que tenga como respuesta una fuerza específica mayor es considerada como la solución correcta. Si la respuesta supercrítica tiene una fuerza específica mayor, se continúa con los cálculos supercríticos en dirección aguas abajo comparando la fuerza específicos en dirección aguas abajo comparando la fuerza específica de las dos soluciones. Cuando se alcanza una sección cuya respuesta subcrítica tiene una fuerza específica mayor que la respuesta supercrítica, entonces existe un salto hidráulico entre esa sección y la sección previa.

4. Así sucesivamente se procede con los cálculos pasando a la sección siguiente.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo en el HEC-RAS del perfil de flujo mixto.

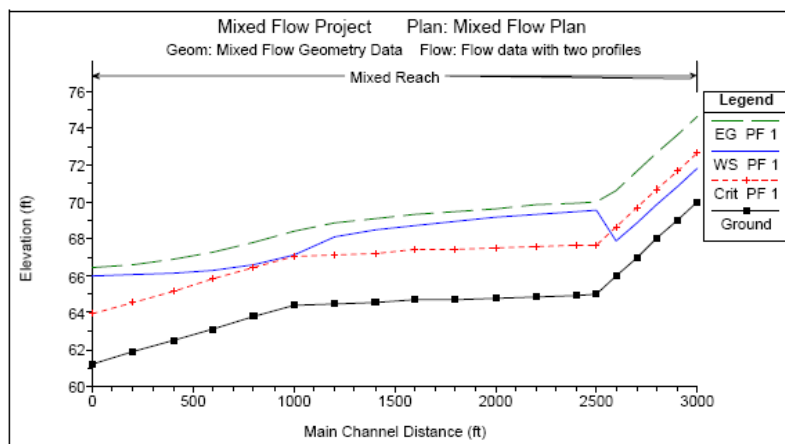


Figura 1.22: Ejemplo de perfil en el HEC-RAS a régimen de flujo mixto

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DEL ESTUDIO

#### 2.1.1 Ubicación política

La cuenca del presente trabajo tiene una extensión territorial de 1,425.42 km<sup>2</sup>, equivalente a 14,250,420 ha, que abarca seis distritos de tres provincias como son Sucre (Región Ayacucho), Andahuaylas y Aymaraes (Región Apurímac). Quedó determinado desde los 3200, hasta los 4800 msnm.

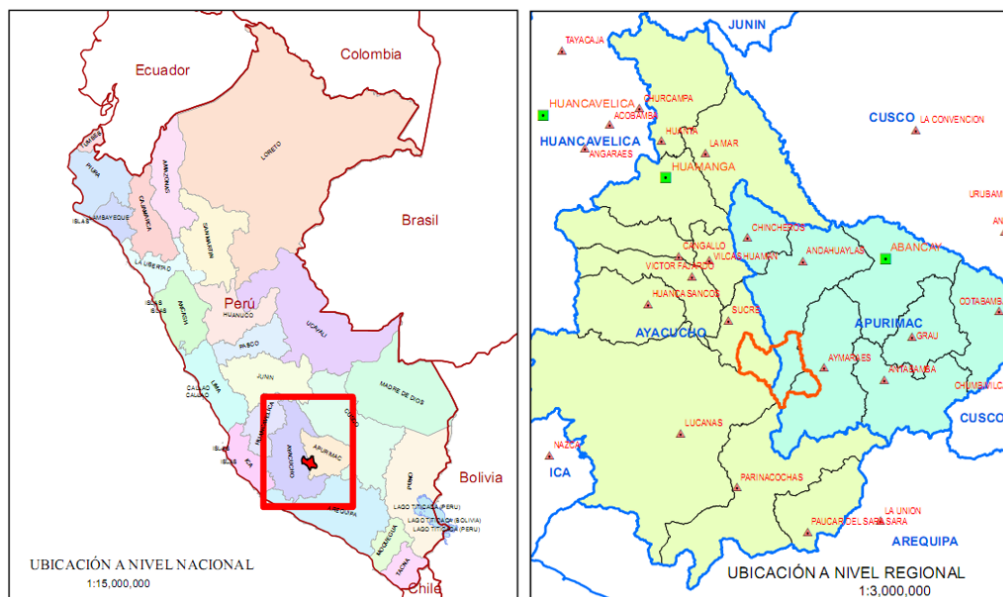


Figura 2.1: Ubicación política del área de la investigación a nivel nacional y regional

### 2.1.2 Ubicación geográfica

El río Chicha Soras nace desde las alturas del nevado Ccarhuarazo y las múltiples lagunas que están ubicados en las partes altas de las divisorias de aguas. Siendo estas un principal y fundamental aportante del caudal que discurre por el dicho río hasta unirse al río Cangallo para luego conformar el conocido río Pampas. En su trayectoria recibe innumerables tributarios, tanto del lado de la región Apurímac y Ayacucho. Siendo la confluencia del río Cangallo a una altitud de 2150 msnm, límite entre las provincias de Vilcashuaman, Sucre (región Ayacucho) y Andahuaylas (región Apurímac).

El punto de aforo establecido para el presente trabajo está ubicado en la unión de los ríos Chicha Soras y Larcay, en el límite entre los distritos de Pampachiri (Provincia de Andahuaylas) y San Pedro de Larcaay (Provincia de Sucre), con las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud Sur :  $14^{\circ} 10' 6''$  S

Longitud Oeste :  $73^{\circ} 33' 51''$  O

El ámbito del presente trabajo de investigación está comprendido entre los cuadrantes, con las siguientes coordenadas geográficas, Sistema de Datum WGS-84:

Vértice Inferior Izquierda:  $14^{\circ} 33' 10''$  S ;  $73^{\circ} 47' 55''$  O

Vértice Superior Derecha:  $14^{\circ} 4' 29''$  S ;  $73^{\circ} 15' 57''$  O

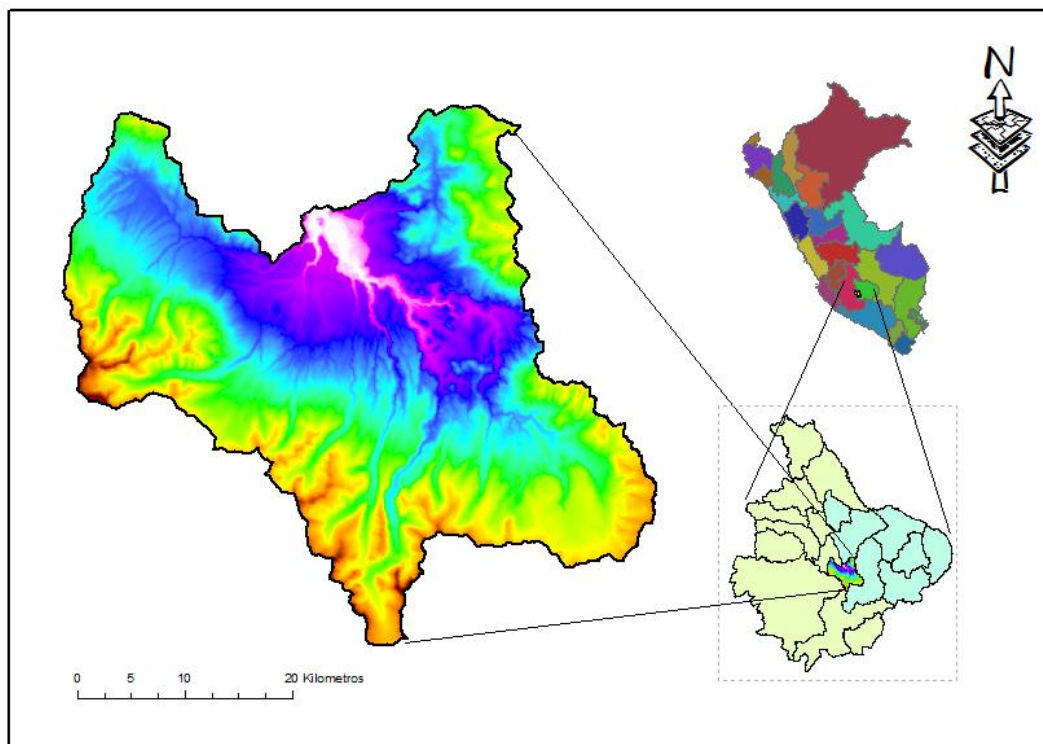


Figura 2.2: Ubicación geográfica de la cuenca del río Chicha

### 2.1.3 Clima y zonas de vida

El clima de la sub cuenca Chicha es variado, ya que tiene una variedad de pisos que varían desde el los 2000 msnm, que empieza desde las orillas de ríos Chicha Soras, con una temperatura de 17 a 24°C con una precipitación promedio anual de 250 a 700 mm, hasta una altitud de 4940 msnm.

De acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida propuesta por el Dr. Leslie R. Holdridge, según el estudios de Zonificación Económica y Ecológica ZEE realizado por el MINAGRI dentro del PLANGRACC-A, publicada en año 2012 se han identificado cuatro (04) formaciones ecológicas, cuya clasificación se presenta en el siguiente cuadro de clasificación de zonas de vida y figura denominado Mapa Ecológico donde se muestra su distribución en la cuenca del río Chicha Soras.

*Tabla 2.1: Clasificación de zonas de vida de la cuenca del rio Chicha Soras*

| N° | CÓDIGO | TIPO   | DESCRIPCIÓN                             | LAYER     | ZONAS         | ÁREA_km <sup>2</sup> |
|----|--------|--------|---|-----------|---------------|----------------------|
| 1  | 6      | bh - M | bosque húmedo Montano Subtropical       | bh - MS   | bosque húmedo | 714.551              |
| 2  | 8      | pmh -  | paramo muy húmedo Subalpino Subtropical | pmh - SaS | paramo        | 673.416              |
| 3  | 9      | tp - A | tundra pluvial Alpino Subtropical       | tp - AS   | tundra        | 33.936               |
| 4  | 1      | NS     | Nival Subtropical                       | NS        | nival         | 3.512                |
|    |        |        |   |           |               | <b>1425.415</b>      |

*Fuente: ZEE del PLANGRACC-A 2012-2021 del MINAGRI*

### 2.1.4 Suelos

Los suelos constituyen la capa superficial natural de la corteza terrestre de la sub cuenca, compuesta por elementos orgánicos e inorgánicos (minerales), aislados o mezclados en mayor o menor proporción.

El territorio de la sub cuenca es usado de diferentes formas, según los estudios de ZEE realizado por el MINAGRI dentro del PLANGRACC-A, publicada en año 2012 se han distinguido ocho grandes grupos de usos de tierras en toda la cuenca Chica que a continuación se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla 2.2: Clasificación de los suelos por su Capacidad de Uso Mayor en la cuenca Chicha Soras.

|   | <b>SÍMBOLO</b>       | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>PROPORCIÓN</b> | <b>Área km<sup>2</sup></b> |
|---|----------------------|--|-------------------|----------------------------|
| 1 | Lagunas              | Lagunas  |                   | 2.185                      |
| 2 | Nevados              | Nevados  |                   | 2.366                      |
| 3 | P2sc-Xse             | Pastos de calidad agrologica media - Protección  | 80-20             | 845.6                      |
| 4 | P3sec-Xse            | Pastos de calidad agrologica Baja - Protección   | 70-30             | 392.87                     |
| 5 | Xse-F3se*-A3sec      | Protección - Producción Forestal en Sierra - cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja                               | 70-20-10          | 1.17                       |
| 6 | Xse-P3se(t)-A3se(r*) | Protección - Pastos Temporales cultivo en Limpio, ambas de calidad agrologica Baja, los cultivos requieren riego suplementario | 75-15-10          | 2.699                      |
| 7 | Xse-P3sec            | Protección - Pastos de calidad agrologica Baja   | 80-20             | 49.249                     |
| 8 | Xse(g)               | Protección, en laderas de montaña glaciario  | 100               | 129.277                    |
|   |                      |  |                   | <b>1425.42</b>             |

Fuente: ZEE del PLANGRACC-A 2012-2021 del MINAGRI



Figura 2.3 Praderas con problemas de sobrepastoreo en el distrito de Larcay

### 2.1.5 Cobertura vegetal

En la cuenca Chicha de acuerdo a los estudios de ZEE realizado por el MINAGRI dentro del PLANGRACC-A, publicada en año 2012, se han identificado ocho (08) unidades de cobertura vegetal, las mismas que se extienden desde los 2000 hasta los 4950 msnm, conformando una unidad geográfica con una tipificación climática variada, que a lo largo de su recorrido evidencia diversas formaciones vegetales, las mismas que van desde pastizales y bosques de especies nativas alto andinos, presentando en las vertientes moderadamente escarpadas, matorrales arbustivos de variado tamaño. En la zona meso andino con áreas de intensa actividad agrícola, a medida que se desciende en la zona inferior andina, las asociaciones con especies herbáceas y arbustivas, el matorral se densifica alcanzando un estado

de arbolado y de bosque seco, así como espinoso a medida que se desciende a las zonas más cálidas, en el siguiente cuadro se presenta los diferentes unidades de cobertura vegetal de la cuenca Chicha.

*Tabla 2.3: Descripción de las unidades de cobertura vegetal*

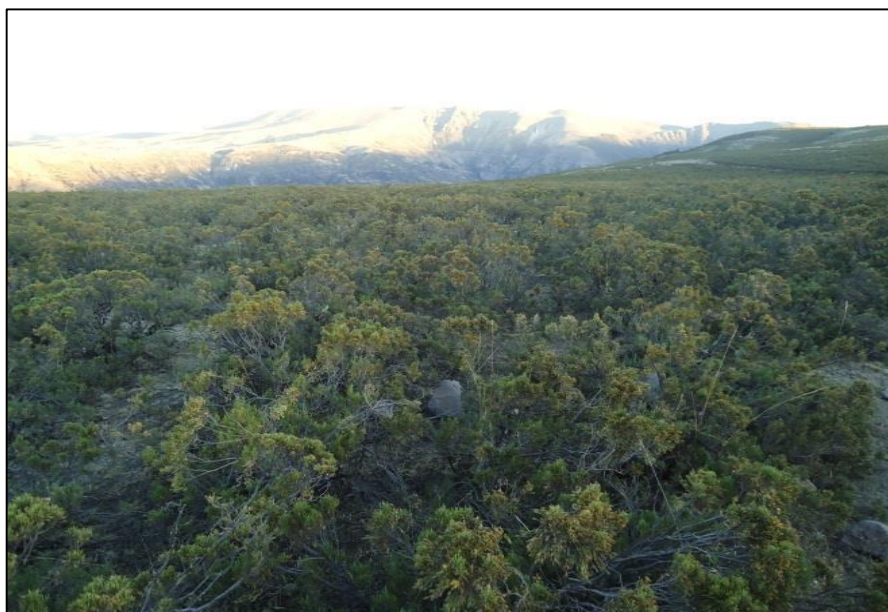
| n° | SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN  | Área km <sup>2</sup> | %              |
|----|---------|--|----------------------|----------------|
| 1  | Bo      | Bofedal  | 85.568               | 6.00%          |
| 2  | Ht      | Herbazal de tundra                                 | 46.976               | 3.30%          |
| 3  | Lag     | Lagunas  | 2.175                | 0.15%          |
| 4  | Ma/Cuap | Matorrales/Cultivos agropecuarios                  | 23.725               | 1.66%          |
| 5  | Nv      | Nevados  | 2.444                | 0.17%          |
| 6  | Pj/Cp   | Pajonal/Césped de puna                             | 1090.286             | 76.49%         |
| 7  | Al E/Sv | Tierras altoandinas con vegetación escasa y sin ve | 56.876               | 3.99%          |
| 8  | Al Sv   | Tierras altoandinas sin vegetación                 | 117.365              | 8.23%          |
|    |         |  | <b>1425.42</b>       | <b>100.00%</b> |

*Fuente: ZEE del PLANGRACC-A 2012-2021 del MINAGRI*

De las 17 unidades de cobertura vegetal existentes en la región 8 unidades se han identificado en la cuenca Chicha.



*Figura 2.4: Pastizales en zonas altas de la cuenca Chicha*



*Figura 2.5: Bosque de matorral arbolado en las planicies alto andinas de la cuenca Chicha*



*Figura 2.6: Plantaciones exóticas, bosque de eucaliptos en la margen derecha de la cuenca río Chicha*

### **2.1.6 Vías de comunicación**

El acceso a la zona del presente trabajo de investigación desde la capital de la Provincia de Sucre que es el distrito de Querobamba de la región Ayacucho, es a través de la carretera afirmada Querobamba – Hatun Soras – San Pedro de Larcay – Baños Termales Larcay. Un tiempo aproximado de 2 h. 30 min.

Mientras desde la ciudad de Andahuaylas, es siguiendo la carretera pavimentada Andahuaylas – Huancabamba, siguiendo una carretera afirmada Huancabamba – Pampachiri – Larcay – Baños Termales de Larcay. Un tiempo aproximado de 3 h. 30 min.

## **2.2 MATERIALES Y EQUIPOS**

### **2.2.1 Materiales**

Los materiales utilizados para la realización del presente trabajo son:

- Registros de datos de precipitación (Precipitaciones máximas en 24 horas)
- Carta nacional digitalizada (en escala de 1/100,000).
- Raster tipo \*.MED de Celdas (30 x30)

### **2.2.2 Equipos**

- Estación total SOKIA 3200
- GPS GARMIN MONTANA 650 portátil.
- Computadora personal
- Impresora / Ploter

### **2.2.3 Software**

- Software ArcGIS 10.x
- Software HEC-GeoHMS
- Software HEC-GeoRAS
- Software HEC-HMS versión 4.0
- Software HEC-RAS 4.1
- Software AutoCAD Civil 3d 2014.
- Software Global Mapper V 17.0
- Software Hidroesta v 2.0
- Ofimática V 2013

## 2.3 MÉTODOS

El desarrollo secuencial de la metodología que se desarrolló durante la presente investigación, se muestra en el flujograma de la figura 2.7:

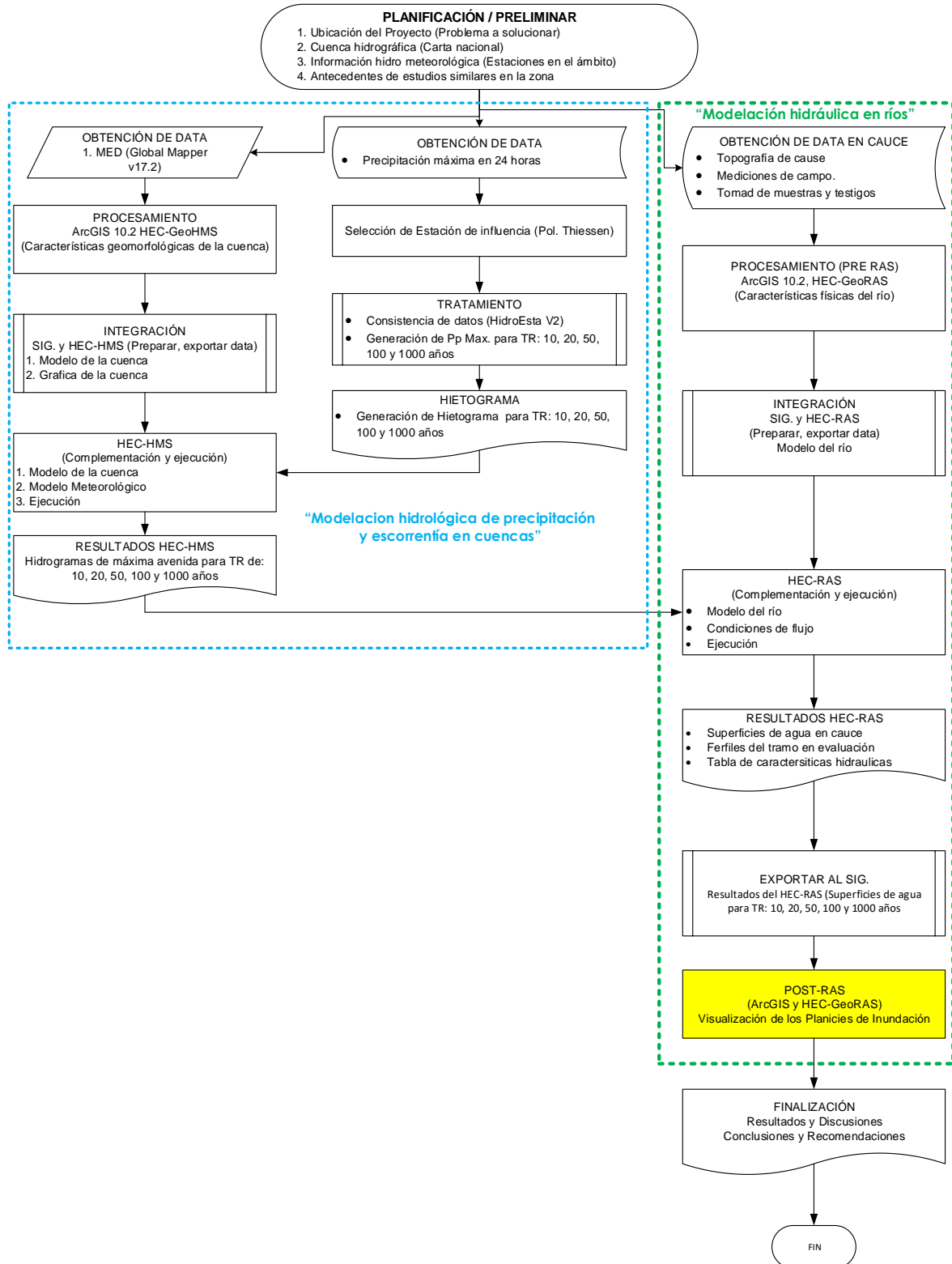


Figura 2.7: Flujograma metodológico de la presente investigación

### **2.3.1 Fase preliminar**

Para realizar el presente trabajo se tuvo una partida, bajo la iniciativa de la Municipalidad Distrital de San Pedro de Larcay, con la finalidad de establecer una defensa ribereña del tramo baños termales de Larcay; con la formulación del PIP, a nivel de Perfil Técnico, el cual requiere un estudio hidrológico e hidráulico detallado a fin de plantear una alternativa de solución a los desbordamiento del río Chicha Soras, que perjudica áreas agrícolas y la infraestructura turística, como son los baños termales de Larcay.

Eligiendo tramo de interés, se ubicó el punto de aforo, en la unión de los ríos Chicha Soras y Larcay con el cual se realizó un planeamiento preliminar en carta nacional de 1/100,000 y el Google Earth, siendo una previa para realizar los trabajos de campo que se dividen en dos partes fundamentales como es la Cuenca (Hidrología de cuencas) y el tramo del río para el análisis de planicies de inundación (Hidráulica de ríos). Elaborando un mapa con la identificación de centros urbanos, vías de acceso, lagunas, quebradas principales, entre otros que ayuden a realizar los trabajos en campo.

Además, se ubicaron las estaciones hidrometeorológicas, contiguos a la zona y la disponibilidad de información, tales como las precipitaciones máximas en 24 horas requeridos para la presente investigación.

### **2.3.2 Fase de campo**

A nivel de la cuenca, se tuvo que realizar una exploración visual, apoyado en la carta nacional, imágenes satelitales proveídos por el Google Earth, con la finalidad de comprobar la ubicación de los centros urbanos, lagunas y un análisis de la fisiografía de la cuenca de acuerdo a la información preliminar.

Tomando puntos de control con la ayuda de un GPS, a fin de contrastar y tener mayores juicios durante los trabajos a nivel de gabinete.



*Figura 2.8: Toma de puntos de control con un GPS para clasificación de suelos*



*Figura 2.9: Referenciación del cauce tributario del río Chicha*

En el tramo de evaluación de las planicies de inundación, se tuvo que realizar una exploración, para posteriormente ubicar el punto de aforo, complementado el trabajo de campo con el trabajo de levantamiento topográfico del cauce, riberas, planicies de posible inundación, infraestructura productiva, turística.

Además, se tomó mediciones de referenciación en ciertos puntos de control de las secciones del río, con la finalidad de verificar con los resultados en gabinete.

Todos los trabajos fueron referenciados con GPS., la misma que posee buenos resultados en la ubicación.



*Figura 2.10: Análisis y planificación de los trabajos del tramo baños termales de Larcay*



*Figura 2.11: Coordinación del levantamiento topográfico, apoyado en los trabajos de la fase preliminar*



*Figura 2.12: levantamiento topográfico del cauce, riberas y planicies de posible inundación de tramo baños termales de Larcay.*

### **2.3.3 Fase de gabinete “Modelación hidrológica de precipitación y esorrentía en cuencas”**

La extensión HEC-GeoHMS 10.2 para ArcGIS 10.2 contiene un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales el cual es utilizado de manera satisfactoria por ingenieros e hidrólogos para la elaboración de estudios hidrológicos. Ésta extensión permite visualizar información espacial, obtener características de la cuenca, hacer análisis espaciales, delimitar cuencas y ríos, construir entradas para modelos hidrológicos y ayudar a formular informes.

Con HEC-GeoHMS se procesan datos de una cuenca en estudio después de haber realizado la preparación y compilación inicial de los datos de terreno. La preparación de datos del Sistema de Información Geográfica (SIG) se realiza con softwares estándar de SIG, dos de los que se utilizan comúnmente son ArcView y ArcGIS. Es importante mencionar que HEC-GeoHMS 10.2 no es una herramienta para preparación de datos SIG, si no que mediante Modelos de Elevación Digital.

Para la obtención de parámetros hidrológicos se deben de considerar una serie de requerimientos de programas de cómputo e insumos informáticos. Los programas y extensiones que se utilizan en este estudio son las que se enlistan a continuación, sin embargo, para la obtención de parámetros hidrológicos pueden utilizarse otros programas o versiones, así como otras extensiones.

- ArcGIS 10.x

- Spatial Analyst
- Xtools Pro 7 para Arc Gis
- HEC-GeoHMS 10.2
- Modelos de Elevación Digital (MED)

Los tres primeros son programas comerciales y tienen un costo, en cambio los siguientes son de libre distribución. Por ejemplo, el programa HEC-GeoHMS se adquiere de manera gratuita de la página <http://www.hec.usace.army.mil/software/HEC-GeoHMS/> para la versión de ArcGIS 10.2 por otro lado los Modelos Digitales de Elevación (MED) se obtienen de manera gratuita a través de la página de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (NASA) a escala 1:50 000, sin embargo, en caso de los MED se requieran una escala menor, estos también se pueden obtener del NASA pero con un determinado costo.

### **2.3.3.1 Modelos de Elevación Digital (MED)**

El Modelo Digital de Elevación (MED) es un arreglo ordenado de números que representan una distribución espacial de las elevaciones, estos se encuentran en formato ráster, por lo que los términos de malla y ráster se utilizan de manera indistinta.

Los MED son las estructuras de datos más empleadas ya que cuentan con la facilidad de implementar algoritmos de cálculo. Las desventajas que presentan los MED, por ejemplo, no manejan fácilmente cambios abruptos de elevación, el tamaño de la malla o celda tiene afectación en los resultados obtenidos y en la eficiencia computacional, los tramos que presentan pendientes pronunciadas tienden a formar corrientes en zigzag las cuales no corresponde a la realidad y por último la configuración de corrientes y delimitación de cuencas puede ser imprecisa en zonas planas.

La información correspondiente a los Modelos Digitales de Elevación (MED) se descarga de la página de USGS, en el link: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>. Corresponde a la sección de Continuo de Elevaciones del globo terráqueo, estos modelos se basan en la cartografía topográfica escala 1:25 000 producida por la NASA (Figura 2.13).

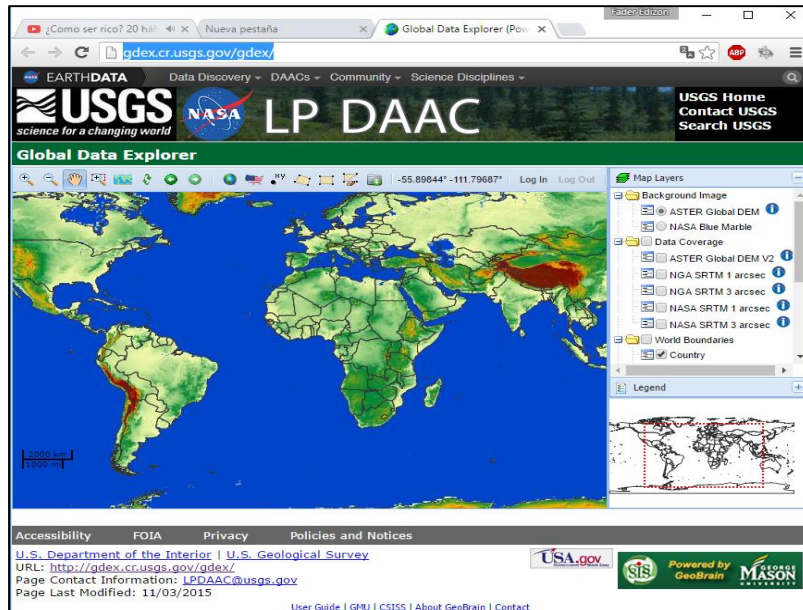



Figura 2.13: Portal web, para descargar los MED

Otro de los procedimientos para obtener MED, es utilizando el software licenciado Global Mapper versión 17.0, en donde se genera un solo Modelo Digital de Elevación a partir de varios MED. Incluso en este trabajo se hará la unión y cambio de coordenadas de los MED mediante el uso del programa Global Mapper 17.0. El procedimiento es el siguiente:

Ejecutar Global Mapper , seleccionar **Open Your Own Data Files** o **Download Free Maps/Imagery from Online Sources**, y abrir los archivos con formato \*.bil o las carpetas comprimidas que conforman el MED, o acceder a los servidores online, ubicando el área correspondiente a la cuenca en estudio (ver Figura 2.14), presionar yes to all.

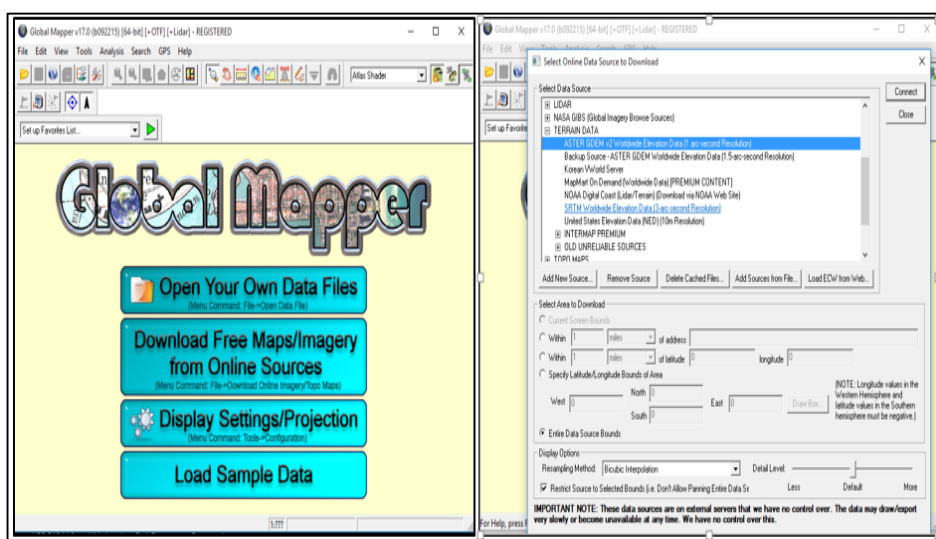



Figura 2.14 Global Mapper. a) Vista inicial, b) Archivos o carpetas que conforman el MED

La información descargada se encuentra en un sistema de coordenadas geográficas (Grados Minutos y Segundos), por lo que es necesario hacer la proyección a un sistema de coordenadas UTM con Datum WGS-84, con la herramienta  , seleccionar la pestaña *Projection* y cambiar el sistema de coordenadas a UTM, aceptar (ver Figura 2.14). Esta proyección a coordenadas UTM del MED se observa en la Figura 2.15

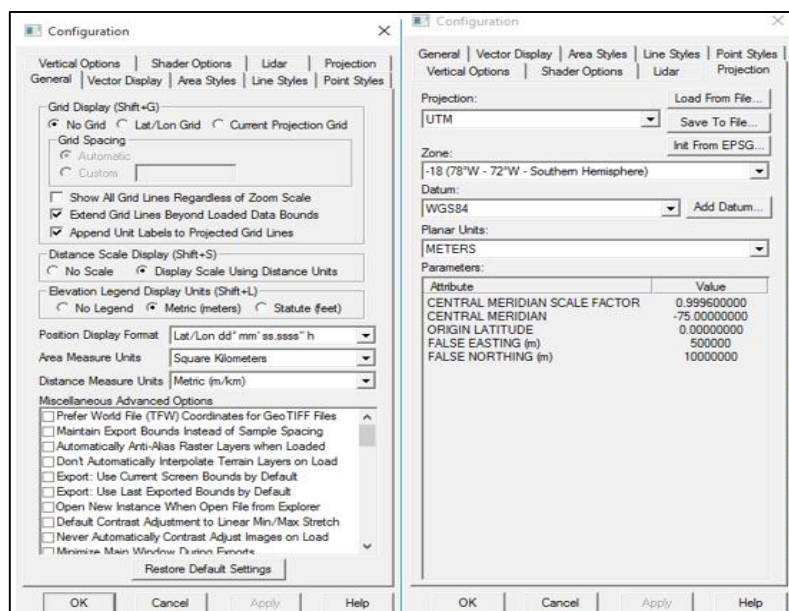


Figura 2.15 Cambio de coordenadas geográficas a UTM

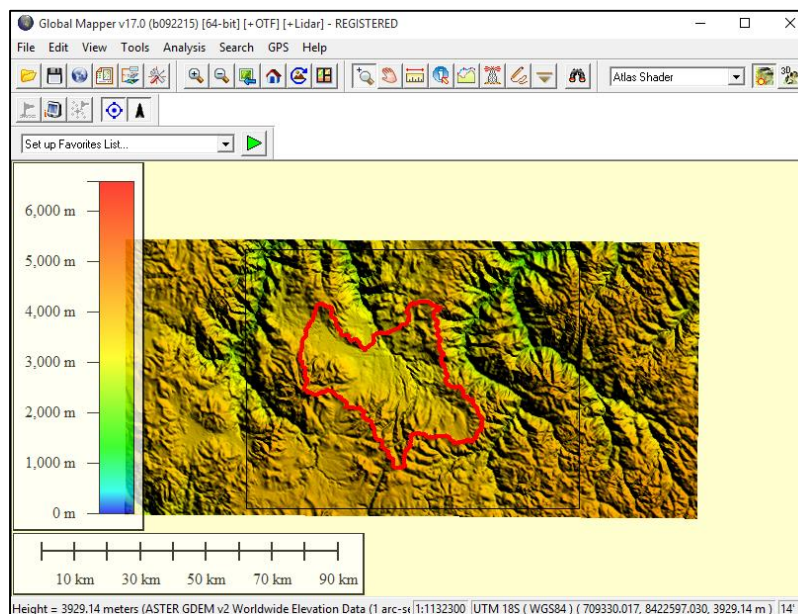


Figura 2.16: Modelo digital de elevación (MED)

Finalmente, se exporta la información a la plataforma de ArcGIS 10.2 El procedimiento es: **File** → **File Export Raster and Elevation Data** → **Export MED**, con ello aparecerá la imagen mostrada en la Figura 2.17 en ella se selecciona **Export Bounds** → **Global Projection** (UTM –

meters) y aceptar. El programa hará el proceso necesario, el cual tardará algunos minutos dependiendo del equipo de cómputo que se disponga.

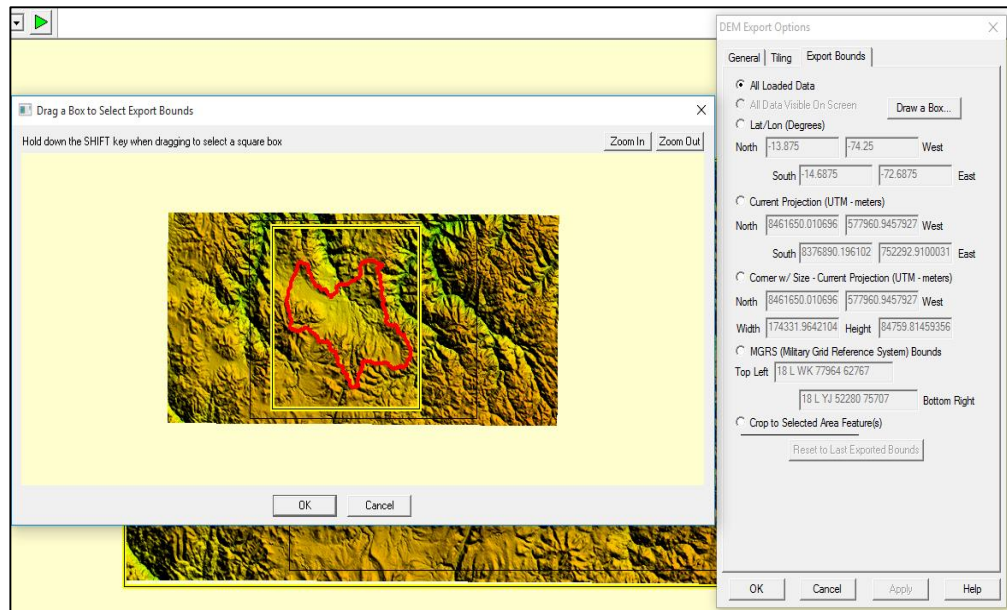


Figura 2.17: Exportar MED

A partir del paso anterior, en adelante, se hará uso del programa ArcGIS 10.2 (ArcMap 10.2) en el cual se trabajará para obtener los parámetros hidrológicos ayudados de las extensiones ArcHydro Tools 9 y HEC-GeoHMS 10.2.

### 2.3.3.2 Pre procesamiento del MED utilizando el HEC-GeoHMS

En éste trabajo de tesis se realizó el pre-proceso del terreno con el MED correspondiente a la zona de estudio y con la herramienta ArcHydro Tools 9 y el Modelo Digital de Terreno descargado del servidor de la NASA, esc. 1:50,000. El pre-proceso involucra ejecutar las siguientes acciones:

#### Fill Sinks (Corrección De Celdas)

Este es el primer paso a seguir, en la etapa de pre-procesamiento del terreno en el que se crea un MED sin depresiones, es decir, son rellenadas las zonas donde existen depresiones (Figura 2.18), aumentando la cota de las celdas que están rodeadas por una cota más alta y asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. Así de esta manera el agua podrá fluir de una celda a otra sin “estancarse” (Figura 2.18).

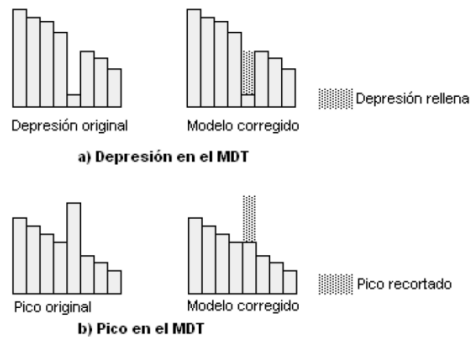


Figura 2.18: Proceso de llenado de vacíos en raster

Para rellenar las depresiones es necesario realizar lo siguiente:

De la barra de HEC-GeoHMS, **Processing** → **Fill Sinks**

Agregar el MED sin rellenar (original), en este caso es **DEM2utm** Ok, la salida será **"Fil"**

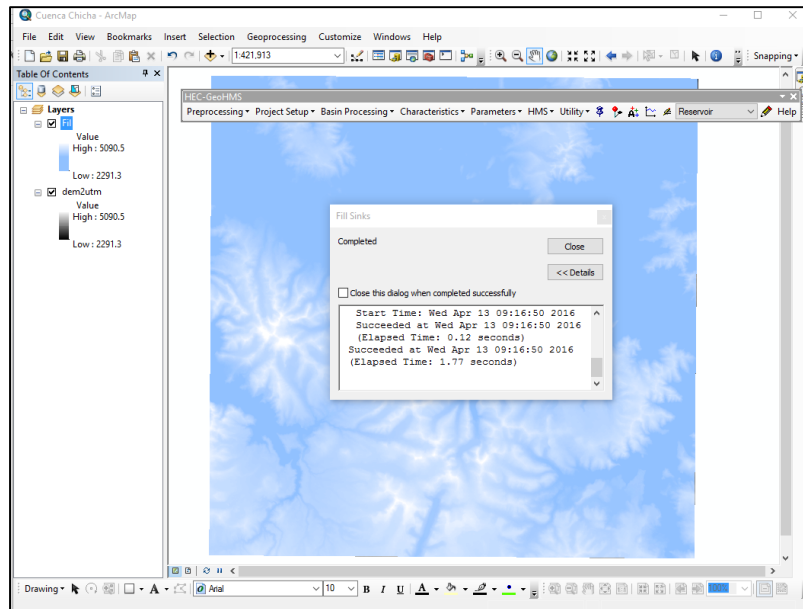


Figura 2.19: Zonas planas y depresiones en los MED

### 2.3.3.3 Procesamiento del MED utilizando el HEC-GeoHMS

#### a). Flow Direction (Dirección Del Flujo)

Se define la dirección de la mayor pendiente, evaluando en cada celda la cota de las celdas circundantes a cada una de ellas. Esta herramienta considera como datos de entrada el MED corregido, es decir, sin depresiones mostrando como dato de salida un archivo ráster mostrando la dirección de flujo en cada celda. Para ello existen ocho posibles direcciones para una celda cualquiera relacionadas con ocho celdas adyacentes en las que el escurrimiento puede viajar hacia la parte más baja de la cuenca.

En un MED el terreno se representa por celdas y su extensión depende de la precisión que se maneje. En este caso el MED proporcionado por NASA presenta celdas de 1 arcosegundo por lado, aproximadamente 30 m y el valor de cada celda representa la elevación promedio de ella. La distancia es calculada de centro a centro de las celdas. Por ejemplo, si el tamaño de la celda es de 1, la distancia entre dos celdas ortogonales es 1 y para dos celdas diagonales es  $\sqrt{1^2 + 1^2} = 1.4142$ . Cuando la dirección del máximo descenso es encontrada, la salida de la celda es codificada con el valor que representa esa dirección ver *Figura 2.20*

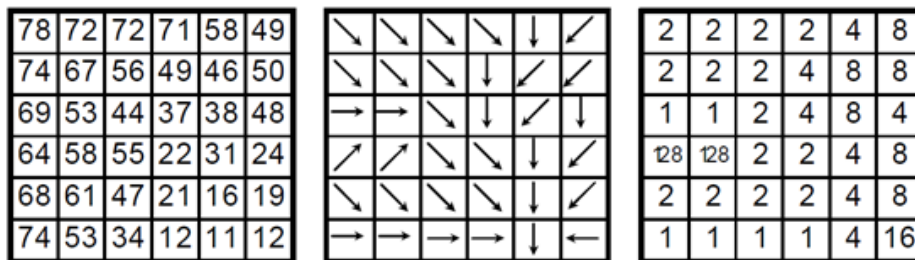


Figura 2.20: Interpretación de la dirección de flujo

Si los valores de todas las celdas vecinas son mayores que el de la celda procesada, está es una depresión (sink), y la dirección de flujo no está definida, por lo que estas celdas deben rellenarse.

El resultado de *Flow Direction* se muestra en la Figura 2.21 y se procede de la siguiente forma:

En HEC-GeoHMS Tools *Processing* → *Flow Direccion* Confirmar que la entrada sea *“Fil”* La salida será *“Fdr”* Ok

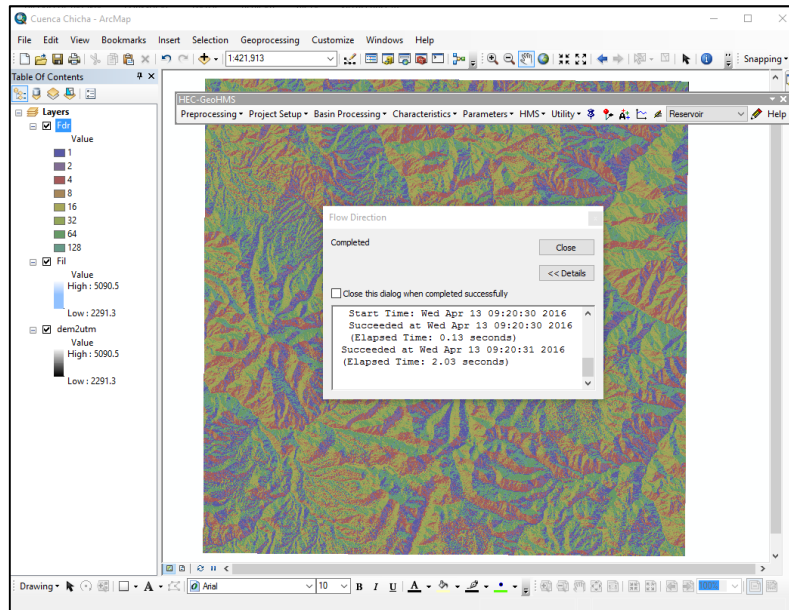


Figura 2.21: Procesamiento de dirección de flujo

### Flow accumulation (Acumulación del flujo)

Determina el número de celdas que drenan a cada celda, El área de drenaje de una celda dada se calcula multiplicando el número de celdas por el área de cada celda. La corriente principal se compone por la ruta que contiene el mayor número de celdas que contribuyen a ella, es decir, esta opción calcula el flujo acumulado como el total acumulado de las celdas que contribuyen hacia las celdas encontradas aguas abajo (Figura 2.22).

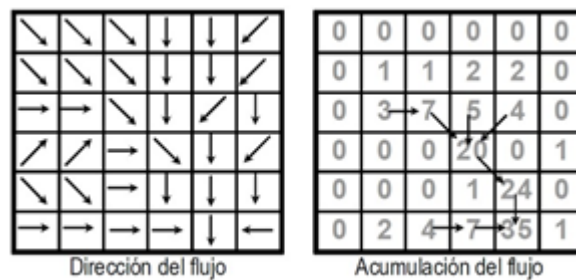


Figura 2.22: Interpretación de la acumulación de flujo

Con esta opción las celdas con grandes acumulaciones de flujo corresponden a áreas de concentración del flujo dando origen a corrientes y cursos de agua, mientras que las celdas que no acumulan flujo corresponden a elevaciones topográficas locales utilizadas para identificar el parteaguas el resultado de este proceso se presenta en la Figura 2.23

En HEC-GeoHMS Tools **Processing** → **Flow Accumulation**, Confirmar la entrada **“Fdr”** La salida será **“Fac”** OK

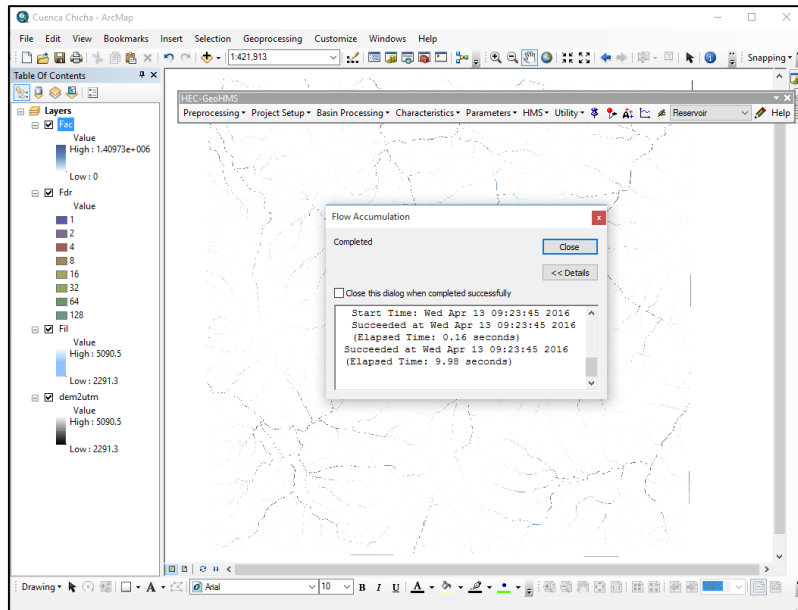


Figura 2.23: Procesamiento de acumulación de flujo.

### Stream Definition (Delineación de cuencas y corrientes)

Determina las corrientes de las celdas cuyo flujo acumulado o su equivalente en área exceden del umbral seleccionado, de este modo las celdas con menor aporte no se toman en cuenta. De lo contrario se obtendrían una infinidad de subcuencas con parteaguas casi rectos. En este paso se aceptan los valores por default o menores a estos, el tener valores de menores a los que existen por default implica que se tendrá un mayor número de subcuencas y corrientes. El resultado se muestra en la Figura 2.24

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona *Processing* → *Stream Definition* Confirmar la entrada “*Fac*” La salida será “*Str*” OK

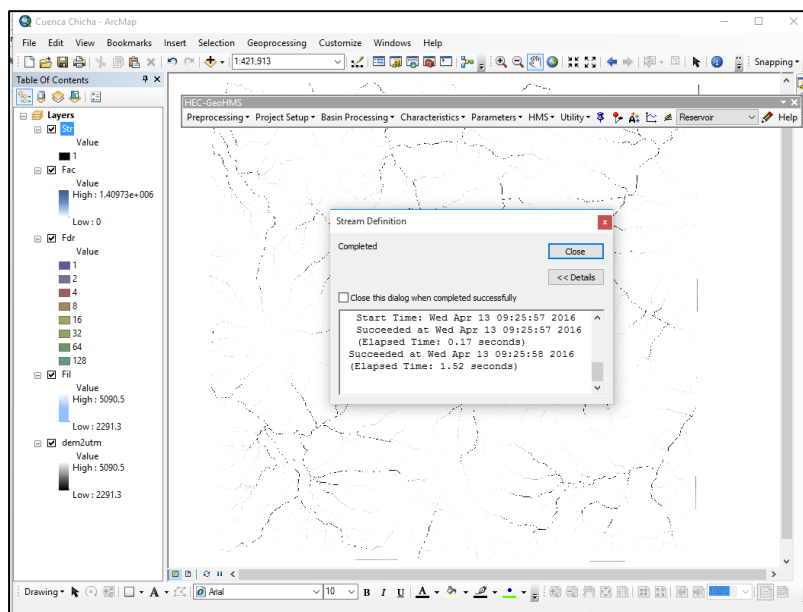


Figura 2.24: Procesamiento de la delineación de cuencas y ríos

### Stream Segmentation (Segmentación de corrientes)

Para obtener el parteaguas de las subcuencas deseadas, en esta sección se separa cada tramo de corriente o tributario, considerando como límite para la separación o división en segmentos de corrientes las confluencias aguas abajo. Por lo que cada subcuenca representa el área de captación de cada tributario y las confluencias encontradas aguas abajo simulan su salida (Figura 2.25).

Esta opción separa cada una de las corrientes en segmentos individuales con el objetivo de estimar la cuenca para cada uno de los tributarios o corrientes.

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona **Processing** → **Stream SegmentaEon**

Confirmar la entrada **“Fdr”** y **“Str”** La salida será **“StrLnk”** OK

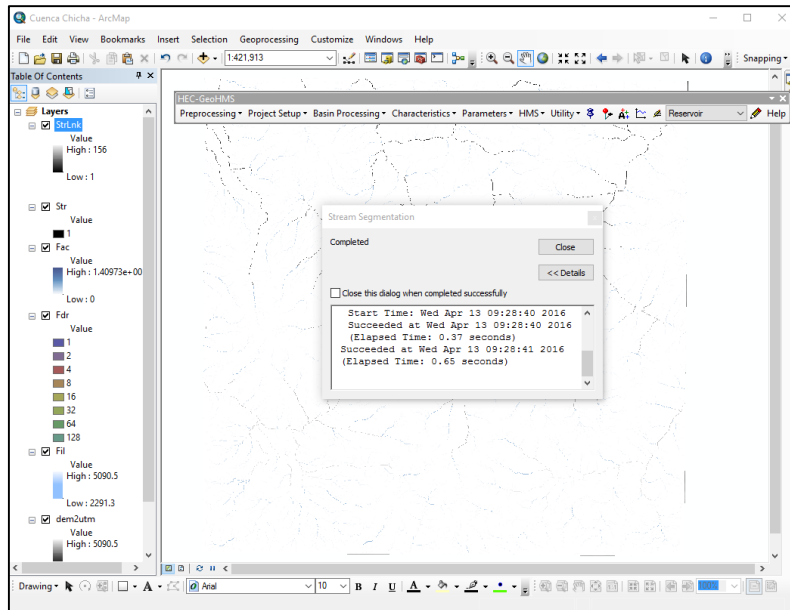


Figura 2.25: Segmentación de ríos

### Catchment Grid Denileation (Delineación De Subcuencas)

Identifica las subcuencas que existen dentro del área de estudio para cada tributario o segmento de corriente, el resultado que se obtiene al ejecutar esta herramienta se muestra en la Figura 2.26

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona **Processing** → **Catchment Grid Delineation**  
 Confirmar la entrada **"Fdr"** y **"StrLnk"** La salida será **"Cat"** OK.

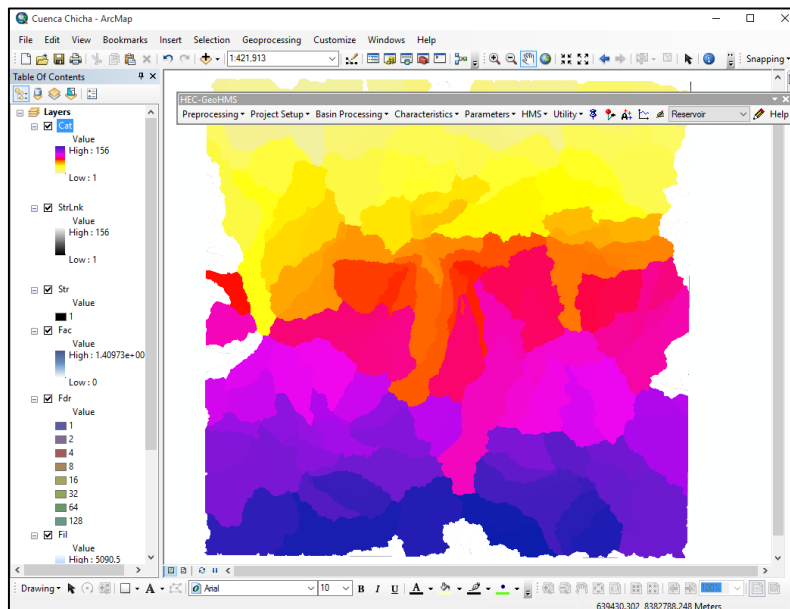


Figura 2.26: Procesamiento de delineación de sub cuenca

## Catchment Polygon Processing (Procesamiento de subcuencas)

Convierte las subcuencas de formato ráster a formato vector con el fin de manejar datos a la hora de transferirlos al programa de modelación. Los vectores generados se observan en la Figura 2.27

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona **Processing** → **Catchment Polygon Processing** Confirmar la entrada “**Cat**” La salida será “**Catchment**” OK

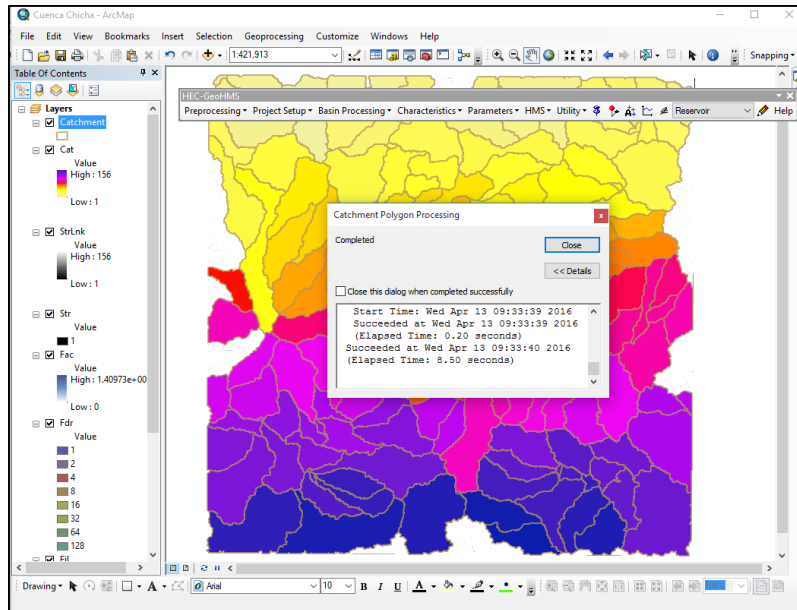


Figura 2.27: Procesamiento de sub cuencas

## Drainage Line Processing (Procesamiento De La Línea De Drenaje)

En este paso se vectoriza la red de flujo. El resultado se observa en la Figura 2.28

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona **Processing** → **Drainage Line Processing**

Confirmar la entrada “**Fdr**” y “**StrLnk**” La salida será “**DrainageLine**” OK

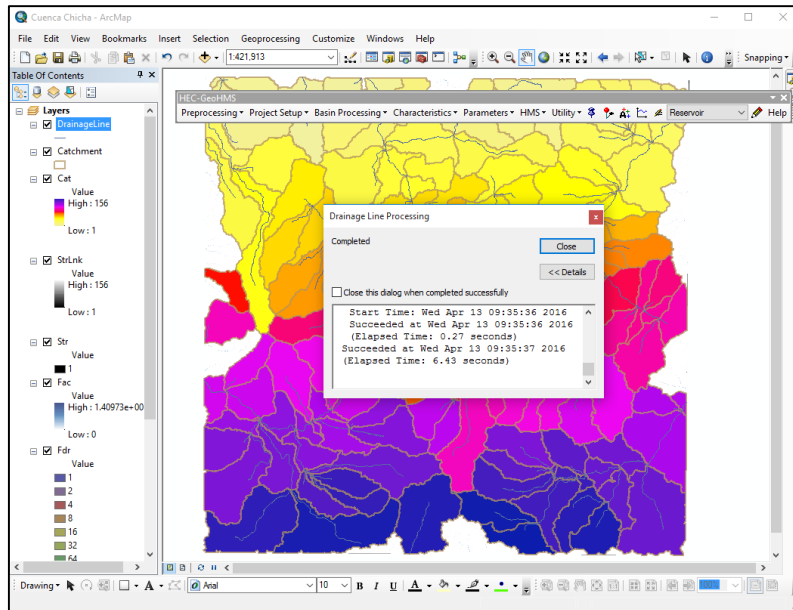


Figura 2.28: Procesamiento de la línea de Drenaje

### Adjoint catchment processing (Adición de subcuencas)

Este paso aglutina las subcuencas que vierten a cada confluencia de cauces. Es obligatorio y se realiza para mejorar la delineación de las subcuencas y obtención de datos (Figura 2.29).

Los pasos para agregar subcuencas se muestra a continuación:

En HEC-GeoHMS Tools se selecciona **Processing** → **Adjoint Catchment Processing** Confirmar la entrada “**DrainageLine**” y “**Catchment**” La salida será “**Adjoint Catchment**” OK

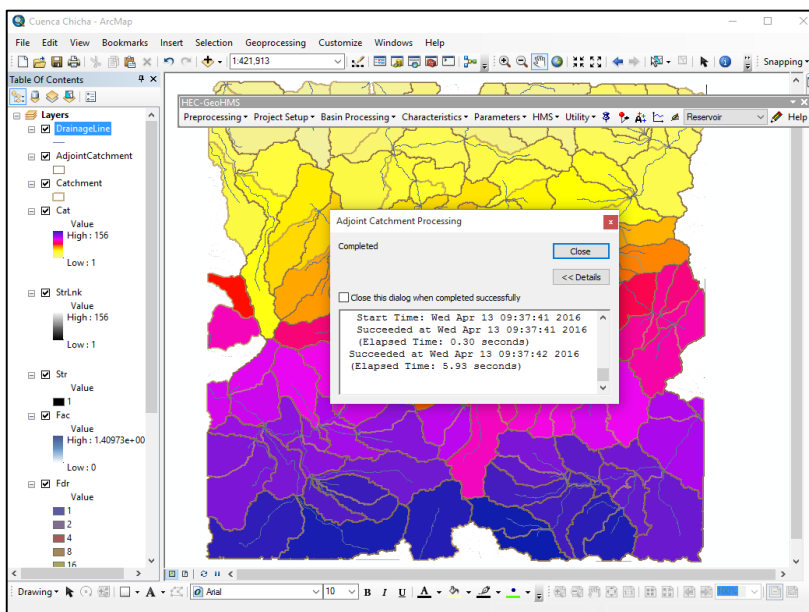


Figura 2.29: Adición de sub cuencas

### 2.3.3.4 Creación de un proyecto utilizando el HEC-GeoHMS

Una vez definidas las cuencas y corrientes, es posible obtener los parámetros de cada una de ellas si se trabaja a nivel subcuencas. En este caso se pretende dividir la cuenca en una malla de celdas cuadradas y obtener los parámetros hidrológicos para cada una de las celdas empleando la red de corrientes que se estimó en la etapa anterior además de las coordenadas del punto de aforo está ubicado en el encuentro de los ríos de Chicha y Larcay. Con estos datos, el HEC-GeoHMS permite crear la cuenca a partir de la salida indicada, aislando las propiedades, resultado del proceso de terreno estimado en la etapa anterior para toda la zona.

En principio se introducen dentro del Sistema de Información Geográfica las coordenadas del punto de aforo, en proyección UTM como se muestra en la Figura 2.29. Posteriormente se realiza el proceso de delimitación de cuenca aplicando el siguiente desarrollo con HEC-GeoHMS.

#### Crear un nuevo proyecto

Del menú **HEC-GeoHMS Project Setup**, seleccionar *Star a New Project* (a). En la ventana siguiente se dejan los nombres *ProjectArea* y *ProjectOPoint* por default y *ok* (b). Se nombra y hace una breve descripción del proyecto, en *Extraction Method* se selecciona la opción *Original Stream Definition* y por último se determina la ubicación del proyecto como se observa en (c). La siguiente ventana simplemente se cierra (d). (Ver Figura 2.30).

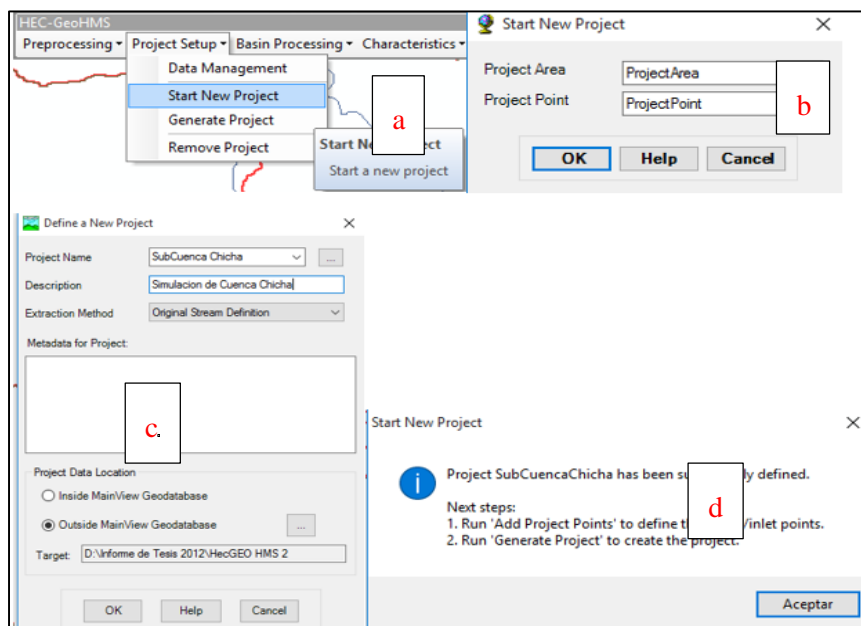



Figura 2.30: Iniciar un nuevo proyecto en HEC-GeoHMS a) HMS Project Setup, b) Opciones por default, c) Características del proyecto, d) Indicaciones para agregar puntos de proyecto.

### Punto de salida de la cuenca

El punto de salida de la cuenca de estudio se agrega con el ícono , preferentemente cerca de donde se encuentra la estación hidrométrica Coliman. En la ventana que aparece se dejan los nombres por default (Outlet1) y ok, como se muestra en la Figura 2.31

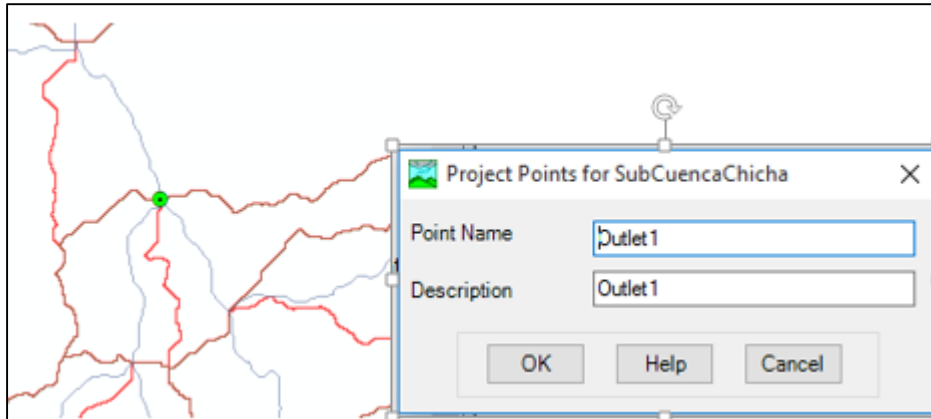


Figura 2.31: Creación del punto de salida o punto de aforo de la cuenca

### Generación del proyecto

En **HMS Project Setup** se selecciona **Generate Project**, con esta instrucción se crea automáticamente el parteaguas de la cuenca a partir del MED y del punto de salida dada en el paso anterior, como se observa en la Figura 2.31 Se crea automáticamente la vista de un nuevo *Data Frame* con el nombre del proyecto que contiene los *Layers Subbasin1, River1, Cat, StrLnk, Str, Fac, Fdr, Fil, Raw MED, ProjectPoint1 y MainViewMED*, delimitados por el parteaguas como se observa en la Figura 2.32

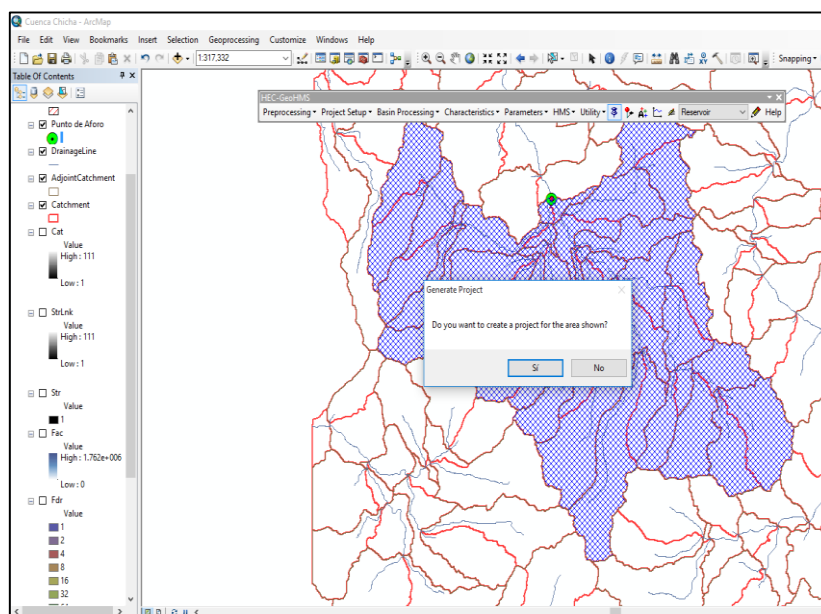


Figura 2.32: Delimitación preliminar de la cuenca

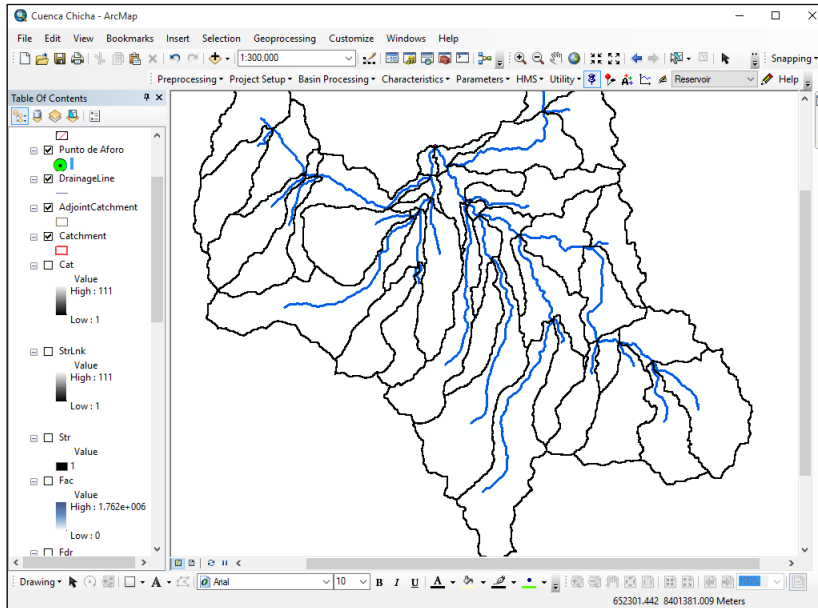


Figura 2.33: Cuenca delimitado con su conjunto de sub cuencas

### 2.3.3.5 Procesamiento de la cuenca utilizando el HEC-GeoHMS

#### Basin Merge

En el nuevo Data Frame o Layer donde fue creado el proyecto con HEC-GeoHMS se activa el tema Subbasin1 y se seleccionan todas las subcuencas, aplicando del menú de **HEC-GeoHMS** la opción *Basin Processing* y *Basin Merge*. Existen ocasiones en que el número de subcuencas es muy grande, por lo que el proceso de selección y unión de cuencas se tiene que realizar en forma parcial a fin de unir las completamente. En este paso tiene que observar solo un polígono, el cual se puede verificar al abrir la tabla de atributos del tema *Subbasin* (Figura 2.34).

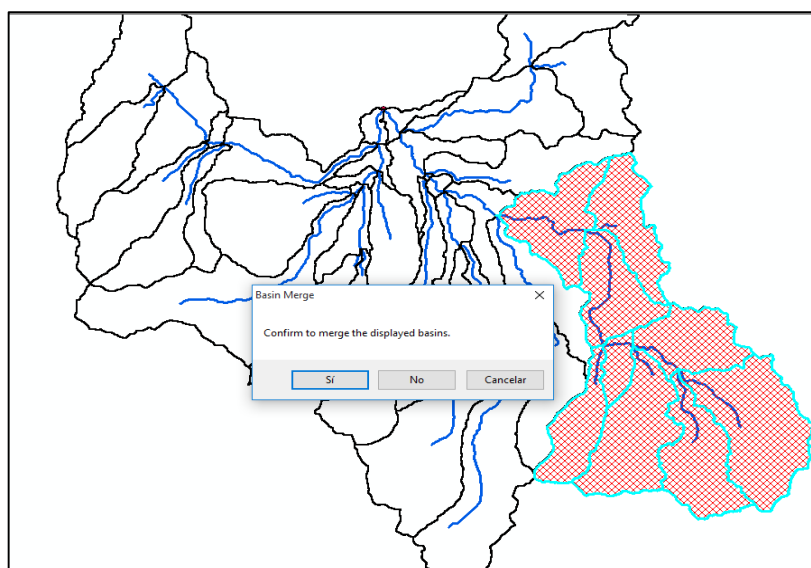


Figura 2.34: Agrupamiento de la subcuencas en áreas mayores

## River Merge

En este paso se seleccionan todas las corrientes que se encuentran dentro del tema River 1. Para lograr esta unión, del menú Basin Processing se selecciona River Merge. Al igual que en la unión de subcuencas, cuando existen muchos ríos el proceso de selección y unión se realiza en forma parcial hasta unir todas las corrientes completamente. Este proceso se observa en la Figura 2.35, para verificar que las corrientes han sido unidas se abre la tabla de atributos del tema River 1. La descripción de esta herramienta se presenta a continuación:

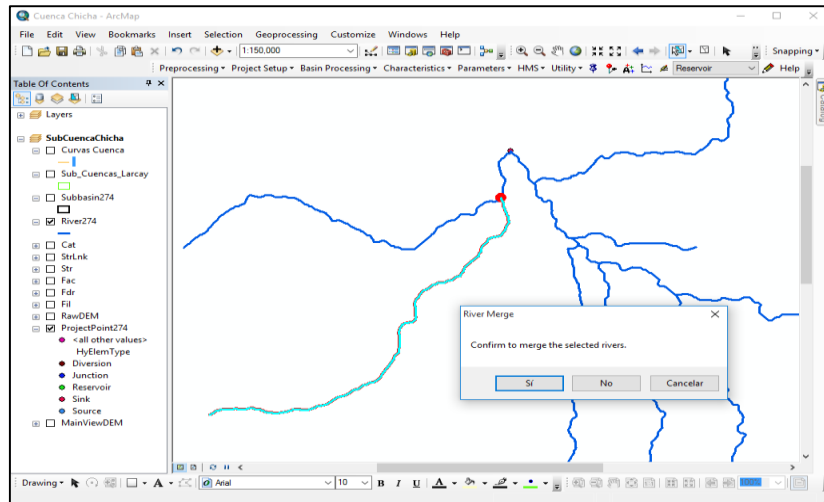


Figura 2.35: Unión de varios tramos de ríos de acuerdo a las subcuencas agrupadas

### 2.3.3.6 Características de la cuenca y río

- a) Se estima la longitud de cada tramo de corriente, pendiente longitud del río principal y su centroide. Para ello, del menú de **Basin Characteristics** (Figura 2.36) se seleccionan los siguientes comandos:

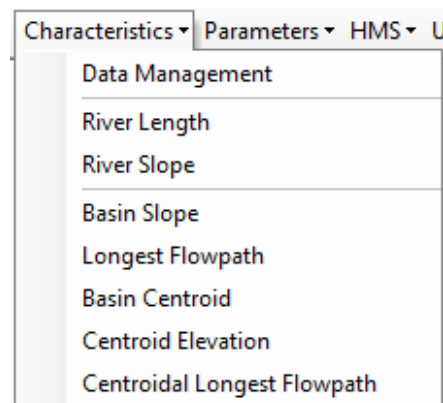


Figura 2.36: Menú de basin characteristics

**a.1. River Length**, se selecciona el río, en este caso *River1* y presiona OK

**a.2. River Slope**, se selecciona *River 1* y presiona OK.

**a.3. Basin Slope**, antes de ejecutar este comando es necesario obtener la pendiente (*slope*) a través del menú de *Arc Hydro*, en *Terrain Preprocessing*. El dato de entrada es RawMED y el de salida se renombra como slope y OK (Figura 2.37).

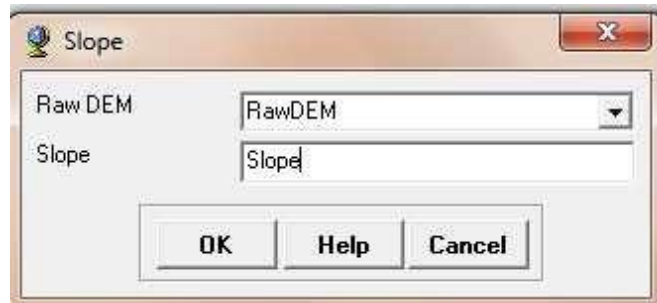


Figura 2.37: Ejecución del comando *slope*

**a.4 Longest Flow Path**, se acepta los valores por default mostrados en la ventana que aparece. Este proceso se muestra en la vista de la Figura 2.38.

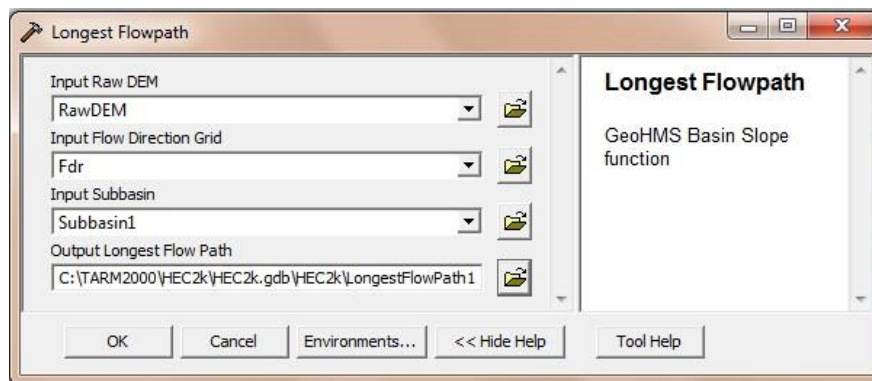


Figura 2.38: Longitud más larga del flujo

**a.5 Basin Centroid**, se acepta el método para calcular el centro de gravedad de la cuenca, en este caso se selecciona *Center of gravity* mientras que los demás campos se dejan por default, y se elige OK como se muestra en la Figura 2.39.

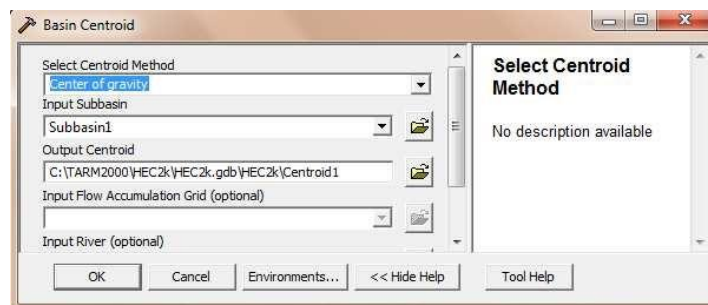


Figura 2.39: Cálculo del centroide de la cuenca

**a.6. Centroidal Longest Flow Path**, se aceptan los datos dados por default en la ventana que aparece en la Figura 2.40.

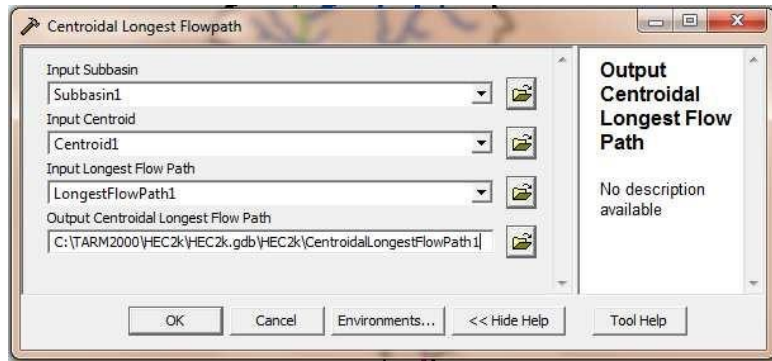


Figura 2.40: Cálculo del centroide de la corriente con mayor longitud

### 2.3.3.7 Parámetros hidrológicos

La extensión HEC-GeoHMS permite la estimación de varios parámetros importantes, pero lamentablemente está preparado para utilizar datos que ampliamente disponibles en Estados Unidos, pero no en otros países, por ejemplo, Perú. A continuación, se comentarán las funciones y la información necesaria para ejecutarlas.

Una vez extraídos de las características físicas de los ríos y subcuencas, los usuarios tienen la opción de estimar una serie de parámetros hidrológicos. Los parámetros pueden ser estimados como valores promedio de subcuenca y la red basados en bases de datos utilizando suelo y uso de la tierra. Otros parámetros hidrológicos, tales como tiempo de concentración y los parámetros de tránsito Muskingum-Cunge y Onda Cinemática, pueden obtenerse a partir del terreno, los datos analizados, y datos de precipitación.

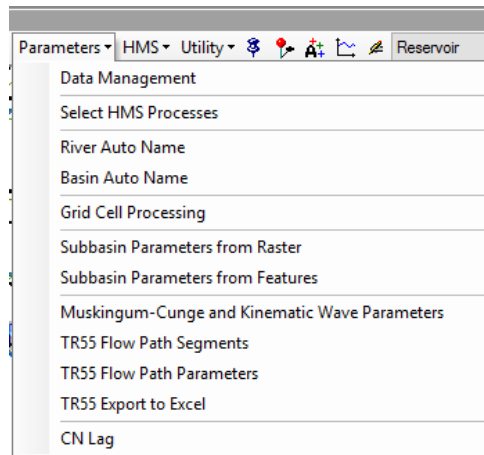


Figura 2.41: Componentes del menú parámetros

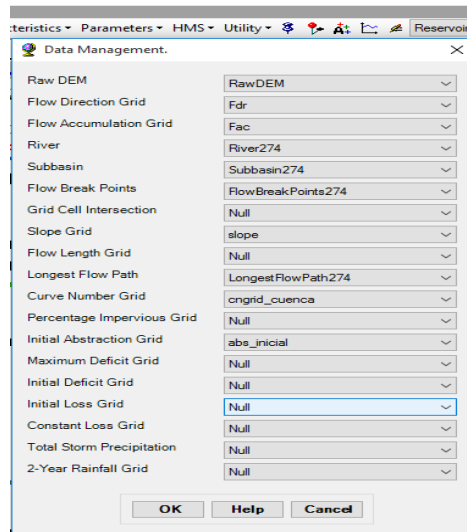


Figura 2.42: Datos considerados para el procesamiento

### River auto name

Este proceso alcanza nombres en la secuencia de aguas arriba a aguas abajo. La convención de nomenclatura combina la letra "R" y un número. Por ejemplo, el tramo aguas arriba, son los nombres de alcance procedentes de aguas abajo. La intención de esta herramienta es nombrar rápidamente los alcances. El usuario debe cambiar los nombres predeterminados a un nombre más descriptivo.

### Basin auto name

Este proceso asigna nombres a las subcuencas en la secuencia de aguas arriba a aguas abajo. La convención de nomenclatura combina la letra "W" y un número. Por ejemplo, la subcuenca aguas arriba, avanzan aguas abajo los nombres subcuencas. La intención de esta herramienta es nombrar rápidamente subcuencas. El usuario debe cambiar los nombres por defecto a los nombres más descriptivos.

### Número de curva (CN) de las subcuenca

La herramienta Método Lag CN calcula el tiempo de retraso cuenca de acuerdo con la siguiente ecuación. Esta ecuación se basa en el método del número de curva como se describe en el Manual de Ingeniería Nacional NRCS, 1972 y fue desarrollado para su aplicación en cuencas de menos de 2000 acres. La herramienta funciona en un conjunto seleccionado de subcuencas en la capa subcuenca. Si se ha seleccionado una subcuenca, la función procesa todas las subcuencas.

El usuario deberá rellenar los campos "CuencaCN" y "Cuenca de pendiente" en la tabla de atributos de la capa sub cuenca antes de utilizar esta herramienta. Parámetros de la subcuenca de la trama o los parámetros subcuenca de herramientas características se pueden utilizar para estimar estos parámetros. Una rejilla de pendiente se puede calcular utilizando

la herramienta Pendiente en el menú Terreno pre procesamiento (Arc Hydro Tools toolbar) o la herramienta Pendiente accesible desde la barra de herramientas de análisis espacial.

#### **Parametros de Muskingum – Cunge.**

Esta herramienta facilita la introducción manual de los parámetros de tránsito Muskingum-Cunge y onda cinemática. En la mayoría de los casos, el usuario no será capaz de obtener la geometría del canal precisa de la MED, que a menudo es demasiado gruesa. Sin embargo, el usuario puede utilizar planos de construcción, fotos, datos de la encuesta, y otra información que muestran la forma y la geometría del canal. Esta información puede proporcionar una base para que el usuario especifique dimensión canal, la forma y otros parámetros.

- Seleccionar al menos un tramo de cause.
- Seleccionar Hydrologic Parameters/Muskingum-Cunge Parameter.
- Ingrese la información de ancho de fondo de canal, pendiente de los cajeros (permite solo 1) y coeficiente de rugosidad de Manning.

#### **Tiempo de retardo de la cuenca**

Esta función calcula el tiempo de retardo de cada una de las cuencas, usando como base la pendiente media de la cuenca y una formula del NRCS . esta fórmula está limitada a cuencas con un CN mayor a 50 y áreas inferiores a 8 km<sup>2</sup> y ha sido obtenida con datos de cuencas americanas, por lo que se aconseja calcular estos parámetros con otro método contrastado para el lugar de aplicación.

El resultado se agrega a la tabla de atributos del tema “Watershd.shp” en la columna de “BasingLag” en horas.

### **2.3.3.8 Integración de HEC-GeoHMS con el HEC-HMS**

#### **Configuración del proyecto a exportar**

En este paso convierte las características físicas de los tramos y subcuencas de unidades del mapa a unidades de HMS. La unidad del mapa es la de los datos de ArcGIS, generalmente los datos del terreno están dados en metros. Los usuarios tienen la opción de convertir las unidades del mapa de unidades del sistema inglés o del sistema internacional (SI).

En la siguiente tabla se muestra una lista de las unidades que utiliza HMS para las diferentes características de los tramos y las cuencas.

Tabla 2.4: Unidades que utiliza HMS para las diferentes características de los tramos y las cuencas

|                          | <b>Características físicas (encabezado en la Tabla)</b> | <b>Unidades Inglesas (encabezamiento)</b> | <b>Unidades SI (encabezamiento)</b> |
|--------------------------|---|---|-------------------------------------|
| Causas<br>(River.shp)    | Longitud (Riv_Length)                                   | Pies<br>(Riv_Length_HMS)                  | Metros<br>(Riv_Length_HMS)          |
|                          | Cota de agua arriba (US_Elv)                            | Pies (US_Elv_HMS)                         | Metros (US_Elv_HMS)                 |
|                          | Cota de agua abajo (DS_Elv)                             | Pies (DS_Elv_HMS)                         | Metros (DS_Elv_HMS)                 |
| Cuenca<br>(WaterShd.shp) | Área (Area)   | Milla Cuadradas<br>(Area_HMS)             | Kilómetros cuadrados<br>(Area_HMS)  |
|                          | Cota de centroide (Elevation)                           | Pies<br>(Elevation_HMS)                   | Metros<br>(Elevation_HMS)           |
|                          | Longitud de flujo más largo<br>(LongestFL)              | Pies<br>(LongestFL_HMS)                   | Metros<br>(LongestFL_HMS)           |
|                          | Cota aguas arriba (USElv)                               | Pies (USElv_HMS)                          | Metros (USElv_HMS)                  |
|                          | Cota aguas abajo (DSElv)                                | Pies (DSElv_HMS)                          | Metros (DSElv_HMS)                  |
|                          | Longitud de flujo desde el centroide<br>(CentroidalFL)  | Pies<br>(CentroidalFL_HMS)                | Metros<br>(CentroidalFL_HMS)        |

Fuente: Manual técnico de HEC-HMS, 2009

### Escenario del HEC-HMS

Este paso controla la consistencia de los conjuntos de datos para describir la estructura hidrológica del modelo. Por ejemplo. Controla que los tramos, subcuencas y punto de salida tengan nombres únicos. Este control es necesario porque la relación entre los elementos hidrológicos puede haberse roto sin intención al haber usado algunas de las herramientas de edición.

Los resultados de esta operación se guardan en un fichero de textos, que presenta los resultados, resumidos por grupos de elementos. Este paso no corrigió los errores, pero pueden localizarse y arreglarse ya se en HEC-GeoHMS o bien en HMS.

### Generación de leyendas.

Este proceso usa la simbología de HMS para describir los elementos hidrológicos, tales como cuencas, ríos, Uniones, Reservorios, Tramos, reservorios, entre otras.

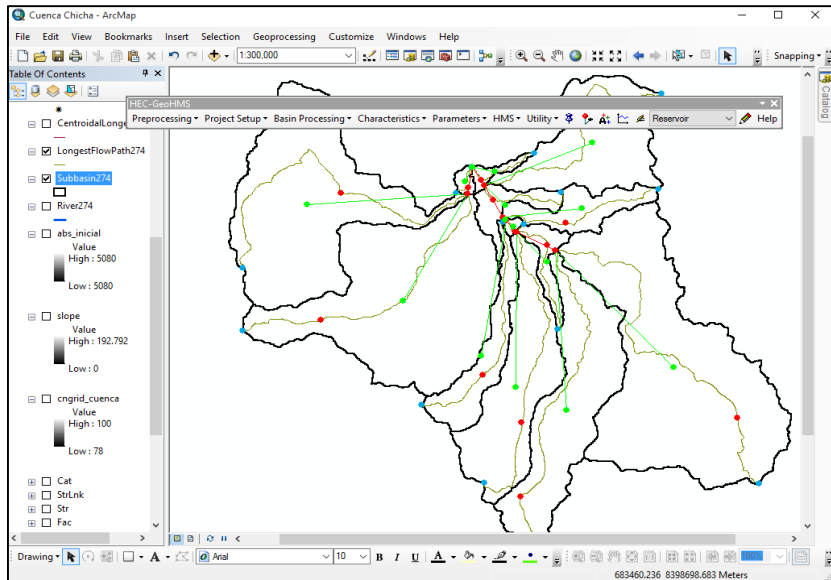


Figura 2.43: Conformación de los elementos del modelo

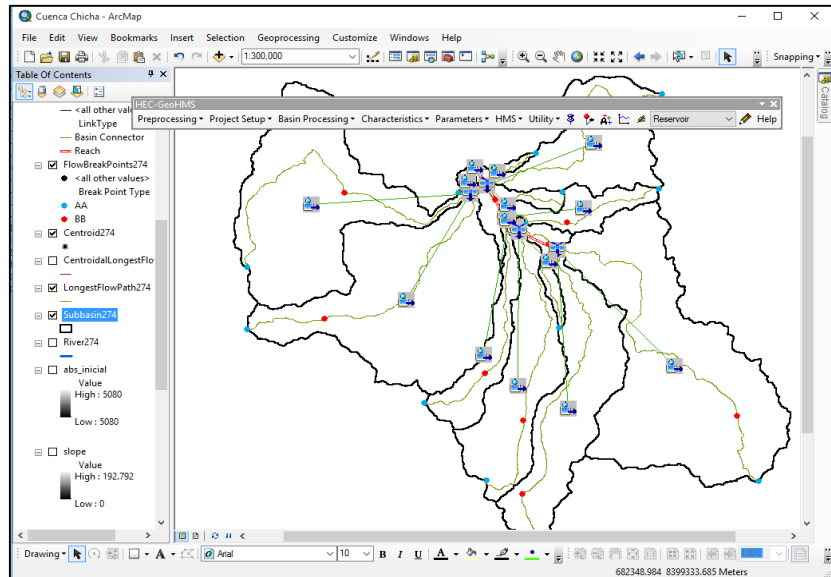


Figura 2.44: Generación de las leyendas de los elementos hidrológicos entorno HEC-HMS

### Exportando la cuenca al HEC-HMS

Este paso se encarga de extraer los datos y la información necesaria para crear un proyecto de HEC-HMS. El enfoque para la extracción implica especificar un punto de control en la salida aguas abajo. Esta ubicación representa la cerrada para el proyecto de HEC-HMS. Después de definir la salida de aguas abajo, HEC-GeoHMS va a extraer los datos de las bases de datos creadas usando las herramientas de procesamiento previo del terreno, para el área de drenaje aguas arriba de la toma de corriente. Entonces HEC-GeoHMS se pueden utilizar para refinar la subcuenca y corriente a delineaciones, extraer las características físicas de las cuencas y ríos, sub estimación de los parámetros del modelo, y preparar archivos de entrada para HEC-HMS. La gestión de estos proyectos permite la re-

creación de una zona de estudio con diferentes umbrales y permite al usuario borrar los proyectos que no sean necesarios y los archivos relacionados fácil y cómodamente.

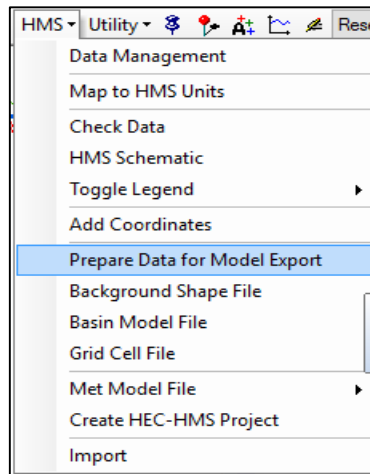


Figura 2.45: Opción de preparación de data a exportar

### Prepare data for model export

Un archivo de modelo de cuenca HMS contiene la estructura de datos hidrológicos, que incluye los elementos hidrológicos, su conectividad, y los parámetros relacionados. HEC-GeoHMS pueden exportar algunos de los parámetros hidrológicos en el archivo HMS modelo de cuenca; Sin embargo, el usuario debe terminar la parametrización del modelo de cuenca, una vez que se importa en HEC-HMS.

#### Pasos

- *Seleccionar HMS → Prepare Data for Model Export.*
- *Presionar OK.*

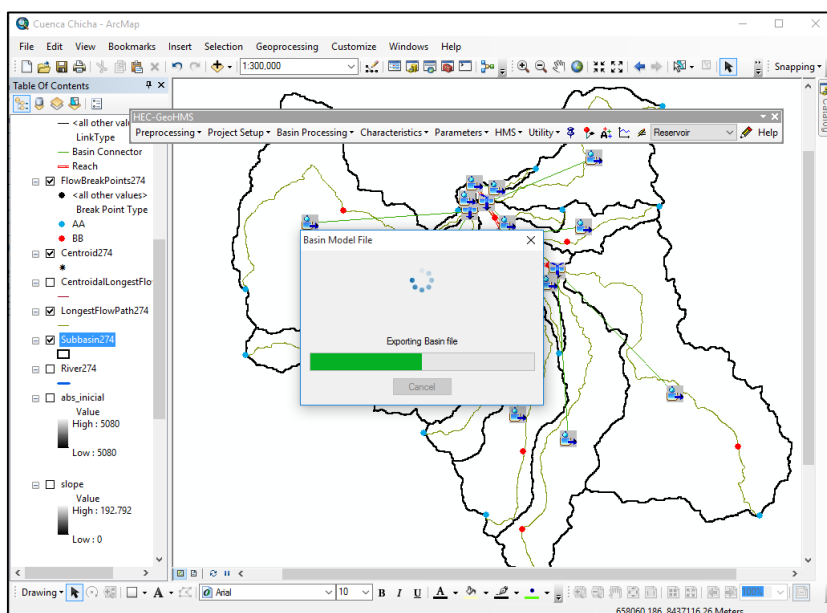


Figura 2.46: Exportación del modelo para el HEC-HMS

### Background shape files

Archivos de formas de fondo capturan la información geográfica de los límites de las cuencas sub y alcances de los ríos. HEC-HMS contiene opciones para ajustar las propiedades de visualización de los archivos de formas, polígonos y propiedades de línea.

Pasos

- Seleccionar en **HMS** → **Background Shape File**.
- Asegúrese de seleccionar las capas sub cuencas y ríos en el **Background Shape File**

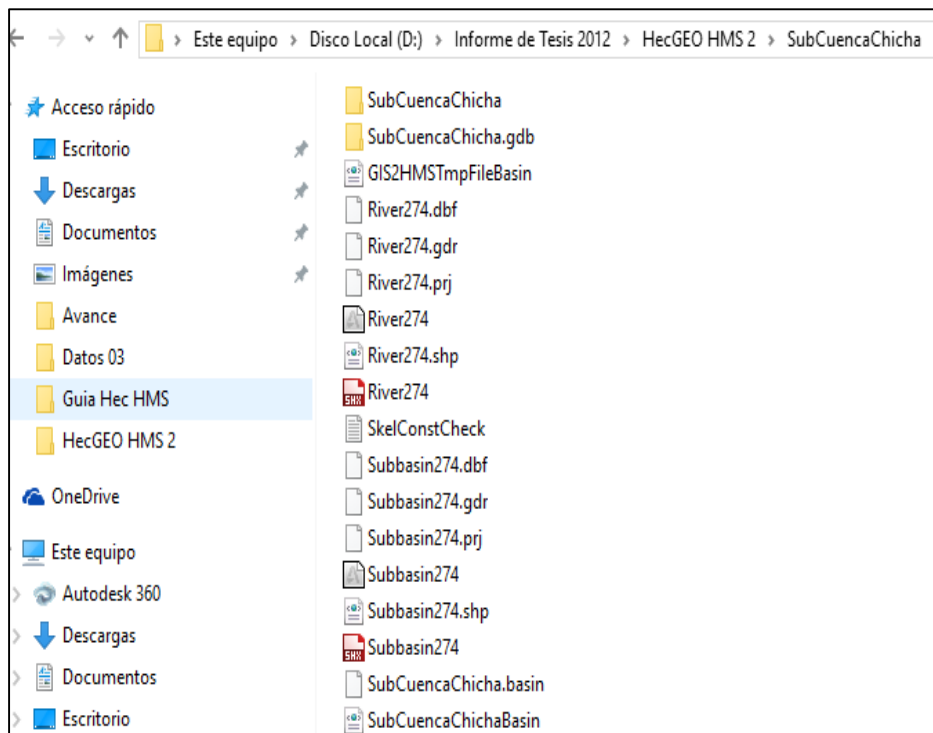


Figura 2.47: Contenido de la carpeta exportado para el HEC-HMS

#### 2.3.3.9 Determinación de parámetros hidrológicos en el HEC-HMS

##### Parámetros para separación de precipitación neta (Modelo SCS, método de curvas)

El usuario debe crear el proyecto de HEC-HMS primero y luego copiar los archivos de mapa de fondo y archivo de modelo de cuenca a la carpeta del proyecto HEC-HMS. Si otros archivos de proyecto HEC-HMS fueron creados por HEC-GeoHMS entonces éstos deben copiarse también.

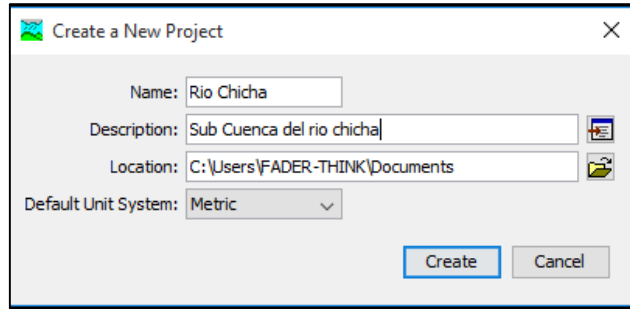


Figura 2.48: Creación de proyecto en el entorno HEC-HMS

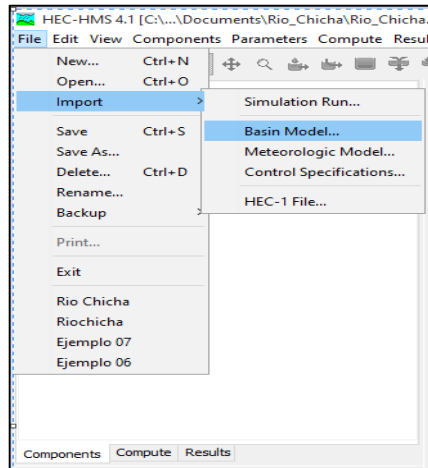


Figura 2.49: Importación del modelo generado en el HEC-GeoHMS

Se añade una carpeta Modelos Cuenca a la del Explorador de cuencas. El modelo de cuenca *Sub Cuenca Chicha Basin* está contenida en esta carpeta. Cuando se selecciona el modelo de cuencas *Sub Cuenca Chicha* en el Explorador de cuencas, el mapa modelo de cuenca se abrirá en el área del escritorio, como se muestra en la Figura 2.49.

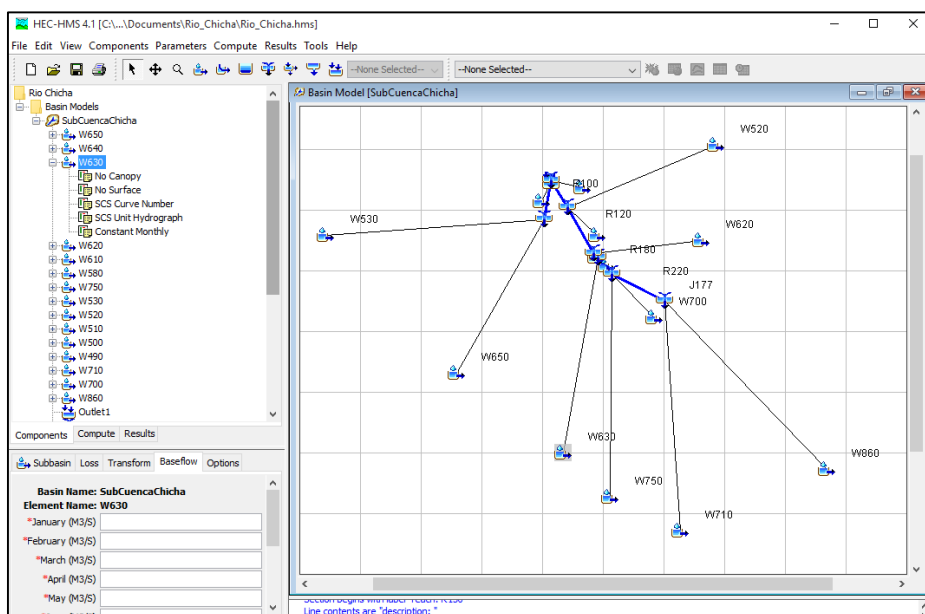


Figura 2.50: Modelo hidrológico importado del HEC-GeoHMS, en entorno HEC-HMS

Direccionar al archivo es ESRI (\* .shp) y navegue hasta el directorio donde los archivos de formas de fondo, tales como los subcuencas y ríos, luego seleccionar el archivo de forma subcuenca y pulse el botón Seleccionar. El archivo de formas se añadirá automáticamente al mapa modelo de cuenca. A continuación, añadir el archivo de formas río para el mapa. El editor de Mapas de fondo se puede utilizar para ordenar los archivos de formas para que las líneas de los ríos se dibujen en la parte superior de los polígonos y las subcuencas para editar las propiedades de estiramiento de las líneas y polígonos. La Fíg. 2.51 muestra el mapa de modelo de cuenca después de importar los archivos de forma de fondo.

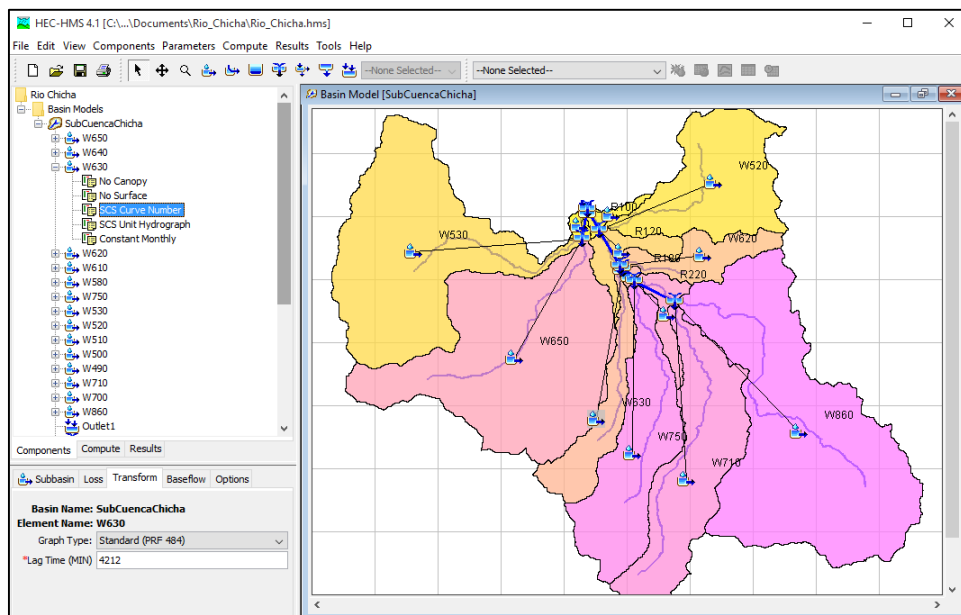


Figura 2.51: Modelo hidrológico importado del HEC-GeoHMS, en entorno HEC-HMS adicionado el mapa base de la sub cuenca y ríos del modelo

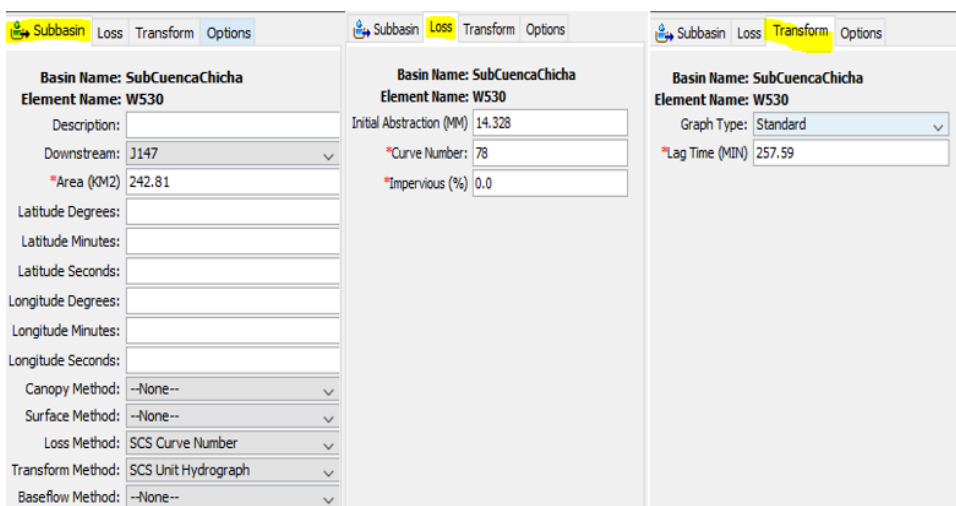


Figura 2.52: Datos de cuenca importados del entorno HEC-GeoHMS

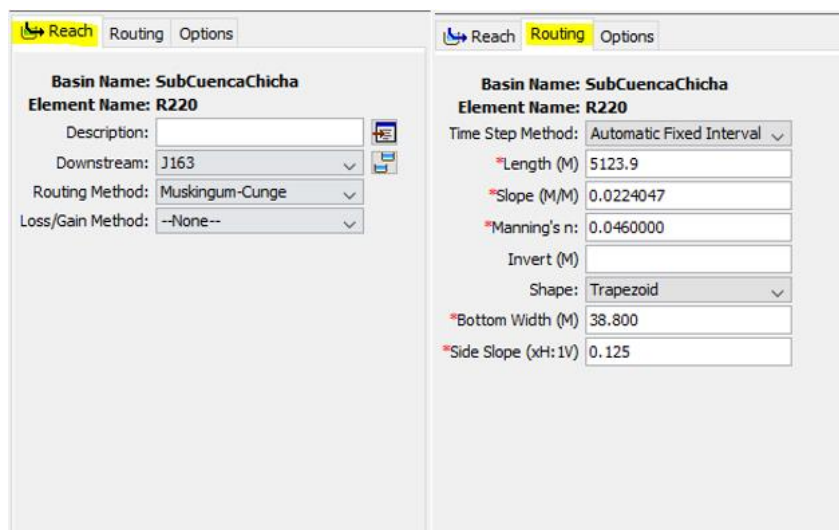


Figura 2.53: Datos de los canales de transito hidrológico, importados del entorno HEC-GeoHMS

### 2.3.3.10 Determinación del hietograma de diseño

#### Precipitación máxima diaria en 24 horas

Los datos empleados, corresponden a los valores de precipitaciones máximas en 24 horas registradas en las estaciones de Pampachiri, Abancay, Andahuaylas, Coracora, Puquio y Vilcashuaman.

Tabla 2.5: Ubicación de las estaciones comprendidas

| N° | ESTACIÓN            | ESTE (m)  | NORTE (m)   | ALTITUD (msnm) |
|----|---------------------|-----------|-------------|----------------|
| E1 | <b>ANDAHUAYLAS</b>  | 676221.14 | 8489604.14  | 2866           |
| E2 | <b>PAMPACHIRI</b>   | 656452.61 | 8431463.605 | 3364           |
| E3 | <b>PUQUIO</b>       | 593064.44 | 8373367.074 | 3219           |
| E4 | <b>CORACORA</b>     | 630774.42 | 8339420.51  | 3172           |
| E5 | <b>VILCASHUAMAN</b> | 613693.32 | 8491424.353 | 3394           |
| E6 | <b>ABANCAY</b>      | 728963.72 | 8491779.205 | 2377           |

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que la información de precipitación proporcionada por SENAMHI se encuentra a nivel diario, no es posible saber la duración de las tormentas correspondientes. La magnitud de las lluvias de diseño para una duración de 6 horas fue calculada usando la ecuación de Dick y Peschke, que permite estimar la magnitud de la lluvia para una determinada duración de tormenta a partir de la magnitud de la lluvia correspondiente a una duración de 24 horas.

### Selección de Estación de trabajo

A continuación, se determina la estación que tiene una mayor influencia sobre la cuenca de la presente investigación, resultando por el método de Polígono de Thiessen, que la estación que mayor incidencia tendría es la de estación meteorológica de Pampachiri.

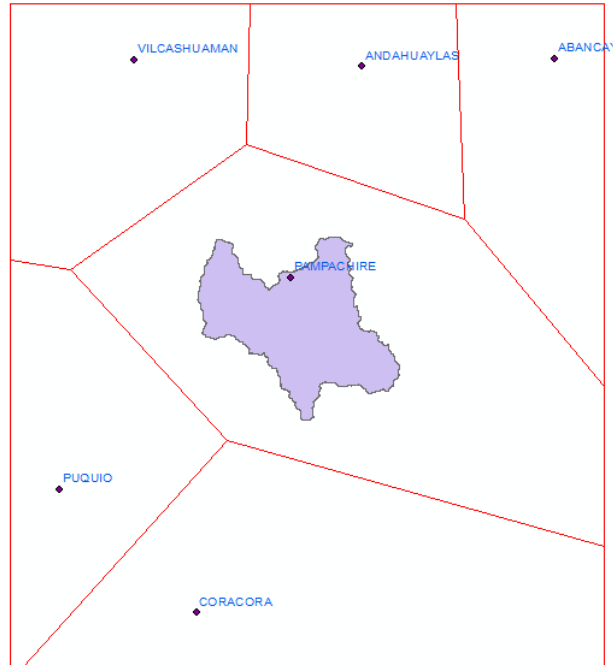


Figura 2.54: Determinación de la estación de influencia por el método de polígono de Thiessen para el estudio

### Análisis de consistencia de los datos de la estación seleccionada

Los análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias se efectuaron en base a las distribuciones diversas, utilizando el software Hidroesta v2.0.

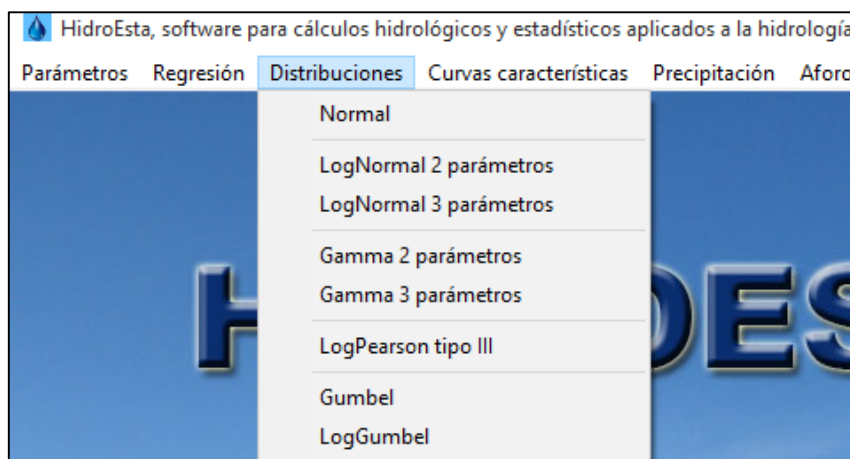


Figura 2.55: Tratamiento estadístico para la obtención de precipitaciones para distintos períodos de retorno

Por lo general son las dos últimas las que mejor se adecuan ya que estas brindan un mayor ajuste para los valores extremos, pero no siempre se cumple esto, habiendo en algunos casos algunas excepciones. Los resultados están anexados.

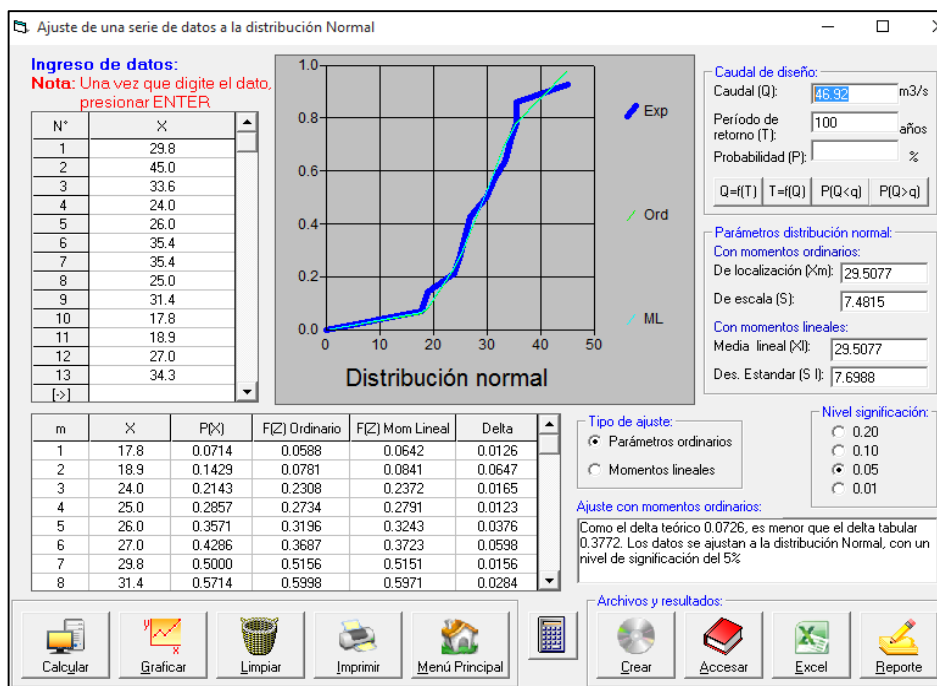


Figura 2.56: Resultados obtenidos tras los análisis estadísticos utilizando el software HidroEsta V.2

### Precipitación de diseño

La información que se encuentra disponible para Estaciones diseminadas a lo largo del territorio es la precipitación máxima registrada en un período de 24 horas, por lo que se utilizan fórmulas para ajustar la precipitación de acuerdo al período de duración deseado. Una de ellas es la de Dick y Pescke.

#### 2.3.3.11 Determinación de hidrogramas en el punto de aforo para los diferentes períodos de retorno en el entorno de HEC-HMS

##### a) Datos de precipitación

Para la investigación, no se cuenta con datos de un pluviógrafo, pero se cuenta con datos generados de precipitación hipotética basado en frecuencias, como los obtenidos en el numeral anterior, estos datos se ingresan en el Modelo Meteorológico.

##### b) Modelo Meteorológico

El modelo meteorológico sirve para introducir los datos generados de precipitación hipotética basado en frecuencias (*Frequency Storm*), como se tiene 5 series generados, para T= 10, 20, 50, 100 y 1000 años, se debe de crear 5 modelos meteorológicos: Met tr: 10, 20, 50, 100 y 1000 Años.

Ejecutando la orden *Components/Meteorologic Model Manager/New ...*, para crear el primero y los 4 restantes. Y hacer clic en el botón *create*, para cada uno de los modelos.

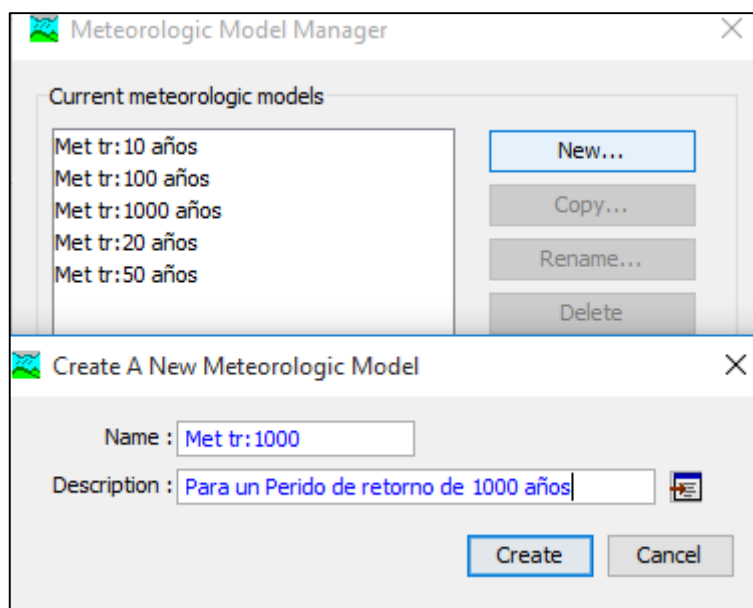


Figura 2.57: Creación de modelo meteorológico

Con esto se creó el modelo meteorológico en el panel de Explorador de la cuenca, mostrando la figura siguiente.

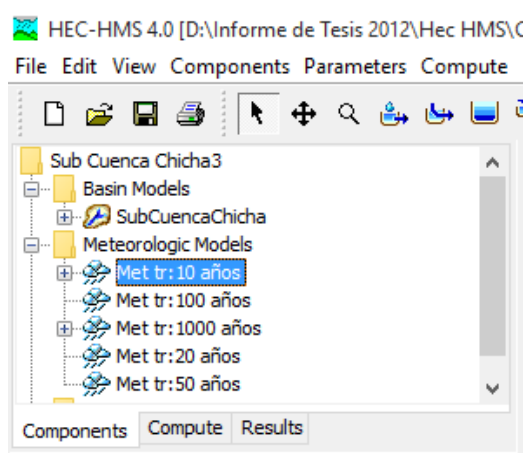



Figura 2.58: Muestra de los 5 modelos meteorológicos

### c) Asignación de los elementos necesarios

Si el panel del explorador de la cuenca, se hace clic en  **Met tr: 10 años**, en el panel del editor de componentes, se muestra.

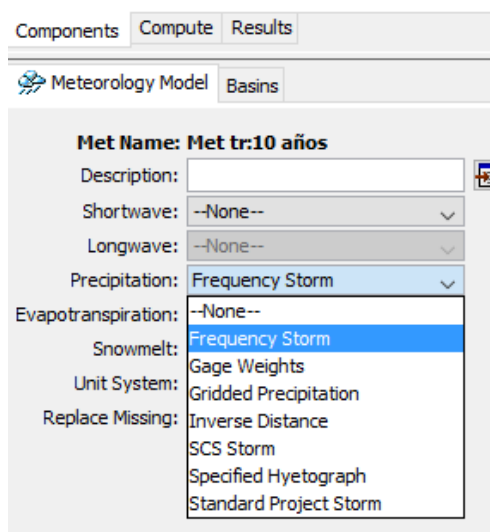


Figura 2.59: Selección del modelo meteorológico, para la simulación de la cuenca.

Seleccionar la Opción *Frequency Storm*. No hay datos de evapotranspiración (*Evapotranspiration*) ni de nieve (*Snowmelt*), por lo que se acepta para ambos *None*.

Luego seleccionar la pestaña **Basins**, con la que se abre la ventana que se muestra:

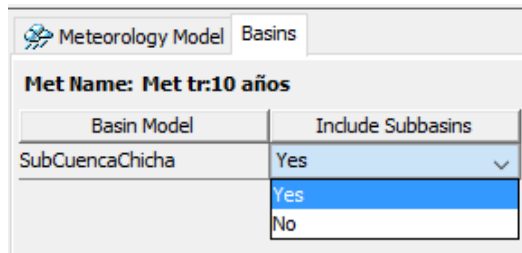



Figura 2.60: Integración de las subcuencas al modelo meteorológico

En este campo eligiendo la opción *Yes*, para incluir al modelo todas las subcuencas objeto del estudio.

Posteriormente en el panel de Explorador de la cuenca, al seleccionar sobre  **Frequency Storm**, en el panel del editor se muestra lo siguiente:

Precipitation

**Met Name: Met tr:10 años**

Probability: 10 Percent

Input Type: Partial Duration

Output Type: Annual Duration

Intensity Duration: 5 Minutes

Storm Duration: 6 Hours

Intensity Position: 50 Percent

Storm Area (KM2) 1425

Curve: Uniform For All Subbasins

| Duration   | Partial-Duration Depth (...) |
|------------|------------------------------|
| 5 Minutes  | 9.4900                       |
| 15 Minutes | 12.490                       |
| 1 Hour     | 17.660                       |
| 2 Hours    | 21.000                       |
| 3 Hours    | 23.240                       |
| 6 Hours    | 27.640                       |

Figura 2.61: Ingreso del hietograma de la tormenta generado

Suministrando los datos a cada modelo meteorológico según la tabla 3.4. del capítulo de conclusiones.

#### d) Especificaciones de control

Las especificaciones de control son usadas para indicarle al programa el período de tiempo que se usará para la simulación. Aquí también se especifica el intervalo de tiempo, el cual determina la resolución del hidrograma resultante, producto de los cálculos obtenidos durante la ejecución del programa. El intervalo de tiempo de cálculo se divide el intervalo de tiempo entre el inicio y final en un número entero, para la investigación se tiene:

Las especificaciones de control son agregadas al proyecto seleccionando *Components*

*Control specifications manager* desde la barra de menú. Hacer clic en la opción *New* e introducir un nombre y una descripción para el control.

El editor de componentes (Figura 2.62) para unas especificaciones de control requiere una fecha y hora de inicio y una fecha y hora de finalización así como un intervalo de tiempo.

Los formatos como deben introducirse los mismos se observan en el editor de componentes. La mayoría de los cálculos para los métodos son realizados en ese intervalo de tiempo y los resultados se muestran siempre para el intervalo de tiempo aquí especificado.

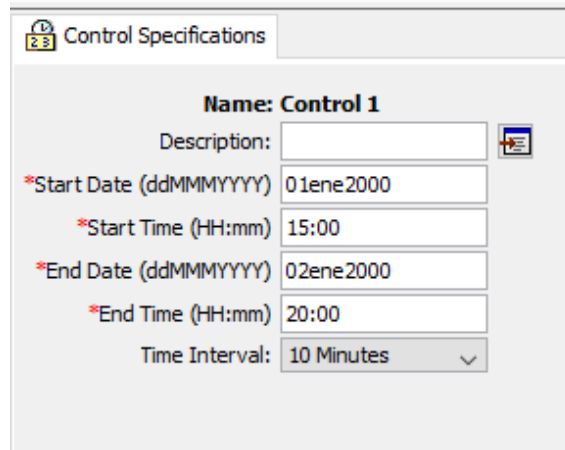


Figura 2.62: Establecimiento de un punto de control, para el análisis de los resultados

#### e) Crear una Simulación

Una corrida de simulación es creada seleccionando **Compute** → **Run manager** desde la barra de menú. Seleccionar la opción **New**. Luego de hacer clic en **New** un asistente te guiará a través del proceso de creación de la simulación. Un nombre debe ser introducido, luego un modelo de cuenca, un modelo meteorológico y las especificaciones de control deben ser seleccionados. La nueva simulación es añadida a la pestaña “**Compute**” en el explorador de cuencas (Figura 19). Note que la pestaña **Compute** tiene carpetas separadas para cada uno de los tipos de simulación que se puedes realizar; simulación, optimización y análisis.

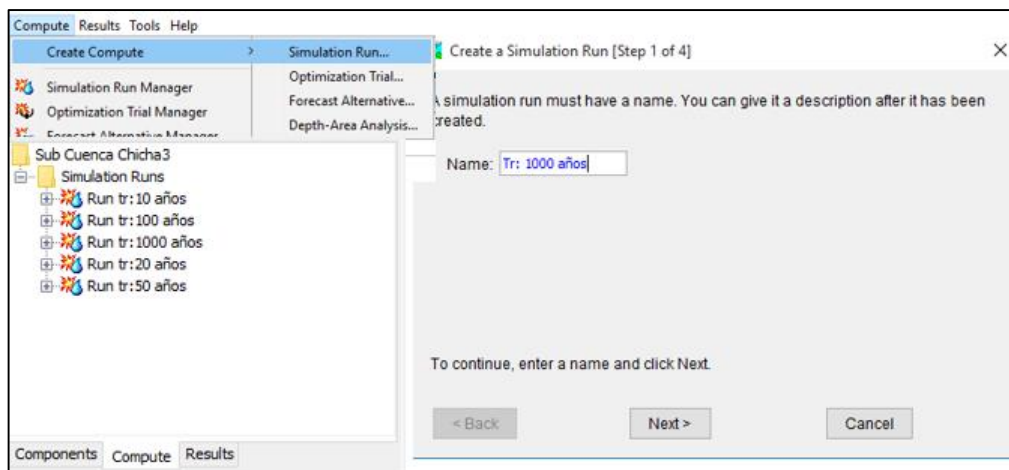


Figura 2.63: Generación de los distintos escenarios para la corrida

#### f) Ejecutar la simulación

Para realizar la simulación se debe seleccionar **Compute** **Select Run** desde el menú de opciones y escoger la simulación deseada (Figura 2.64). Para calcular la simulación se debe hacer clic en **Compute** y luego hacer clic en **Compute Run** al final del menú (Figura 21). La corrida seleccionada debería estar en soportes siguiendo la opción

**Compute Run.** En la Figura 2.64 se puede observar el editor de componentes de una corrida.

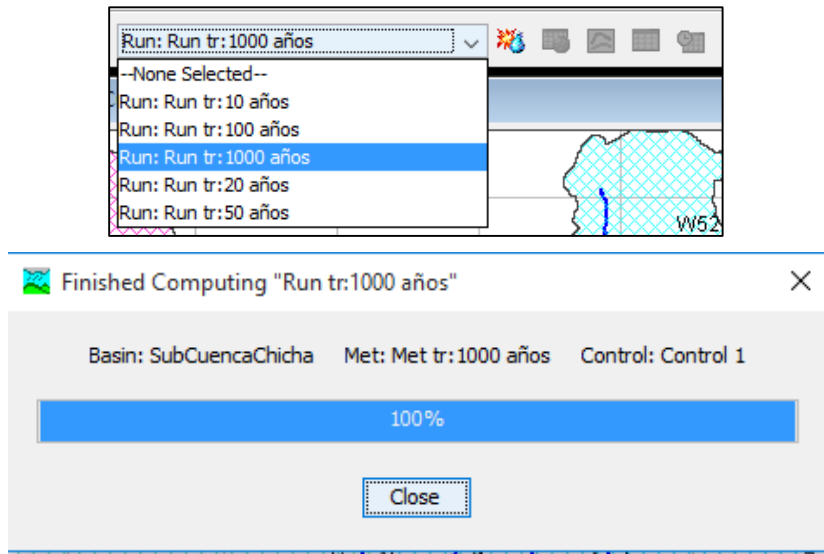



Figura 2.64: Ejecución de los escenarios, en forma satisfactoria

**g) Ver resultados de un modelo**

Para observar los resultados de una simulación se puede presionar el botón

resultados de la simulación  O seleccionando Resultados *Global summary table*. En la figura 2.65 a 2.68 se observan los resultados de una corrida.

The screenshot shows a window titled 'Global Summary Results for Run "Run tr:1000 años"'. It contains project information and a table of hydrologic elements. The table has columns: Hydrologic Element, Drainage Area (KM2), Peak Discharge (M3/S), Time of Peak, and Volume (MM). The data is as follows:

| Hydrologic Element | Drainage Area (KM2) | Peak Discharge (M3/S) | Time of Peak     | Volume (MM) |
|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------|-------------|
| W650               | 278.6500000         | 49.6                  | 01ene2000, 23:00 | 3.64        |
| W640               | 2.4562000           | 2.8                   | 01ene2000, 18:30 | 5.50        |
| W630               | 54.3190000          | 16.0                  | 01ene2000, 21:40 | 4.83        |
| W620               | 39.7060000          | 18.8                  | 01ene2000, 21:00 | 6.66        |
| W610               | 0.2282000           | 0.4                   | 01ene2000, 18:20 | 5.54        |
| W580               | 23.7860000          | 10.8                  | 01ene2000, 20:10 | 5.20        |
| W750               | 129.7000000         | 29.4                  | 01ene2000, 22:20 | 4.19        |
| W530               | 242.8100000         | 39.0                  | 01ene2000, 23:30 | 3.65        |
| W520               | 121.3600000         | 52.0                  | 01ene2000, 21:40 | 7.02        |
| W510               | 7.1716000           | 5.3                   | 01ene2000, 19:10 | 6.05        |
| W500               | 4.4851000           | 14.2                  | 01ene2000, 18:30 | 11.66       |
| W490               | 0.0072608           | 0.1                   | 01ene2000, 18:10 | 15.35       |
| W710               | 159.6500000         | 33.2                  | 01ene2000, 22:40 | 4.05        |
| W700               | 19.4270000          | 8.5                   | 01ene2000, 20:20 | 5.26        |
| W860               | 341.6500000         | 52.2                  | 01ene2000, 23:40 | 3.62        |
| Outlet1            | 1425.4063608        | 264.0                 | 01ene2000, 22:50 | 4.24        |
| J147               | 521.4600000         | 88.1                  | 01ene2000, 23:10 | 3.64        |
| J150               | 707.2022000         | 122.8                 | 01ene2000, 23:00 | 3.97        |
| J155               | 747.1364000         | 132.8                 | 01ene2000, 22:50 | 4.11        |
| J160               | 892.2824000         | 179.1                 | 01ene2000, 22:30 | 4.54        |
| J163               | 650.4270000         | 111.2                 | 01ene2000, 23:10 | 3.89        |
| J170               | 1425.3991000        | 264.0                 | 01ene2000, 22:50 | 4.24        |
| J177               | 501.3000000         | 83.2                  | 01ene2000, 23:10 | 3.76        |
| R50                | 1425.3991000        | 264.0                 | 01ene2000, 22:50 | 4.24        |
| R60                | 892.2824000         | 178.9                 | 01ene2000, 22:30 | 4.54        |
| R100               | 521.4600000         | 88.1                  | 01ene2000, 23:20 | 3.64        |
| R120               | 747.1364000         | 132.6                 | 01ene2000, 23:00 | 4.11        |
| R130               | 707.2022000         | 122.8                 | 01ene2000, 23:10 | 3.97        |
| R180               | 650.4270000         | 111.1                 | 01ene2000, 23:20 | 3.89        |
| R220               | 501.3000000         | 83.1                  | 01ene2000, 23:30 | 3.76        |

Figura 2.65: Resultado en modo tabla, del hidrograma de una subcuenca

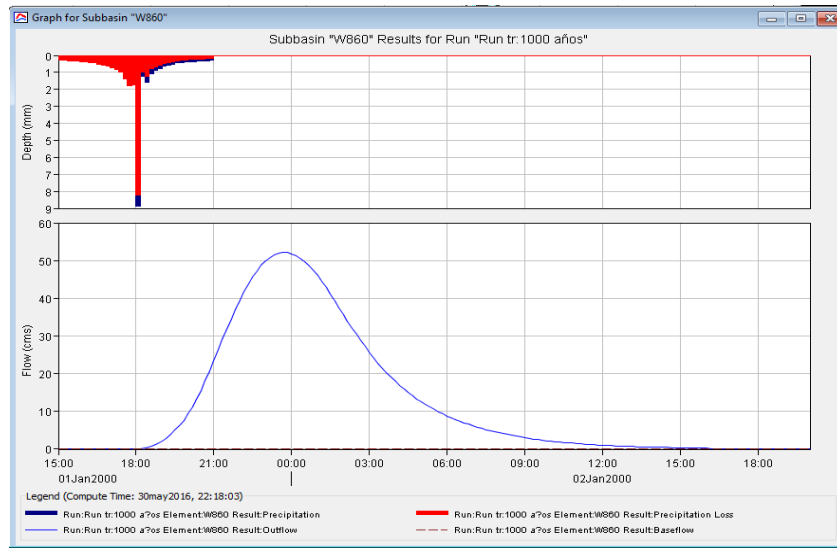


Figura 2.66: Presentación del hidrograma de una sub cuenca, en forma gráfica

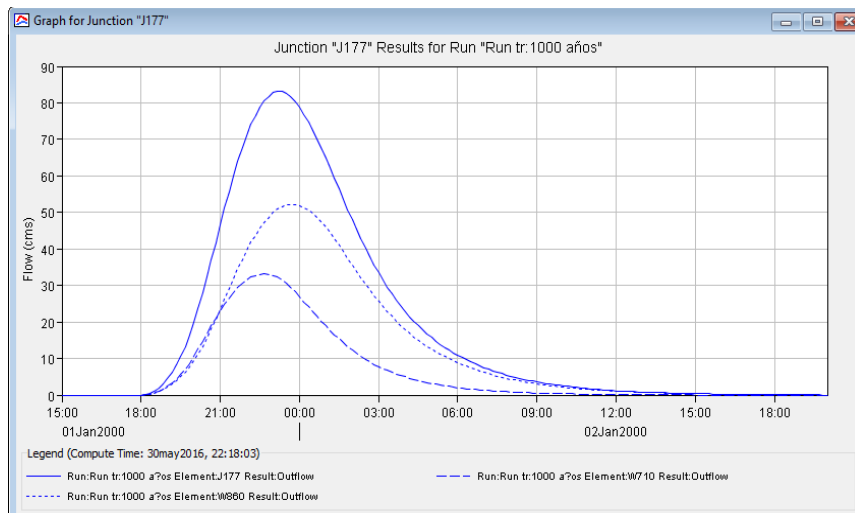


Figura 2.67: Presentación de un hidrograma en un punto de unión de varias subcuencas

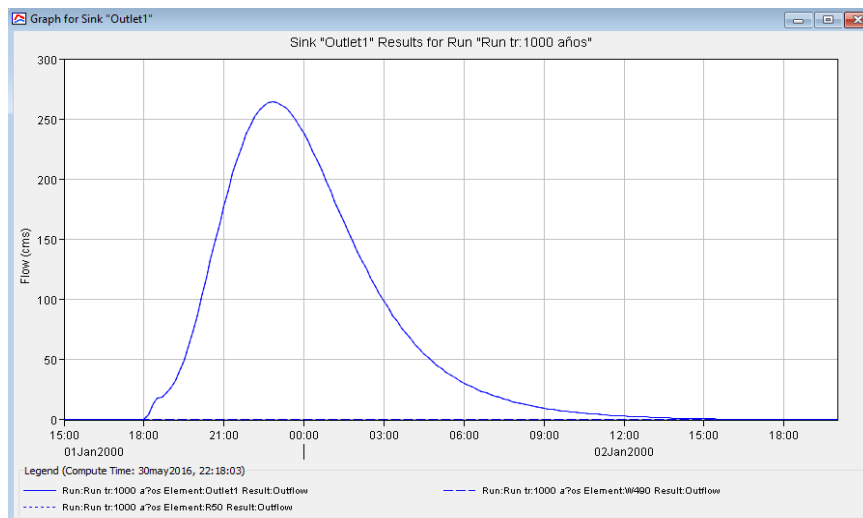


Figura 2.68: Hidrograma en el punto de aforo, salida total de la cuenca

### 2.3.4 Fase de gabinete “Modelación hidráulica en ríos”

En el presente capítulo se desarrollará el uso de la extensión HEC-GeoRAS en su versión 10.2 para ArcGIS 10.2. Siendo esta una extensión para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center (HEC)* del *United States Army Corps of Engineers* y el *Environmental System Research Institute (ESRI)*. Básicamente es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS.

HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales. Posteriormente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGIS y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo.

Antes de instalar HEC-GeoRAS es necesario tener instalado ArcGIS 10.2 y activadas las extensiones *3D Analyst* y *Spatial Analyst* para las operaciones de post-proceso de datos. La extensión es gratuita y fácilmente descargable junto al manual de usuario y ejemplos de aplicación, desde la página web:

[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas\\_downloads.html](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas_downloads.html)

The screenshot shows the 'HEC-GeoRAS Downloads' page. It includes a navigation bar with links: Home, About HEC, Newsletter, Software, Publications, Training, Visitors, Links, Contact Us. The main content area is titled 'HEC-GeoRAS Downloads' and contains several sections:

- HEC-GeoRAS 10 for ArcGIS 10.0 (EAP - Early Access Preview)**: This package will install HEC-GeoRAS 10 and all its pre-requisites automatically. Documentation is available from the programs Help menu, however it has not been updated for HEC-GeoRAS 10. ArcGIS 10 (ArcView license) with the 3D Analyst and Spatial Analyst extensions are required. Download Install Package (10.4MB) [Updated 05 Oct 2011]. If you downloaded HEC-GeoRAS 10 before 05 Oct 2011, please see the Known Issues page.
- HEC-GeoRAS 4.3 for ArcGIS 9.3**: This package will install HEC-GeoRAS 4.3 and all its pre-requisites automatically. This version of HEC-GeoRAS is compatible with HEC-GeoHMS 5.0 and will not work with older versions. Download HEC-GeoHMS 5.0 from here. ArcGIS 9.3 (ArcView license) with the 3D Analyst and Spatial Analyst extensions are required. Install Package (9.04MB) - Primary Download Site | Alternate Download Site User's Manual (4.06MB).
- HEC-GeoRAS Example Data Sets**: Examples: [What are these datasets?]
  - Walluna Import Example (5.44MB)
  - Baxter Example (19.9MB)
  - Terrain Tiles Example (11.9MB)
- Archived Versions:** (with a dropdown arrow)

Figura N° 2.4.1 Se trata de un archivo ejecutable (HEC-GeoRAS\_10.2\_Setup.msi)

### 2.3.4.1 Preparación de data desde el modelo raster y vectorial

Es necesario un **MED** en formato vectorial **TIN** (Triangulated Irregular Network) lo más detallado posible. Este modelo puede generarse con la extensión 3D Analyst a partir de un fichero .dbf (dbase) de puntos acotados o a partir de un fichero de CAD de curvas de nivel en cualquier formato (dxf o dwg).

El fichero de CAD que contiene las curvas de nivel, debe llevar asociado a cada registro de la base de datos una columna o atributo que indique su cota. Antes de empezar a trabajar es importante revisar este atributo o en caso contrario comprobar que se trata de polilíneas Z.

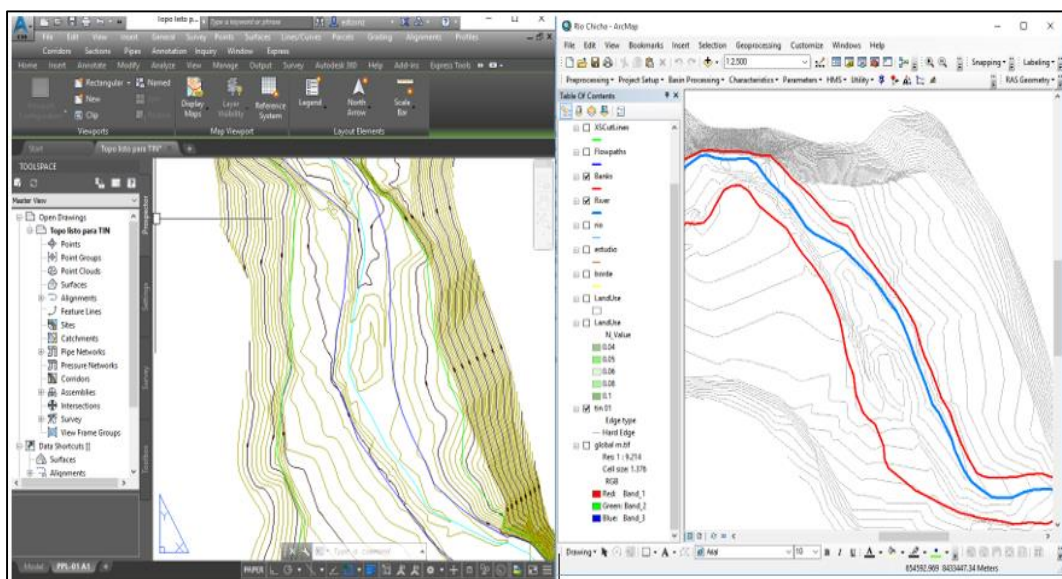


Figura 2.69: Fichero CAD utilizado para generar el MED vectorial

### 2.3.4.2 Introducción a ArcGIS - HEC-GeoRAS y su entorno

La activación de las extensiones se realiza desde el desplegable Tools/Extensions y basta con marcar las casillas correspondientes a *3D Analyst* y *Spatial Analyst*. Pulsaremos *Close* para cerrar la ventana

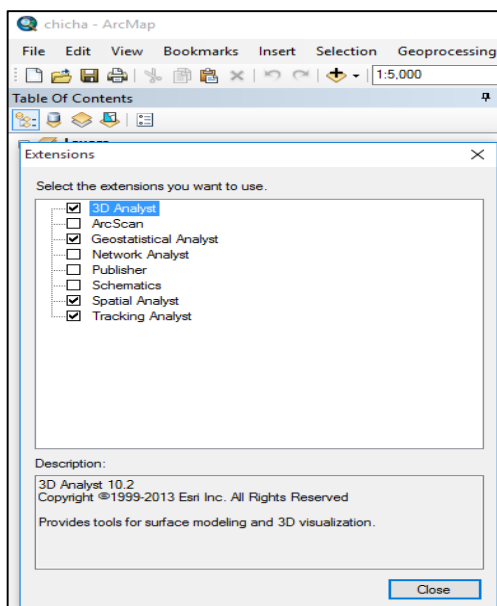


Figura 2.70: Activación de las extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst

La activación de la barra de Herramientas HEC GeoRAS se realiza pulsando con el botón derecho sobre el espacio no ocupado por los menús desplegables (a la derecha de *Help*) y marcando la casilla correspondiente a *HEC GeoRAS*.

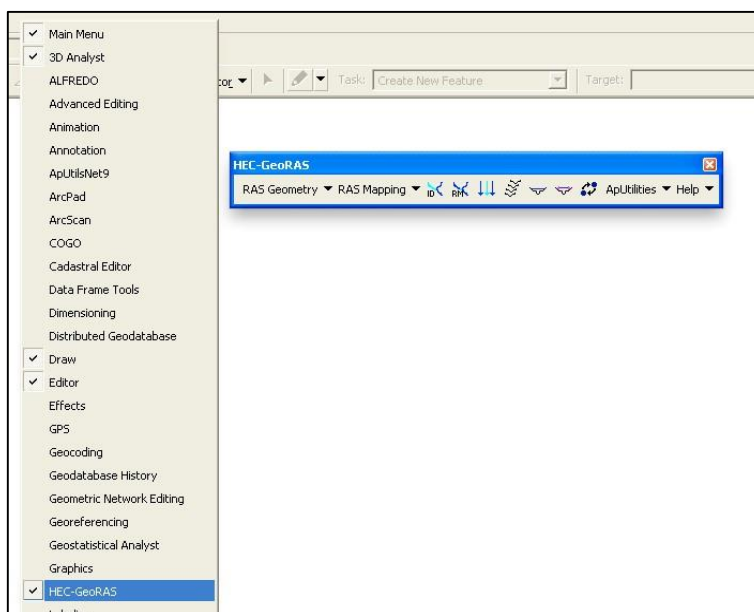


Figura 2.71: Activación de la aplicación HEC-GeoRAS

El resultado es aparición de una nueva barra de herramientas con varios menús desplegables (RAS Geometry, RAS Mapping, ApUtilities), además de varios nuevos botones.

### 2.3.4.3 Aspectos básicos de HEC-GeoRAS

*El menú desplegable RasGeometry:* Las herramientas contenidas en este menú se muestran en el orden en el que se deben utilizar.

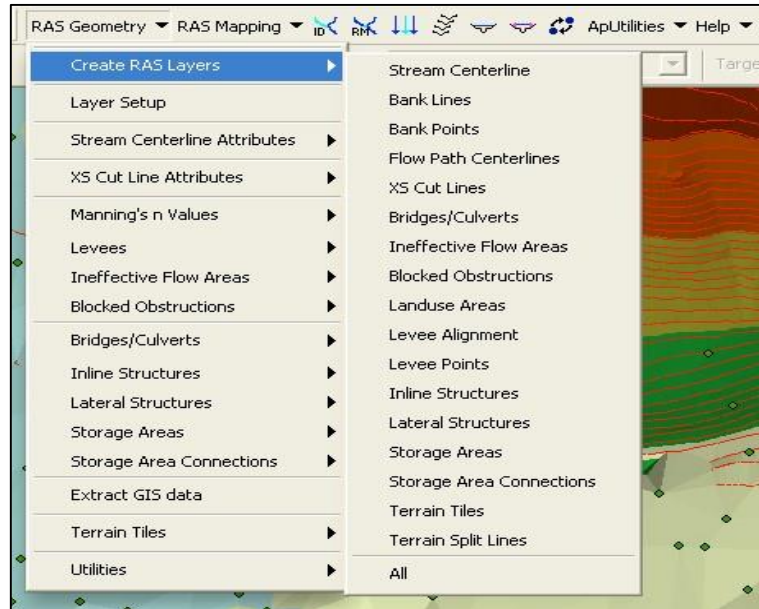


Figura 2.72: Menú plegable creación de capas en HEC-GeoRAS

**Create RAS Layer:** Crea las capas o shapes de geometría (vacíos)

**Layer Setup:** Especifica los temas para el fichero de importación

**Stream Centerline Attributes:** Añade topología y atributos al cauce del río.

**Xs Cut Line Attributes:** Añade topología y atributos a las secciones transversales

**Extract Gis Data:** Crea el archivo de importación para HEC-RAS

### 2.3.4.4 PreRAS

Los pasos básicos posteriores a la generación del MED son: (8 pasos)

**Paso 1. Dibujar el cauce (river.shp), editando el tema vacío:**

**RasGeometry/Create Ras Layer/ Stream Centerline:** introducimos el nombre o dejamos el que sale por defecto (river). Con esto se crea un fichero vectorial (de líneas) en una geodatabase (tutorial.mdb) en el que vamos a digitalizar el eje del río.

**Reglas:**

1. Las uniones entre tramos tienen que ser perfectas, es decir ningún hueco entre ellas.
2. Se digitaliza de aguas arriba a aguas abajo.

Para digitalizar y dar nombre a los tramos utilizaremos la barra de Edición





Figura 2.73: Herramienta del Editor

Pulsando sobre el desplegable Editor, elegimos la opción Start Editing y buscamos el directorio de nuestra geodatabase (river.mbd). Pulsamos OK.

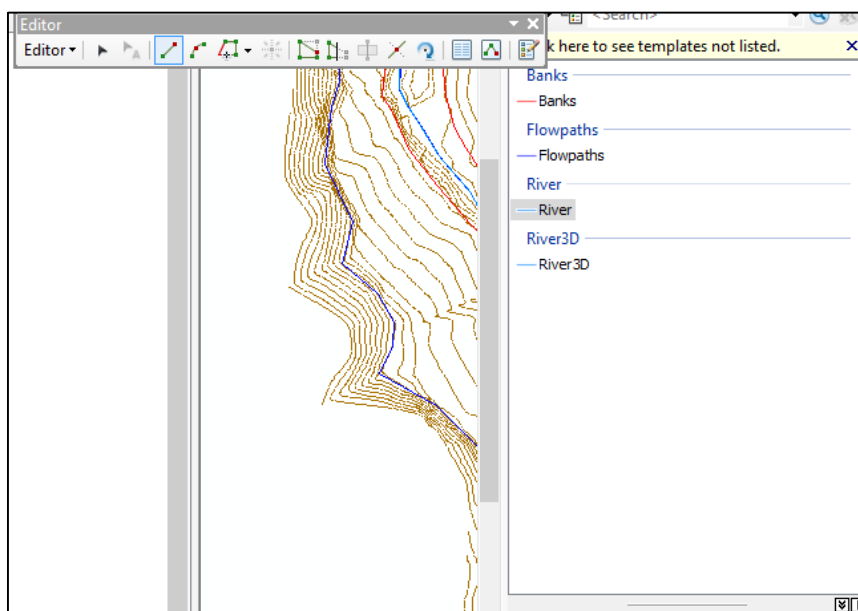


Figura 2.74: Creación y edición de cada uno de los elementos en HEC-GeoRAS

Dibuja segmentos con sucesivos click del botón izquierdo del ratón que no son más que puntos de una polilínea, para cerrar la polilínea hacer doble click sobre el botón izquierdo.

Según se va digitalizando si damos al botón derecho aparecen unas opciones muy útiles para la digitalización. Además, salir de la pantalla gráfica para hacer zoom o activar alguna capa y volver a digitalizar sin perder la digitalización. Una vez terminada la edición volviendo al desplegable Editor y seleccionamos *Stop Editing*.

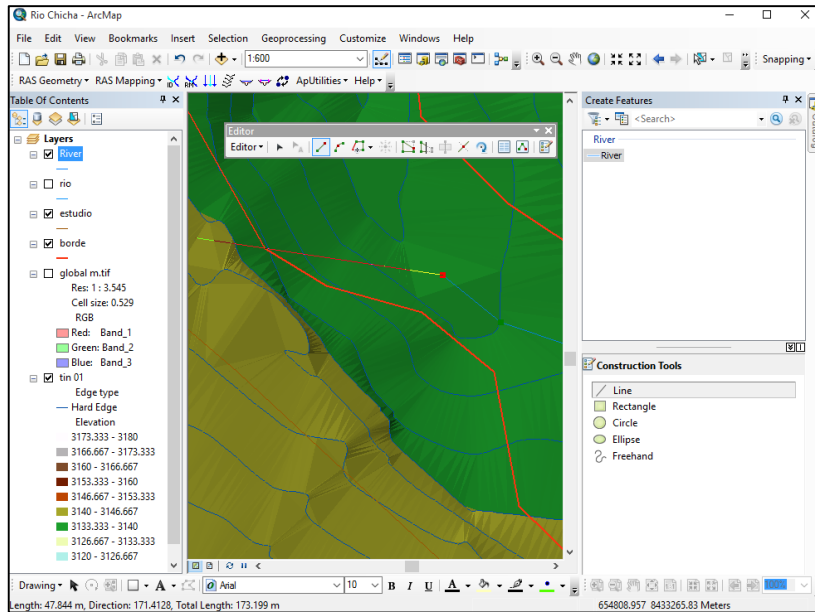


Figura 2.75: Edición del eje del cauce “river.shp”.



Cuando se han digitalizado todos los tramos hay que nombrarlos indicando el nombre del río y del tramo. Pulsando este botón, se va marcando tramo a tramo y en cada tramo se introduce el nombre del río y el del tramo. A nuestro río le damos el nombre Río Chicha y al tramo Larcay, Pulsamos OK.

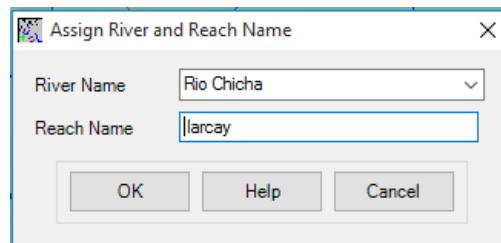


Figura 2.76: Asignación de un nombre al eje del cauce “river.shp”.



En el caso de que tengamos algún afluente debemos determinar el punto de intersección, nombrándolo con esta herramienta.

## Paso 2. Dibujar las líneas que definen los márgenes “banks”:

Desde el desplegable RAS Geometry / Create RAS Layer / Banks Lines, generamos la capa vacía y procederemos a digitalizarla de la misma forma que previamente hicimos con el eje del río. En este caso debemos comprobar que en la casilla Target se encuentra el nombre de la capa que queremos editar, en nuestro caso Banks.

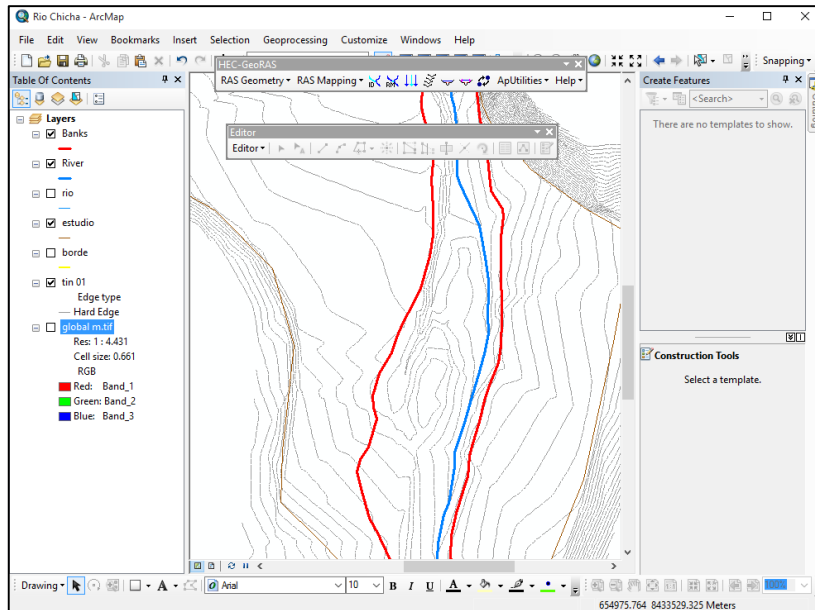


Figura 2.77: Edición de los límites del cauce o “banks.shp”.

**Paso 3. Dibujar los “flowpaths” o centroides de las zonas por donde preveamos que circulará el flujo de agua:**

RAS Geometry / Create RAS Layer / Flow Path Centerlines: El corte de estas líneas con las secciones transversales definen los puntos entre los que se medirá automáticamente, siguiendo esa línea, la distancia entre secciones por las márgenes.

**Reglas:**

1. Se deben digitalizar (de aguas arriba a aguas abajo) una línea por cada lado del río, incluyendo el eje del cauce principal (stream centerline), pero como este eje ya está hecho, es recomendable **aceptar la opción** que da el programa de copiarlo automáticamente. Elegimos SI.

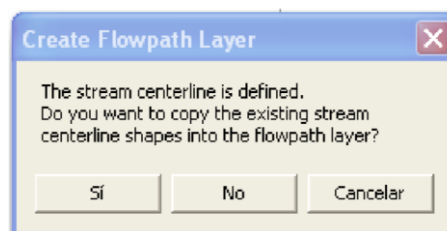


Figura 2.78: Pregunta del Software para convertir el “river.shp” en otro elemento adicional

Bastará ahora con cerciorarnos de que se toma el eje del río correcto y se le deja el nombre por defecto para los Flowpaths.

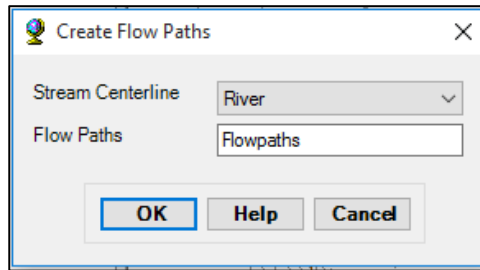


Figura 2.79: Conversión del “river.shp” en Flowpaths

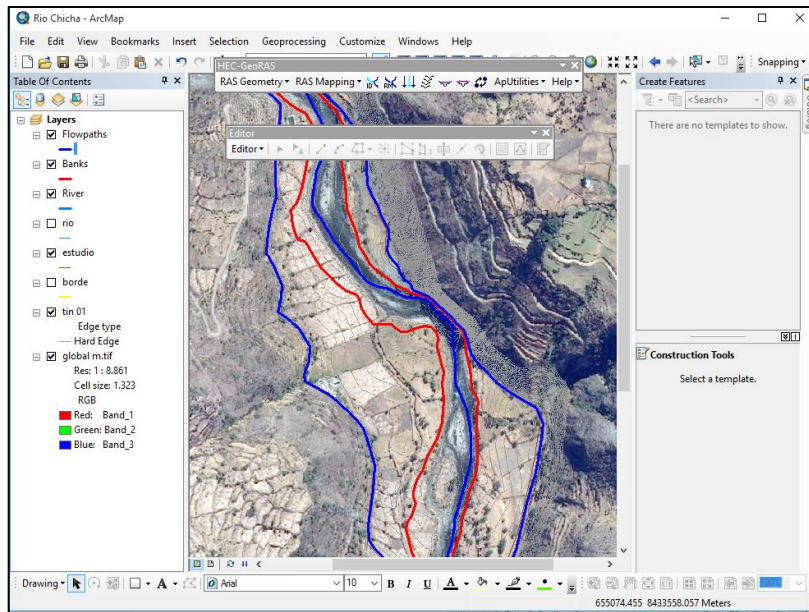


Figura 2.80: Edición de los “flowpaths.shp”.

2. Es necesario definir, para cada segmento, su situación: izquierdo (left), derecho (right) o cauce (channel).



Define la posición de “flow path centerlines”, al pulsarlo se van señalando los segmentos de línea con el cursor y en la caja de dialogo se elige la posición que corresponda.

#### Paso 4. Dibujar las secciones transversales:


RAS Geometry / Create RAS Layer / XS Cutlines. De nuevo generamos el archivo vacío al que llamaremos XSCutlines.



Figura 2.81: Creación de las secciones

**Reglas:**

- a. No se pueden cortar dos secciones.
- b. Las secciones cortan perpendicularmente al flujo, se digitaliza **desde el margen izquierdo al derecho** y deben cortar **solo una vez** tanto al eje como a los banks y a las líneas flowpaths.

La edición puede hacerse de forma manual o utilizando la herramienta automática  automática

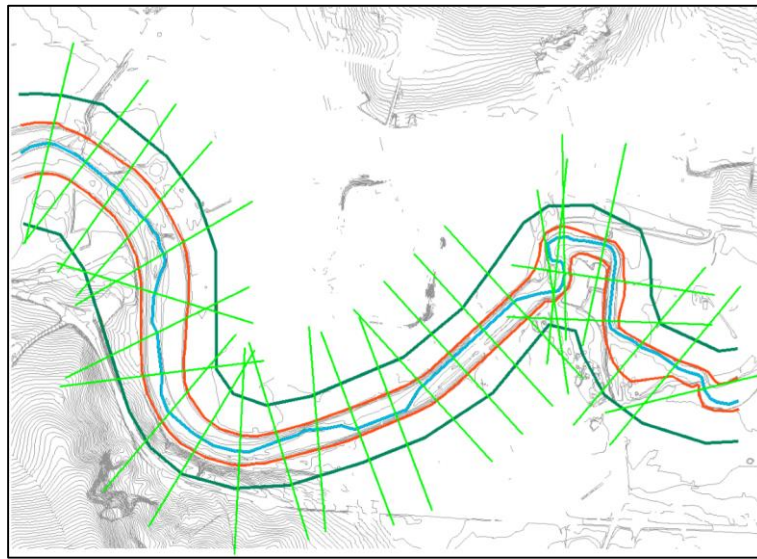


Figura 2.82: Edición de las secciones transversales o “XScutlines.shp”. en forma automática

Como se puede apreciar el resultado no es muy adecuado y habrá que modificarlo para que se cumplan las reglas anteriores. Editaremos la capa utilizando en este caso la opción Modify Feature de la ventana Task y el botón Edit tools:



Tomando esta herramienta nos vamos a una de nuestras secciones. Pulsamos con el botón izquierdo (doble clic) para seleccionar la sección a modificar. Pulsamos el botón derecho y seleccionamos Insert Vertex. Se genera un nuevo vértice. Ahora mover cualquiera de los vértices para adecuar la sección a las exigencias señaladas.

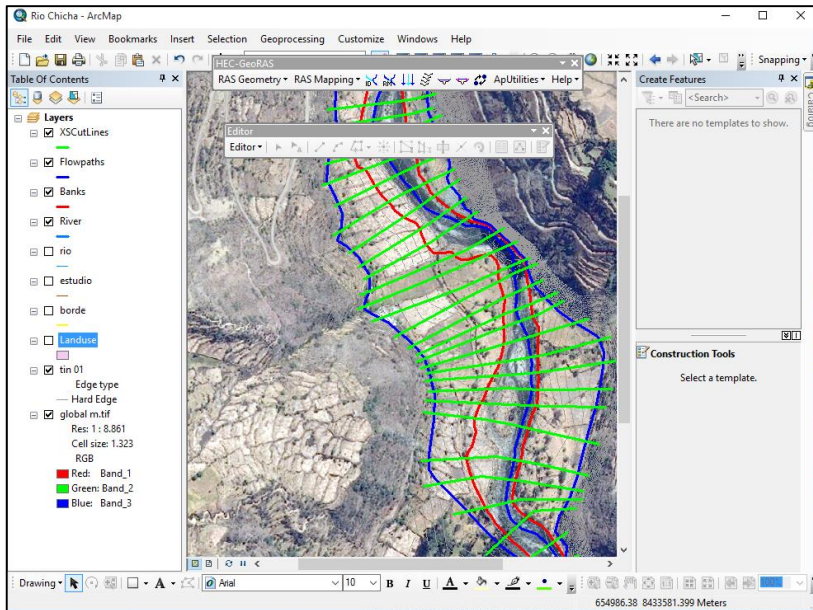


Figura 2.83: Elementos necesarios para definir la geometría del cauce.

A estos elementos les añadimos topología y la componente Z mediante nuestro MED (TIN).

**Paso 5. Añadir topología y elevación al cauce: Ras Geometry / Stream Centerline Attributes** añade información automáticamente a cada elemento, generando capas en 3 dimensiones.



Figura 2.84: Asignación de atributos al "Centerline".

Es necesario seguir el orden de ejecución que se indica (*Topology, Lengths/Station, Elevations o directamente All*) y comprobar el esperado "successfully". Se obtiene la capa river3D

**Paso 6.** De igual forma se añade topología y elevación a las secciones transversales: Ras Geometry / XS Cut Line Attributes

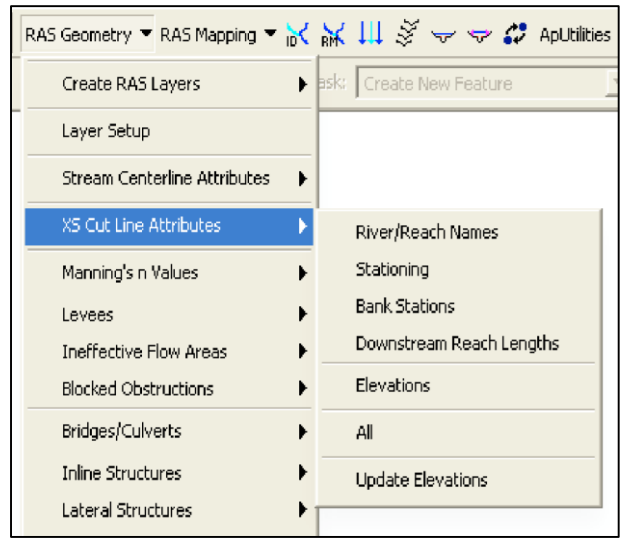


Figura 2.85: Asignación de atributos a las “Secciones”.

Se realizan las operaciones consecutivamente o directamente se elige All.

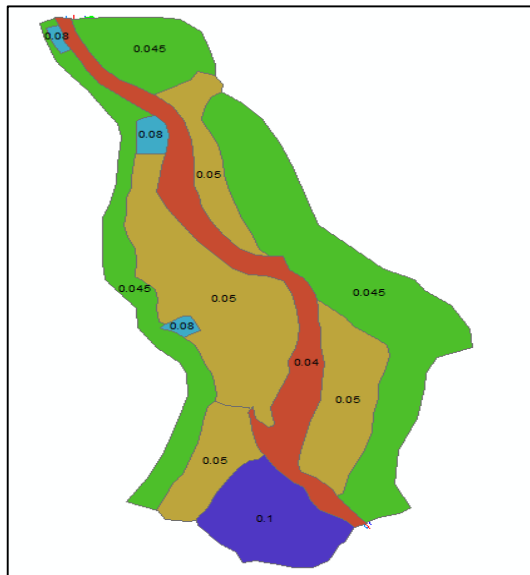


Figura 2.86: Confección de un mapa del “n” coeficiente de Manning

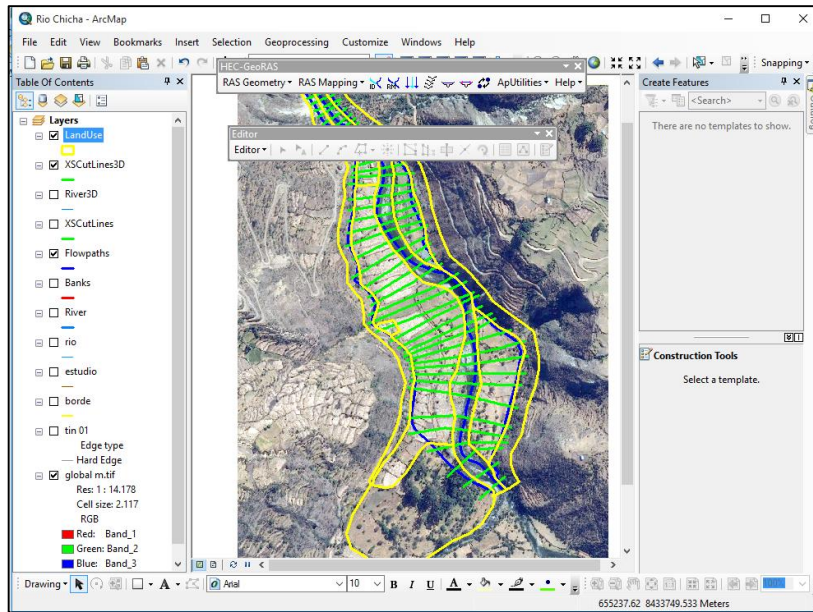


Figura 2.87: Asignación del “n” coeficiente de Manning a los cálculos

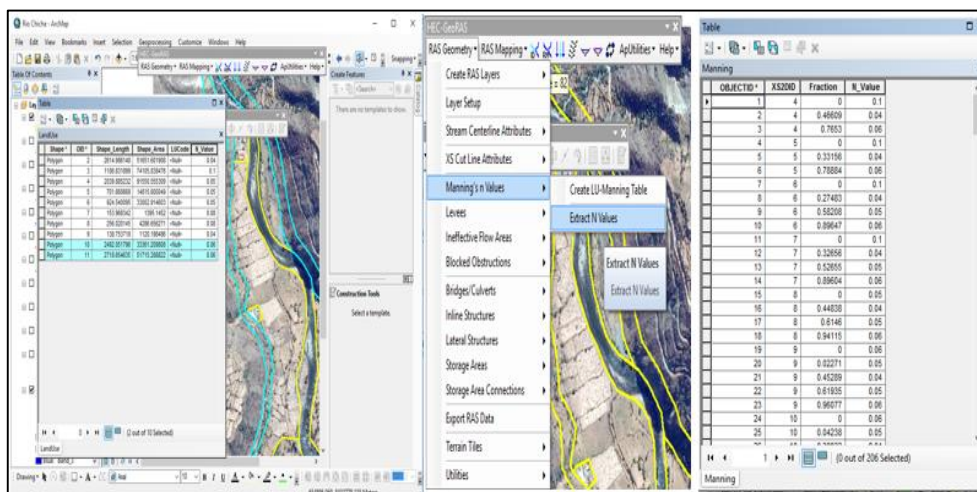


Figura 2.88: Proceso de extracción del “n” coeficiente de Manning

**Paso 7.** Comprobar las capas antes de llevarlas a HEC-RAS: **Ras Geometry / Layer Setup** nos permite visualizar los ficheros a incluir en el archivo de importación.

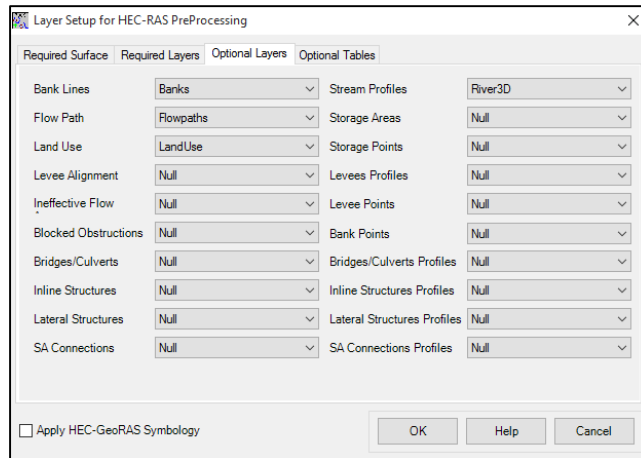


Figura 2.89: Preparación de la data requerida para la exportar del SIG.

**Paso 8.** Crear el **fichero de importación** para HEC-RAS: **Ras Geometry / Extract GIS data** que prepara el fichero que posteriormente será leído por Hec-Ras. Este fichero de texto se guarda con formato **.sdf**

Guardamos el proyecto de ArcGIS. File/ Save as... podemos llamarlo: **Río\_Chicha.mxd**

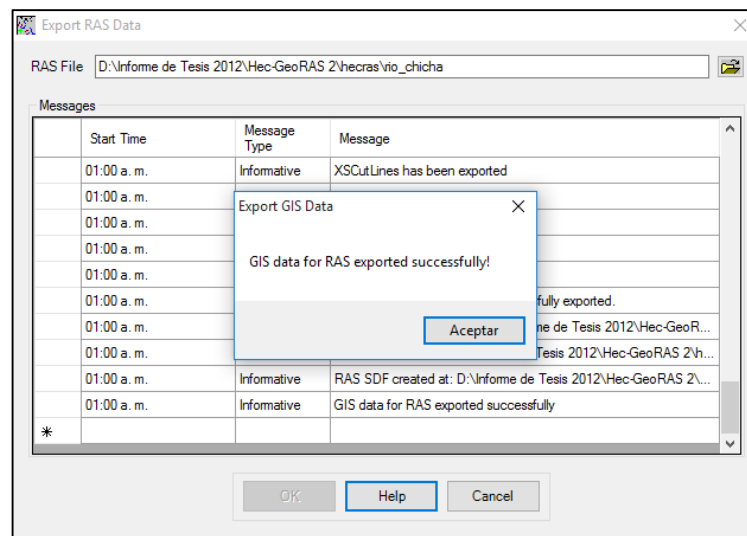


Figura 2.90: Proceso de exportación del SIG hacia el HEC-RAS

#### 2.3.4.5 Integración de HEC-GeoRAS con el HEC-RAS

Crear un nuevo proyecto (*RíoChicha.prj*) Editar la geometría: **Edit** → **Geometric Data**

Importar el archivo de geometría: **File/ Import Geometry Data/GIS format** buscando el archivo **.sdf** generado por ArcGIS.

En las opciones de importación elegir Unidades del sistema métrico **SI (metric) units**. Pulsamos *Next*.

Comprobamos los datos en la pestaña *River Reach Stream Lines*. Pulsamos *Next*

En la pestaña *Cross Sections and IB Nodes*, añadimos la información en las ventanas *Import River e Import Reach* y redondeamos el número que nos identifica las secciones. *Round Selected RS*.

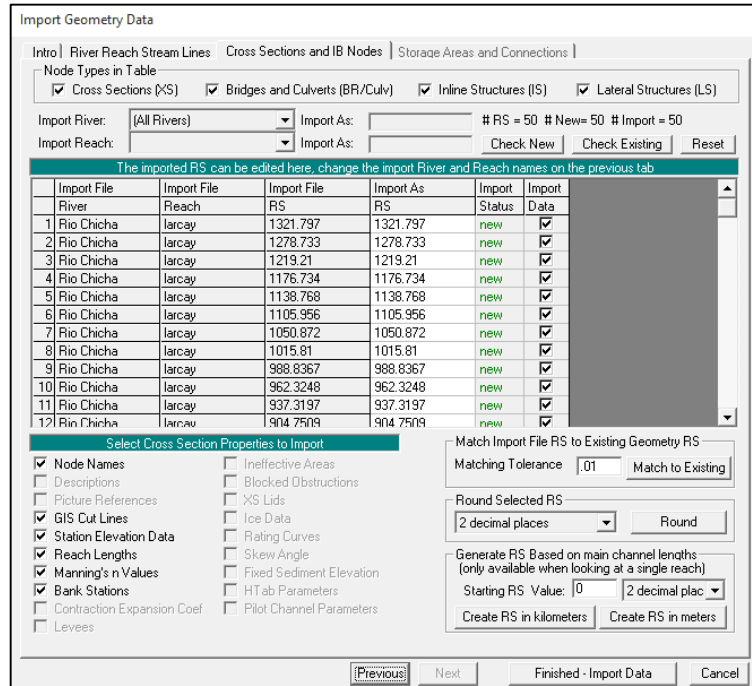


Figura 2.91: Características de la importación.

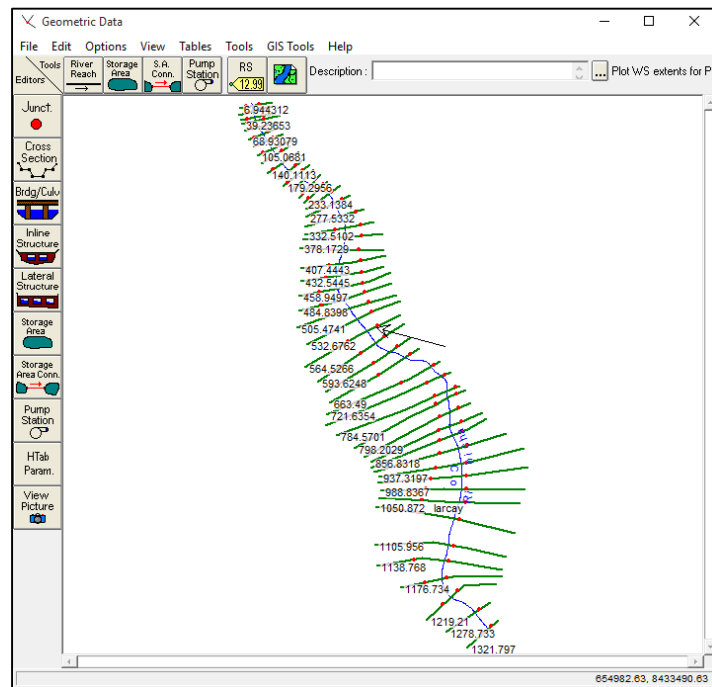


Figura 2.92: Se puede verificar la importación en la ventana de datos de geometría en HEC-RAS.

En el desplegable **Tables/Manning's n or k values...** rellenar los valores de n para el cauce y las laderas.

| River | Reach              | River Static | Frctn (n/K) | n #1 | n #2 | n #3 | n #4 | n #5 |
|-------|--------------------|--------------|-------------|------|------|------|------|------|
| 1     | Rio Chicha Jarcaay | 1321.797     | n           | 0.1  | 0.04 | 0.06 |      |      |
| 2     | Rio Chicha Jarcaay | 1278.733     | n           | 0.1  | 0.04 | 0.06 |      |      |
| 3     | Rio Chicha Jarcaay | 1219.21      | n           | 0.1  | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 4     | Rio Chicha Jarcaay | 1176.734     | n           | 0.1  | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 5     | Rio Chicha Jarcaay | 1138.768     | n           | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 6     | Rio Chicha Jarcaay | 1105.956     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 7     | Rio Chicha Jarcaay | 1050.872     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 8     | Rio Chicha Jarcaay | 1015.81      | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 9     | Rio Chicha Jarcaay | 988.8367     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 10    | Rio Chicha Jarcaay | 962.3249     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 11    | Rio Chicha Jarcaay | 937.3137     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 12    | Rio Chicha Jarcaay | 904.7509     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 13    | Rio Chicha Jarcaay | 876.6505     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 14    | Rio Chicha Jarcaay | 856.8318     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 15    | Rio Chicha Jarcaay | 828.5414     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 16    | Rio Chicha Jarcaay | 798.2029     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |
| 17    | Rio Chicha Jarcaay | 784.5701     | n           | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |
| 18    | Rio Chicha Jarcaay | 750.0453     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |
| 19    | Rio Chicha Jarcaay | 721.6354     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |
| 20    | Rio Chicha Jarcaay | 683.49       | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 21    | Rio Chicha Jarcaay | 629.8273     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 22    | Rio Chicha Jarcaay | 593.6248     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 23    | Rio Chicha Jarcaay | 564.5266     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 24    | Rio Chicha Jarcaay | 532.6762     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 25    | Rio Chicha Jarcaay | 505.4741     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 26    | Rio Chicha Jarcaay | 484.8398     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 27    | Rio Chicha Jarcaay | 458.9497     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 28    | Rio Chicha Jarcaay | 432.5445     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 29    | Rio Chicha Jarcaay | 407.4443     | n           | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 30    | Rio Chicha Jarcaay | 378.1729     | n           | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| 31    | Rio Chicha Jarcaay | 351.4695     | n           | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 32    | Rio Chicha Jarcaay | 332.5102     | n           | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |

Figura 2.93: Verificación del “n” coeficientes de Manning, en los datos importados

Desde **Tools/Graphical Cross Section Edit...** visualizar y corregir las secciones transversales, añadir niveles, áreas inefectivas de flujo.

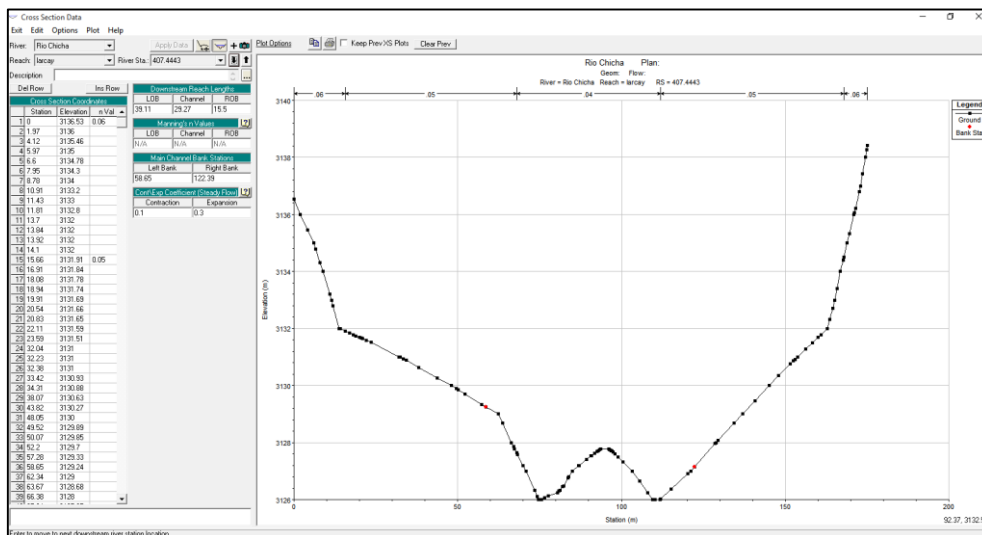


Figura 2.94: Verificación de la geometría de las secciones importadas

Salvar el archivo de geometría **File/Save Geometry Data** (Geometría río Chicha)

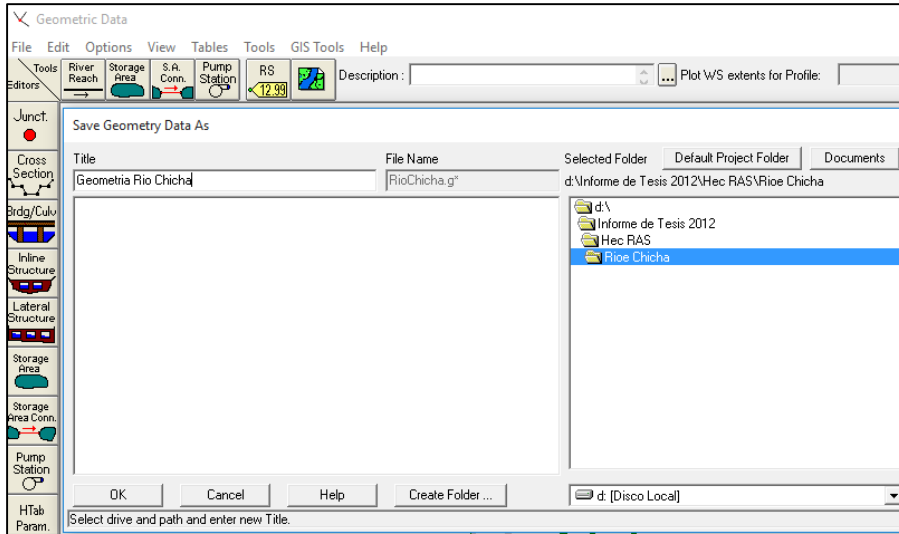


Figura 2.95: Guardar la geometría importada.

Editar los datos hidráulicos **Edit/Steady Flow Data**:

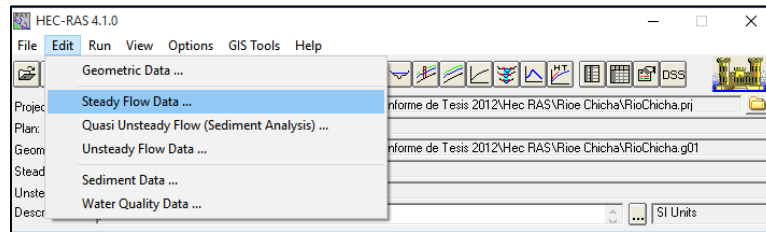


Figura 2.96: Edición de las condiciones de caudal para la simulación respectiva.

Rellenar los Caudales para cada período de retorno y elegir las condiciones de contorno **Reach boundary Condition**.

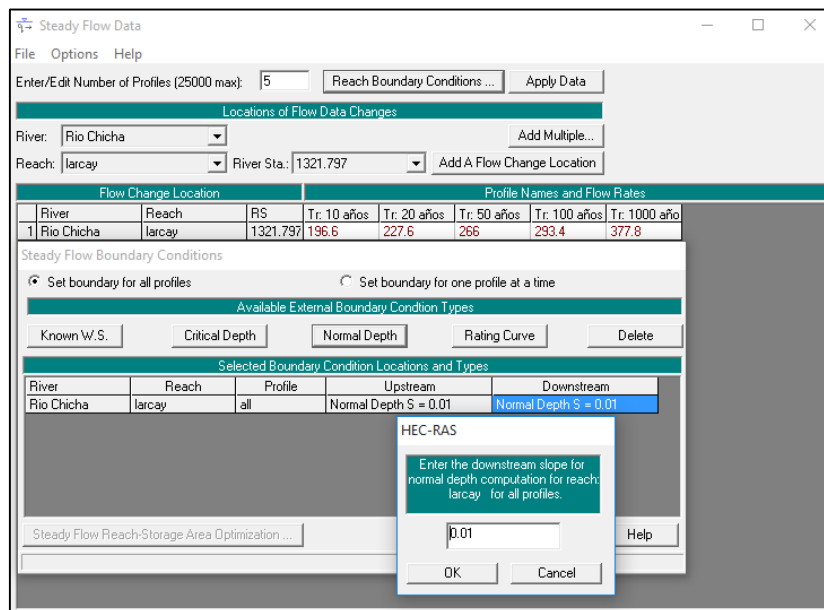


Figura 2.97: HEC-RAS: Edición de los datos de flujo.

Salvar el archivo de datos de flujo **File/Save Flow Data** (Caudales)

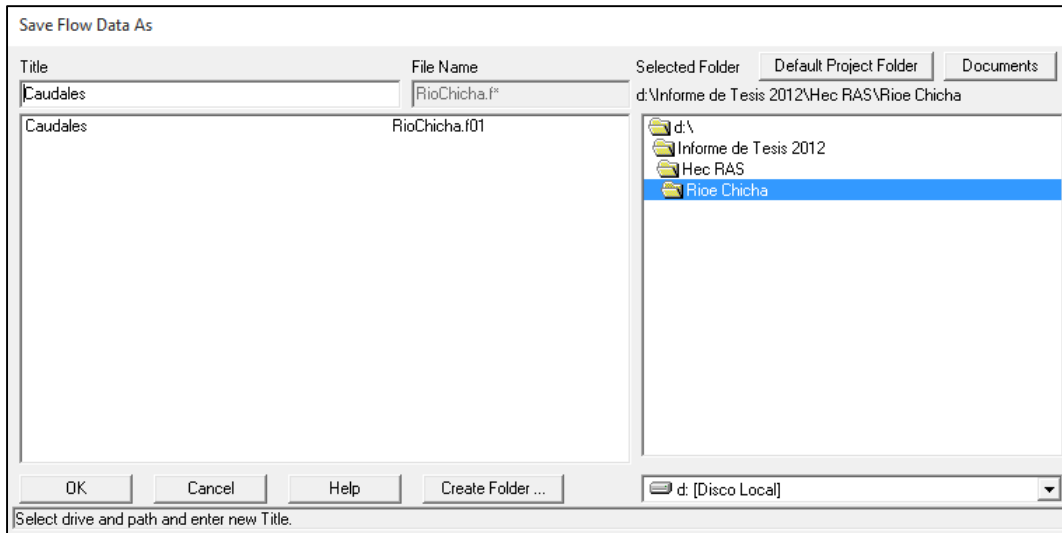


Figura 2.98: Salvar los datos de flujo.

Correr el modelo **Run** → **Steady Flow Analysis** escogiendo siempre el régimen de flujo Mixto y revisar las salidas:

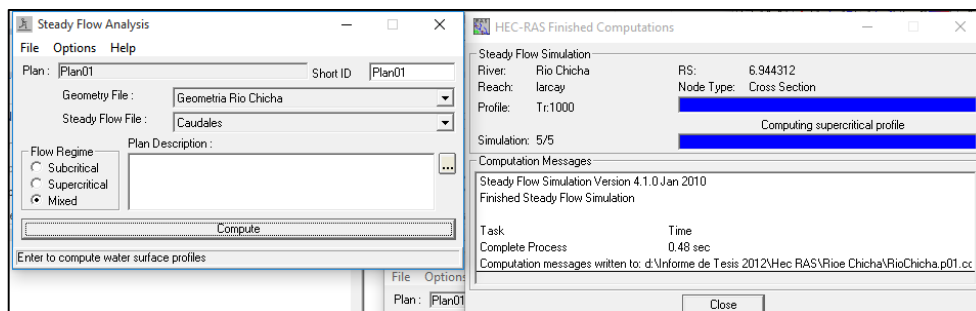


Figura 2.99: Creación de un plan de simulación y su posterior ejecución

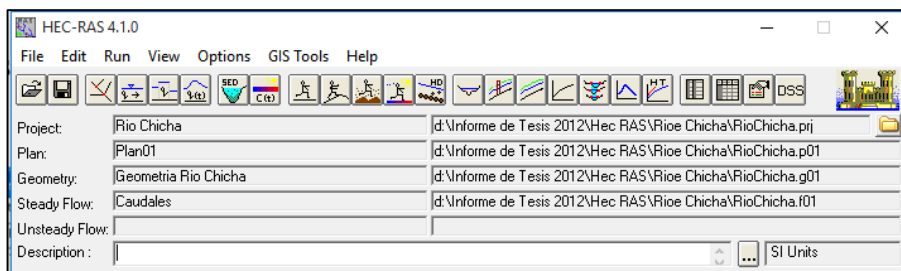


Figura 2.100: Verificación de los datos ingresados y ejecutados.

Revisamos de nuevo las secciones, añadimos *leeves*, movemos los *banks*...

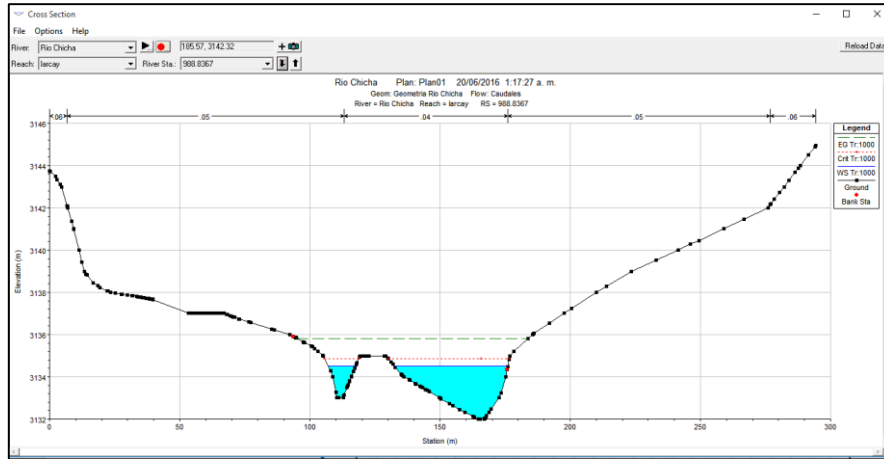


Figura 2.101: Nueva revisión de las secciones transversales con los niveles de inundación.

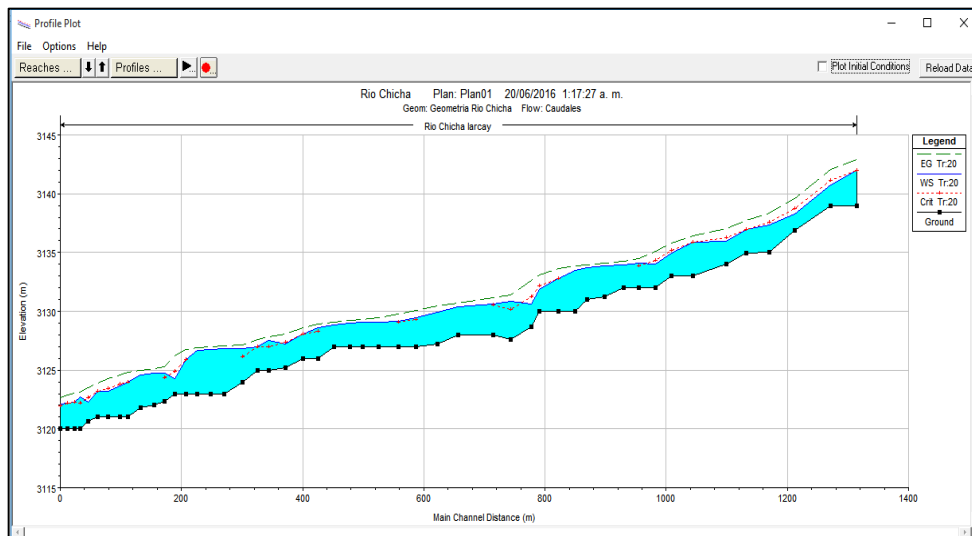


Figura 2.102: Vista de perfil y los elementos hidráulicos para su interpretación

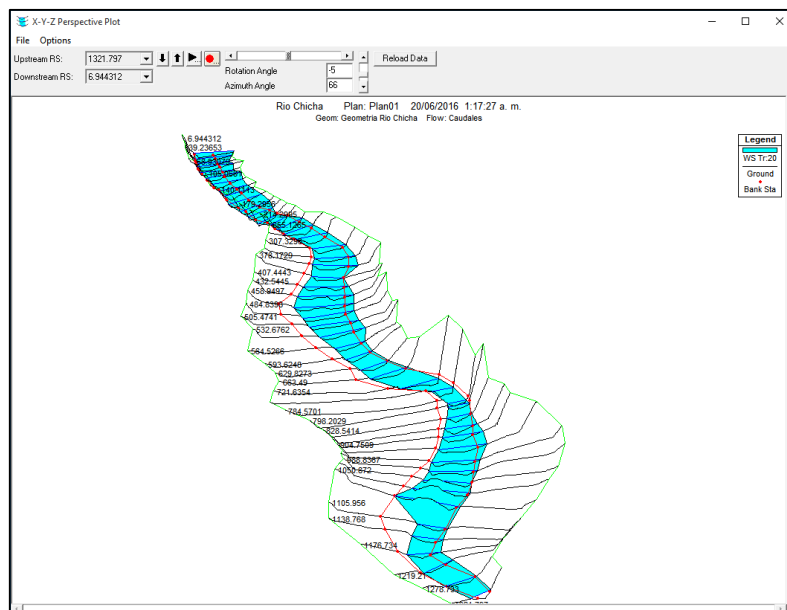


Figura 2.103: Vista isométrica de los elementos hidráulicos para su interpretación

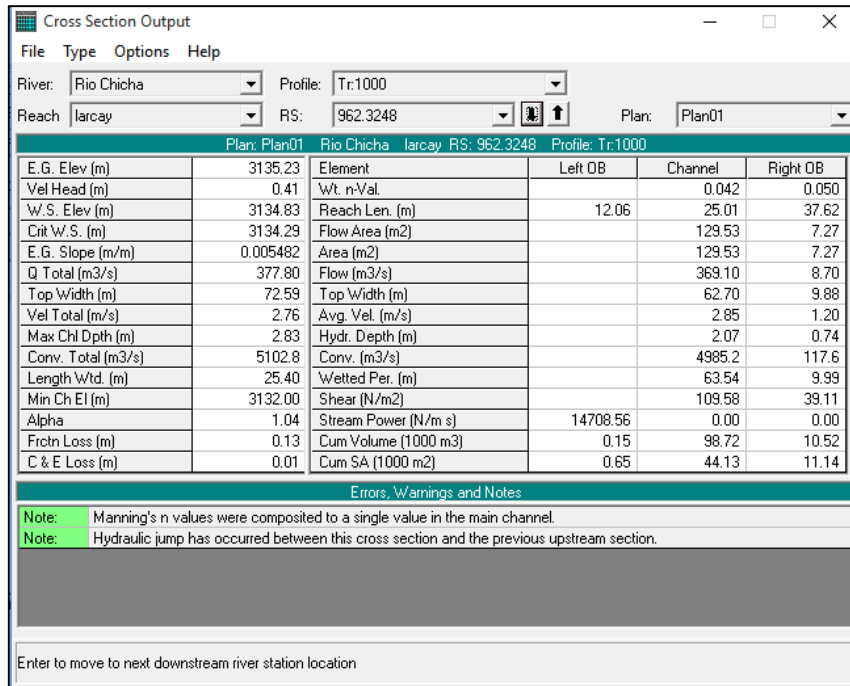


Figura 2.104: Resultados de la hidráulica por sección

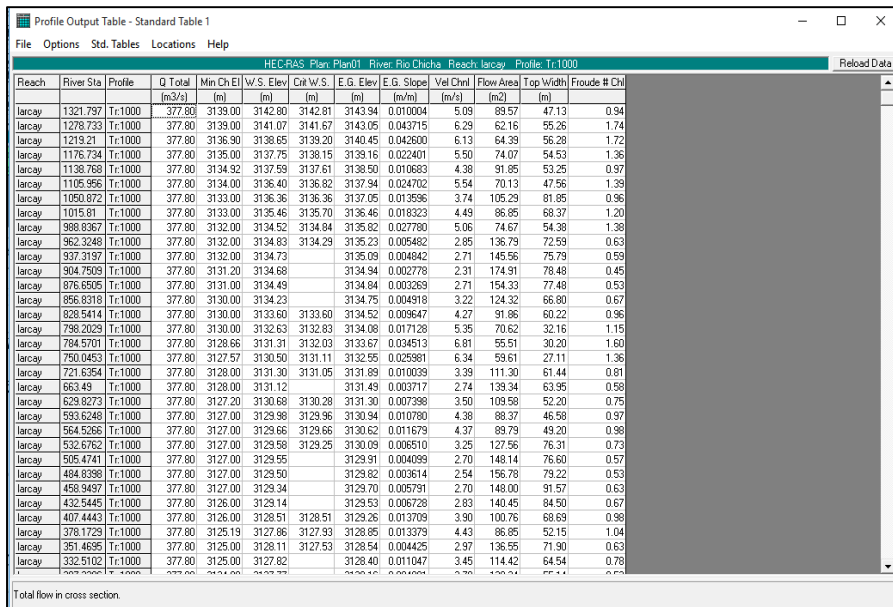


Figura 2.105: Resultados de la hidráulica por múltiples secciones.

Una vez hechas las correcciones podemos guardar y generar el archivo de exportación **File** → **export GIS Data** (*RíoChicha.RASexport.sdf*). para poder terminar la modelización desde ArcGIS.

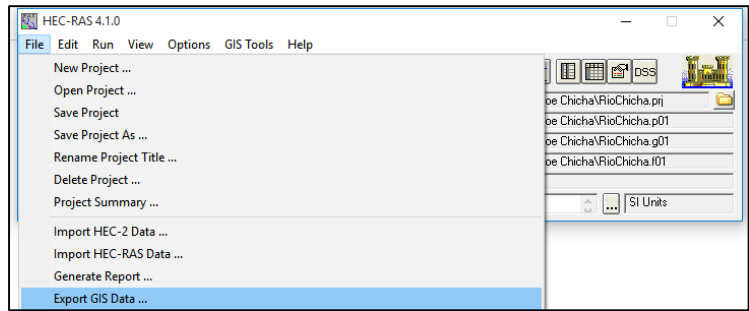


Figura 2.106: Preparación de la data para exportar al SIG

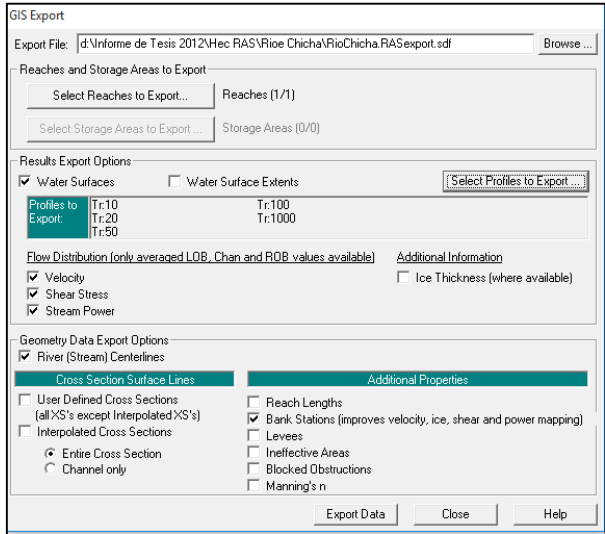


Figura 2.107: Preparación de la data para exportar al SIG

2.3.4.6 Post RAS.



Permite convertir el archivo SDF a XML para su correcta lectura desde HEC-RAS

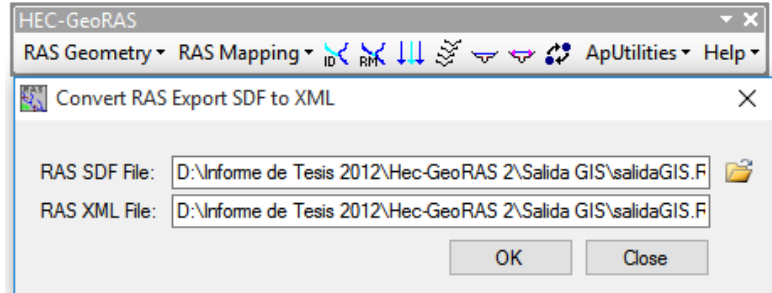


Figura 2.108: Conversión de la data exportada dentro del SIG, para el Post RAS

Desde el desplegable RAS Mapping elegir Layer setup y buscar los datos que se solicitan.

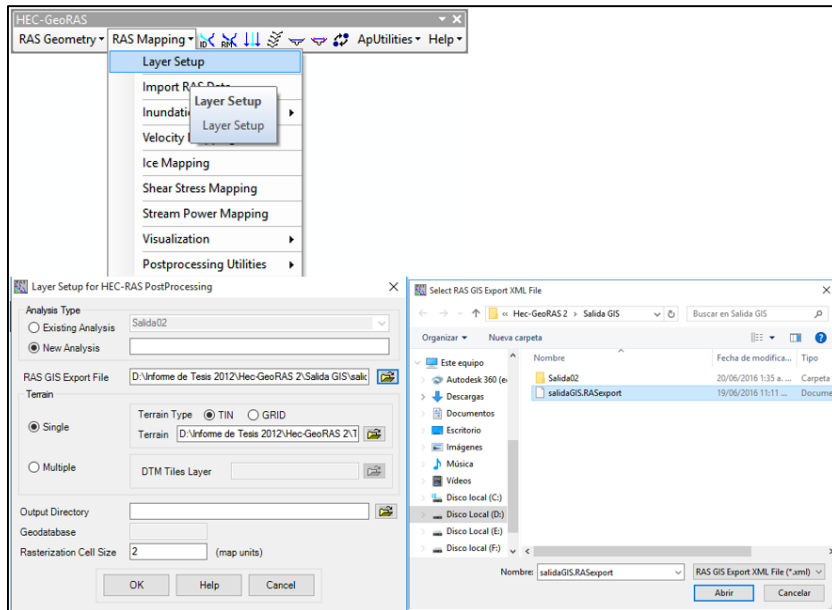


Figura 2.109: Proceso de transformación de la data dentro del SIG, para su visualización

En **output directory** introducir un nombre sencillo, con ruta de disco corta y sin espacios ni acentos. El último apartado **Rasterization Cell size** se refiere al tamaño de pixel que tendrán los datos resultantes

El fichero de exportación de HEC-RAS (en formato .sdf debemos convertirlo a .xml., para ello usamos la barra de herramientas de la extensión HEC- GeoRAS.

Al pulsar OK se genera un nuevo Data Frame llamado SALIDA 02

Desde el desplegable **RAS Mapping** elegimos **Read RAS GIS Export file**.

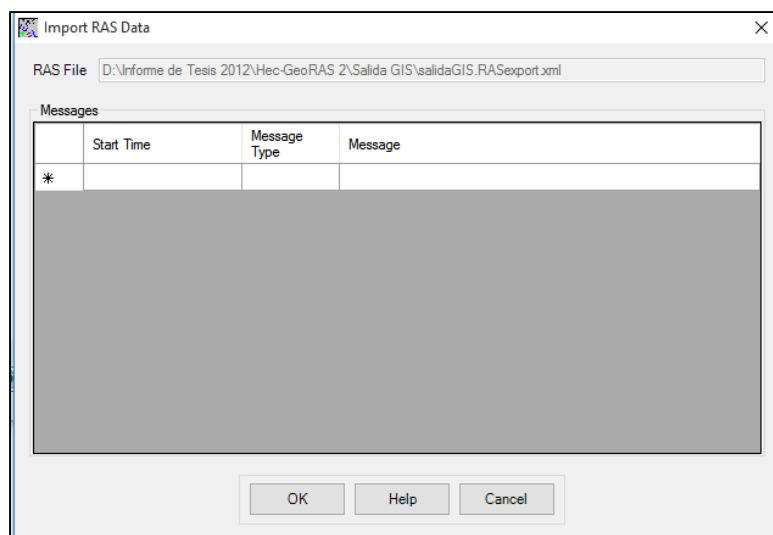


Figura 2.110: Finalización de la transformación entorno SIG.

Al leer el archivo de exportación. **SalidaGIS.RASexport.xml**, se generan una serie de capas y los coloca en la vista, en una nueva data frame. Entre ellos el tin, y unos ficheros vectoriales BP (Bounding Polygons), que son la superficie máxima de ocupación de las

secciones transversales (habrá tantos de estos BP como perfiles haya, y lógicamente serán idénticos)

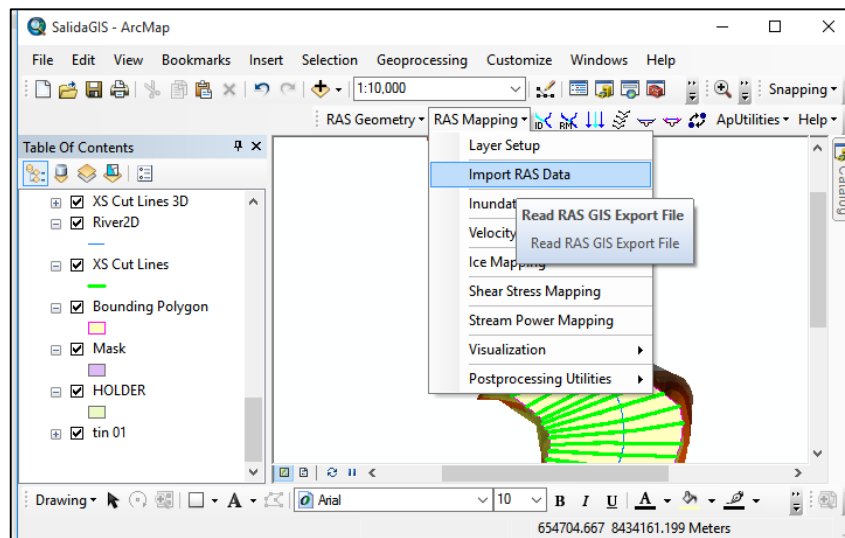


Figura 2.111: Resultado de la lectura del archivo de exportación.

#### 2.3.4.7 Creación de mapas de inundación del tramo baños termales de Larcay

Con **RAS Mapping**→**Inundation Mapping**→**Water Surface Generation**, el tin va a ser recortado por “bounding polygon”. En la ventana de dialogo que aparece debemos seleccionar el perfil que deseemos y pulsar OK.

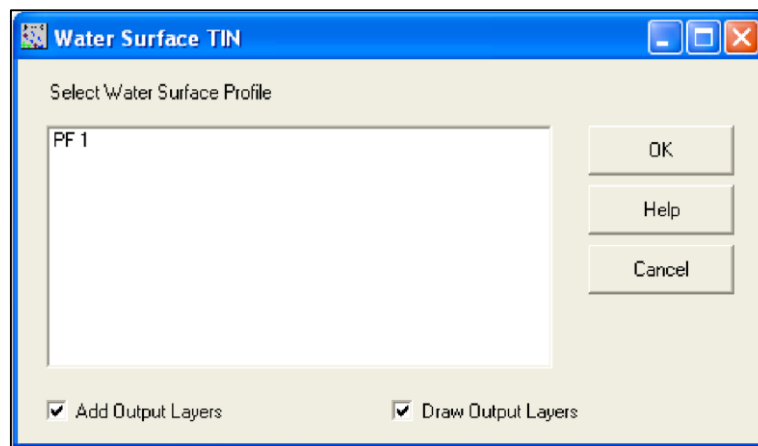
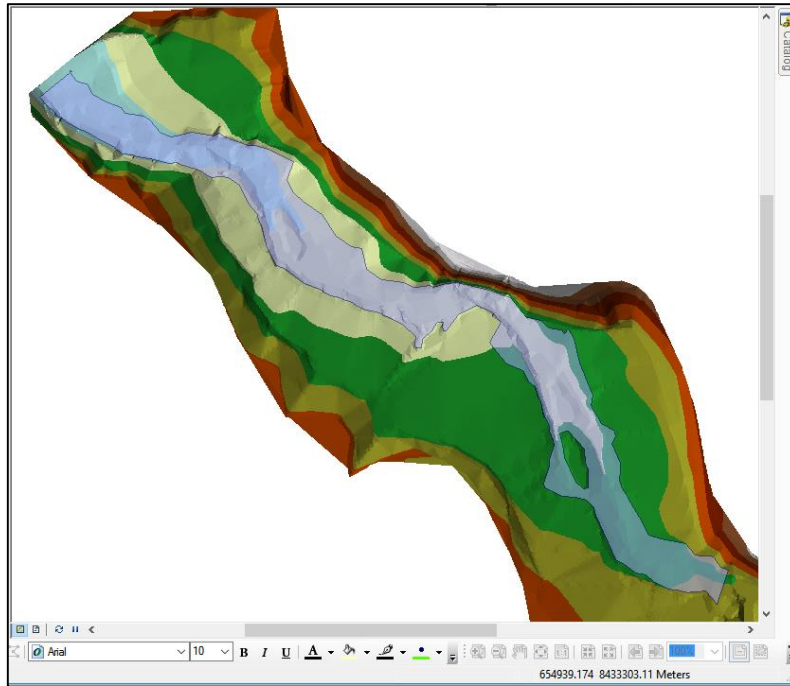


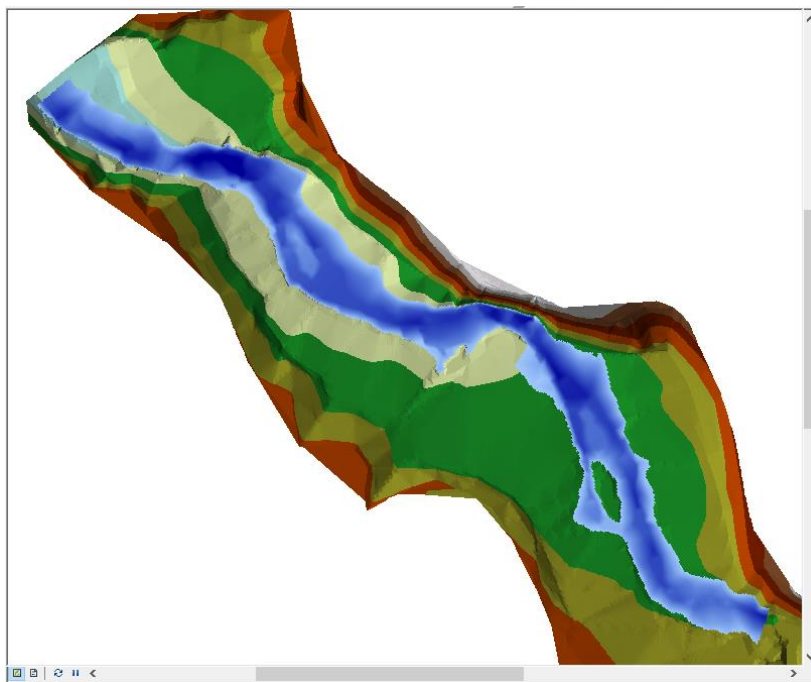
Figura 2.112: Proceso de conversión a planicies de inundación para cada plan

**RAS Mapping** → **Inundation Mapping** → **Floodplain Delineation**, En este proceso se crearán las zonas de inundación para cada perfil, es decir para cada caudal que se haya establecido en HEC-RAS.



*Figura 2.113: Llanura de inundación para el período de retorno considerado*

Además, se genera un grid con el calado o profundidad en cada punto de la llanura de inundación que podemos simbolizar con los intervalos que deseemos.



*Figura 2.114: Grid de profundidad*



*Figura 2.115: Finalización de la elaboración de planicies de inundación con fondo de una orthoimagen.*



*Figura 2.116: Evaluación de los resultados*

### III. RESULTADOS

- 1) Luego de realizar el procesamiento de la data en el entorno SIG, se pudo obtener como resultado un conjunto de sub cuencas, desagregado de acuerdo a la topografía y orden de los ríos, los cuales se muestran en la (Fíg. 3.1) y el plano EH-09 lamina N° 11.

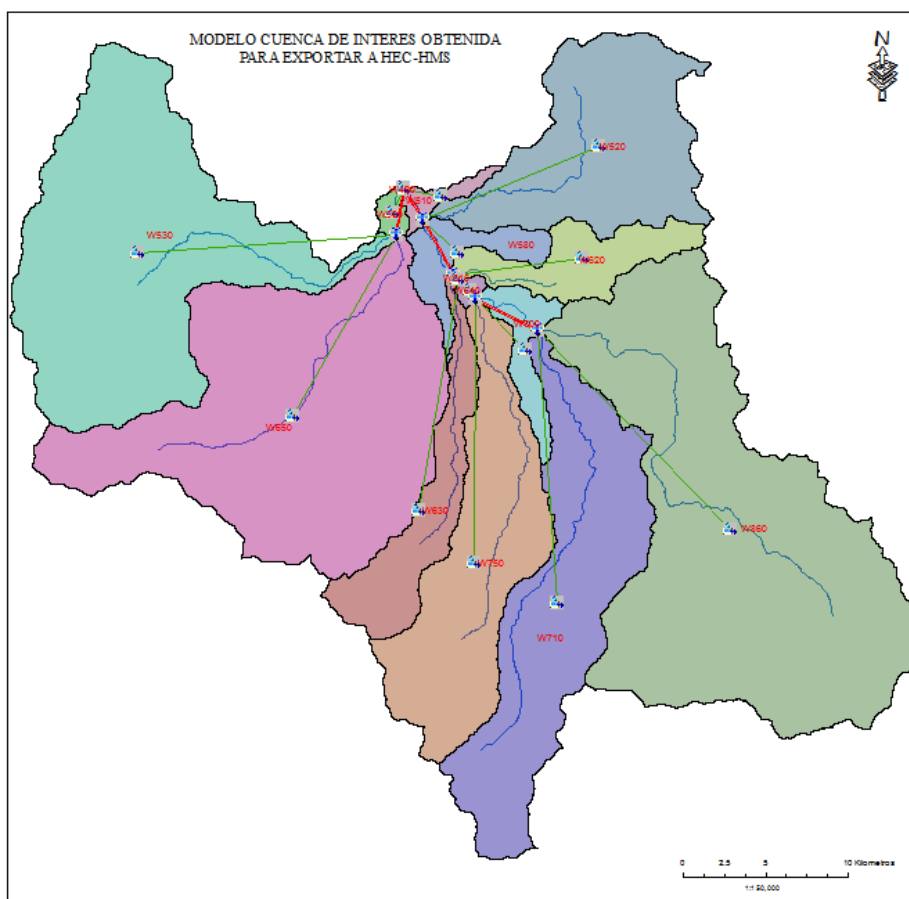


Figura 3.1: Cuenca y subcuencas del río Chicha, Sucre – Ayacucho, obtenidas con el HEC-GeoHMS

El modelo fue definido, siguiendo el método del Número de Curva del SCS, donde se asigna un número hidrológico (W) a cada subcuenca. Se obtuvieron las siguientes informaciones:

**Modelo de la cuenca (Basin model):**

Para representar el sistema físico de la cuenca Chicha, disponemos de los siguientes elementos:

- Subcuencas (subbasins): no reciben flujo entrante y dan lugar a un único flujo saliente.
- Tramos de tránsito (reach): reciben flujos entrantes y generan un solo flujo saliente.
- Uniones (junctions): permiten representar la confluencia de arroyos.

**Número de curva (CN):**

El valor de CN correspondiente a cada unidad hidrológica. La microcuenca de estudio presenta gran variedad de sustratos y diferentes formaciones vegetales. Cada uno de estos complejos suelo-vegetación se comporta de manera diferente frente a la infiltración. Por tanto, la primera labor a realizar para el cálculo del número de curva es delimitar Unidades paisajísticas a partir de la cartografía edáfica y vegetal (elaboración propia mediante el estudio edafológico y realización del inventario forestal respectivamente). Conocido el número de curva para cada complejo suelo-vegetación, hay que calcular el valor característico para cada unidad hidrológica. Se realiza mediante la media ponderada en función de la superficie.

**Porcentaje de impermeabilidad de la subcuenca:**

Consideramos que hay superficie impermeable, en un porcentaje de 5 a 15% por cada subcuenca asumiendo su valor será 10%.

**Transformación de la escorrentía superficial en caudales:**

Hidrograma para este cálculo se utiliza generalmente el método del “hidrograma unitario”. El hidrograma empleado en la cuenca “Chicha” ha sido el SCS, que requiere únicamente de un término (tiempo de retardo) para transformar la escorrentía en caudal. El tiempo de retardo (lag time) viene expresado en minutos. (parámetros físicos obtenidos con el apoyo de los sistemas de información geográfica).

### **Tránsito de caudales a través de los cauces:**

El tránsito de los caudales (routing) a través de canales es otro de los puntos críticos de la simulación con el programa HEC-HMS. Para calcular la laminación en cauces, seguimos el método de Muskingum-Cunge. Necesitaremos la siguiente información:

- Longitud (Length): de cada tramo de laminación en metros.
- Pendiente (Slope): de cada arroyo en tanto por uno.
- Coeficiente de rugosidad de Manning (n): según la ecuación de Chow (1956).
- Geometría de la sección transversal (shape): nos encontramos con secciones trapezoidales (las más frecuentes).
- Anchura del cauce (bottom width): indica la sección en metros del fondo del cauce. Únicamente necesario en secciones de geometría trapezoidal.
- Pendiente lateral (side slope): pendiente de los márgenes del cauce en tanto por uno.

Toda esta información se obtuvo gracias al trabajo con herramientas de información geográfica.

A continuación, se presenta los valores numéricos de los cálculos realizados en las subcuencas y los ríos, (Tabla 3.1 y 3.2) con sus respectivos parámetros, que requiere el modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica y la obtención del hidrograma de máxima avenida.

Tabla 3.1: Características morfométricas de las sub cuencas del río Chicha

| <b>FID</b> | <b>Shape</b> | <b>HydroID</b> | <b>Name</b> | <b>BasinSlope</b> | <b>LossMet</b> | <b>TransMet</b> | <b>BaseMet</b>   | <b>InitAbst</b> | <b>BasinCN</b> | <b>LagMethod</b> | <b>Tc (min)</b> | <b>BasinLag (min)</b> | <b>Area_HMS (km<sup>2</sup>)</b> |
|------------|--------------|----------------|-------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1          | Polygon      | 49             | W490        | 10.347            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 6.278652        | 89.00          | CNLag            | 4.0             | 2.4                   | 0.01                             |
| 2          | Polygon      | 50             | W500        | 38.603            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 8.372562        | 85.85          | CNLag            | 27.0            | 16.2                  | 4.49                             |
| 3          | Polygon      | 51             | W510        | 26.370            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 13.492851       | 79.01          | CNLag            | 55.0            | 33.0                  | 7.17                             |
| 4          | Polygon      | 52             | W520        | 16.520            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 10.756406       | 82.53          | CNLag            | 179.0           | 107.4                 | 121.36                           |
| 5          | Polygon      | 53             | W530        | 15.240            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 262.0           | 157.2                 | 242.81                           |
| 6          | Polygon      | 58             | W580        | 15.710            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 71.0            | 42.6                  | 23.79                            |
| 7          | Polygon      | 61             | W610        | 14.213            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 10.0            | 6.0                   | 0.23                             |
| 8          | Polygon      | 62             | W620        | 14.089            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 12.171291       | 80.67          | CNLag            | 112.0           | 67.2                  | 39.71                            |
| 9          | Polygon      | 63             | W630        | 19.847            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 117.0           | 70.2                  | 54.32                            |
| 10         | Polygon      | 64             | W640        | 30.614            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 21.0            | 12.6                  | 2.46                             |
| 11         | Polygon      | 65             | W650        | 14.843            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.172538       | 78.19          | CNLag            | 197.0           | 118.2                 | 278.65                           |
| 12         | Polygon      | 70             | W700        | 19.110            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 113.0           | 67.8                  | 19.43                            |
| 13         | Polygon      | 71             | W710        | 23.806            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.254293       | 78.09          | CNLag            | 283.0           | 169.8                 | 159.65                           |
| 14         | Polygon      | 75             | W750        | 20.226            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 14.328205       | 78.00          | CNLag            | 204.0           | 122.4                 | 129.70                           |
| 15         | Polygon      | 86             | W860        | 15.619            | SCS            | SCS             | Monthly Constant | 13.958095       | 78.45          | CNLag            | 305.0           | 183.0                 | 341.65                           |
|            |              |                |             |                   |                |                 |                  |                 |                |                  |                 |                       | <b>1425.42</b>                   |

Tabla 3.2: Características de los ríos de las sub cuencas del río Chicha

| OBJ. | Shape *  | Name | RivLen_HMS<br>(m) | HydroID | Slp   | ElevUP_HMS | ElevDS_HMS | ChnShapeMusk | ChnWidth | ChnSdSlp | ChnManN | RouteMet        |
|------|----------|------|-------------------|---------|-------|------------|------------|--------------|----------|----------|---------|-----------------|
| 1    | Polyline | R10  | 3034.95           | 1       | 0.011 | 3907.70    | 3873.60    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 2    | Polyline | R50  | 16.10             | 5       | 0.001 | 3135.40    | 3134.40    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 3    | Polyline | R60  | 2450.38           | 6       | 0.036 | 3222.90    | 3134.40    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 4    | Polyline | R70  | 14789.33          | 7       | 0.044 | 3873.60    | 3222.90    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 5    | Polyline | R100 | 3336.53           | 10      | 0.071 | 3370.00    | 3134.40    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 6    | Polyline | R120 | 4658.34           | 12      | 0.031 | 3366.10    | 3222.90    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 7    | Polyline | R130 | 442.13            | 13      | 0.001 | 3367.10    | 3366.10    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 8    | Polyline | R160 | 7153.39           | 16      | 0.050 | 3722.30    | 3366.10    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 9    | Polyline | R180 | 1947.07           | 18      | 0.008 | 3382.60    | 3366.10    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 10   | Polyline | R220 | 5123.91           | 22      | 0.022 | 3497.40    | 3382.60    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 11   | Polyline | R370 | 18974.55          | 37      | 0.038 | 4094.00    | 3366.10    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 12   | Polyline | R240 | 35059.59          | 24      | 0.019 | 4166.50    | 3497.40    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 13   | Polyline | R320 | 32600.65          | 32      | 0.023 | 4246.30    | 3497.40    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 14   | Polyline | R260 | 25122.59          | 26      | 0.031 | 4167.80    | 3382.60    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 15   | Polyline | R110 | 24590.91          | 11      | 0.033 | 4170.80    | 3370.00    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
| 16   | Polyline | R150 | 20917.28          | 15      | 0.028 | 3951.60    | 3370.00    | Trapezoid    | 38.8     | 0.125    | 0.046   | Muskingum Cunge |
|      |          |      | <b>200217.69</b>  |         |       |            |            |              |          |          |         |                 |

- 2) Una vez obtenido los paramétricos morfométricos y morfológicos de las subcuencas y ríos, se procedió a la exportación, de esta manera logrando integrar en forma satisfactoria al modelo HEC-HMS 4.0, con la finalidad de completar la simulación hidrológica para los distintos períodos de retorno, planteados en el objetivo.

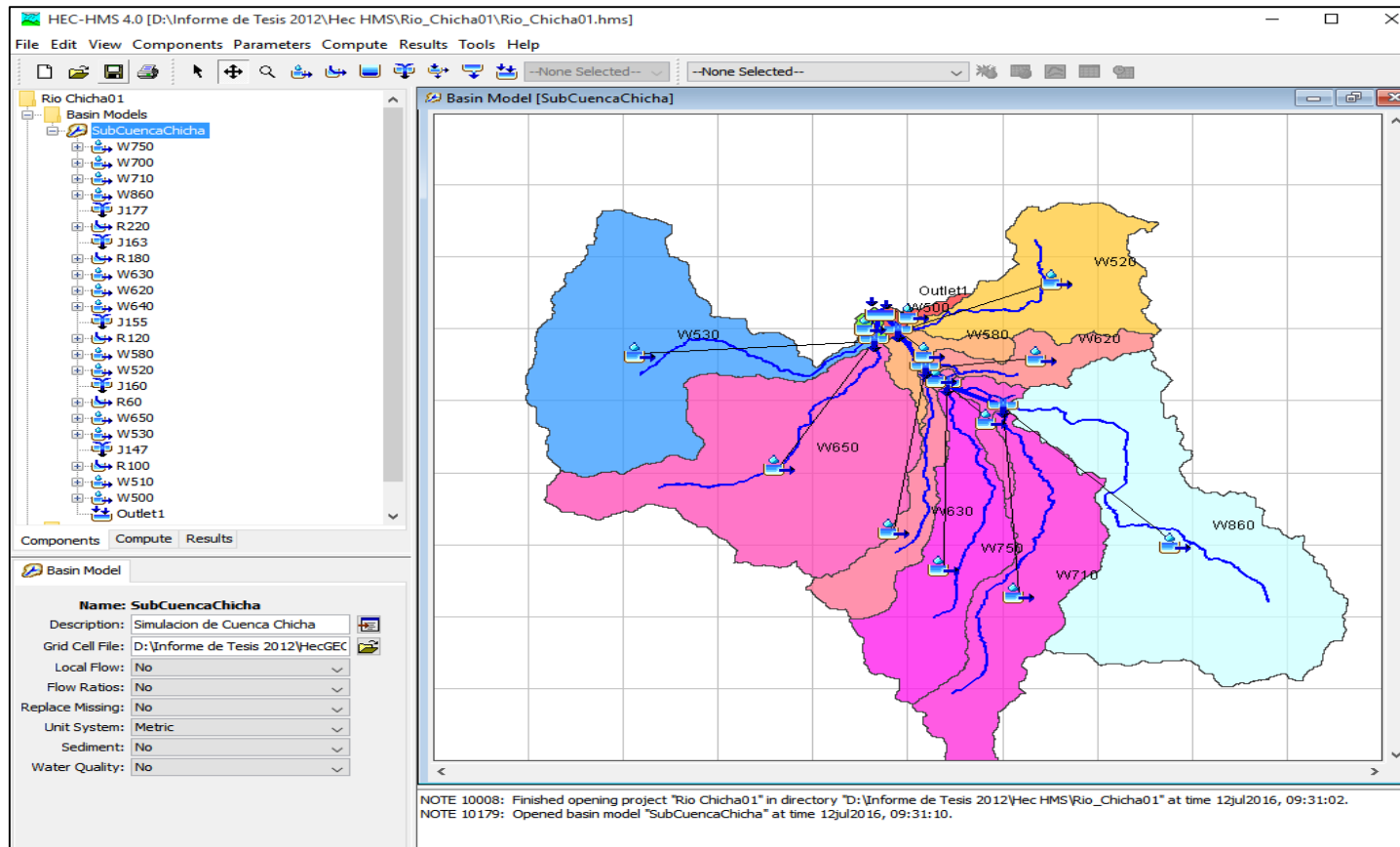


Figura 3.2: Modelo Hidrológico de la cuenca entorno HEC-HMS

- 3) Se completó la variable de hietograma de precipitación, para la obtención de la escorrentía superficial. Para el caso del presente trabajo de investigación, se tuvo como dato disponible solo las precipitaciones máximas en 24 horas, registrados por SENAMHI de las siguientes estaciones meteorológicas circundantes. A los cuales se tuvo que hacer los tratamientos estadísticos para obtener el siguiente cuadro.

*Tabla 3.3: Precipitaciones para distintos períodos de retorno*

| N°               | ESTACIÓN                 | ESTE                    | NORTE                    | ALT.               | PP.<br>Max<br>24<br>Hr | PP. Max en 24 Hr para TR: años |                     |                     |                     |                     |
|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  |                          |                         |                          |                    |                        | 10                             | 20                  | 50                  | 100                 | 1000                |
| E1               | ANDAHUAYLAS              | 676221.14               | 8489604.14               | 2866               | 52.1                   | 45.44                          | 51.71               | 60.24               | 66.96               | 91.32               |
| <b><u>E2</u></b> | <b><u>PAMPACHIRI</u></b> | <b><u>656452.61</u></b> | <b><u>8431463.61</u></b> | <b><u>3364</u></b> | <b><u>45.0</u></b>     | <b><u>39.1</u></b>             | <b><u>41.82</u></b> | <b><u>44.88</u></b> | <b><u>46.92</u></b> | <b><u>52.63</u></b> |
| E3               | PUQUIO                   | 593064.437              | 8373367.07               | 3219               | 40.8                   | 33.72                          | 39.28               | 47.59               | 54.67               | 83.98               |
| E4               | CORACORA                 | 630774.42               | 8339420.51               | 3172               | 59.5                   | 43.88                          | 47.96               | 52.55               | 55.61               | 64.18               |
| E5               | VILCASHUAMAN             | 613693.319              | 8491424.35               | 3394               | 48.4                   | 42.55                          | 49.47               | 60.14               | 69.61               | 112.86              |
| E6               | ABANCAY                  | 728963.717              | 8491779.21               | 2377               | 40.2                   | 35.65                          | 39.8                | 45.57               | 50.18               | 67.38               |

*Fuente: Elaboración Propia*

Por un proceso de regionalización mediante el polígono de Thiessen, se determina que la cuenca está dentro del área de influencia de la estación de Pampachiri al 100%.

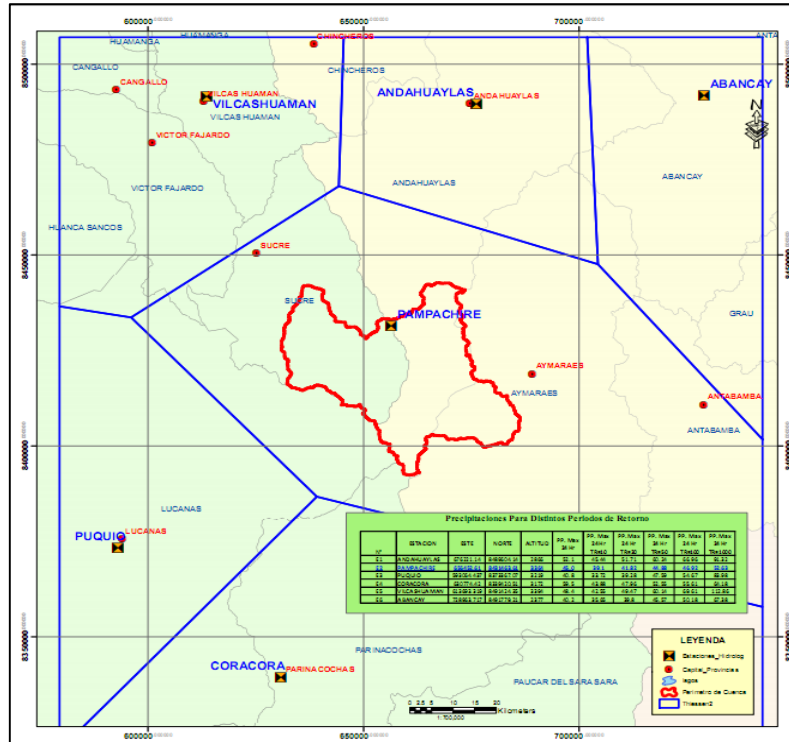


Figura 3.3: Determinación de la influencia de cada estación meteorológica

Con los datos de la estación Pampachiri se procede a construir la curvas intensidad – duración – período de retorno (IDT) utilizando el modelo Grobe, conocido como el modelo de Dyck y Peschke, para una duración de 6 h.

Tabla 3.4: Altura de precipitación-duración-periodo de retorno

| Probabilidad | T      | Duración en minutos |       |       |       |       |       |
|--------------|--------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |        | 5                   | 15    | 60    | 120   | 180   | 360   |
| Excedencia   |        |                     |       |       |       |       |       |
| (%)          | (años) |                     |       | (1h)  | (2h)  | (3h)  | (6h)  |
| 10           | 10     | 9.49                | 12.49 | 17.67 | 21.01 | 23.25 | 27.65 |
| 5            | 20     | 10.15               | 13.36 | 18.89 | 22.47 | 24.87 | 29.57 |
| 2            | 50     | 10.89               | 14.34 | 20.28 | 24.11 | 26.69 | 31.73 |
| 1            | 100    | 11.39               | 14.99 | 21.20 | 25.21 | 27.90 | 33.18 |
| 0.1          | 1000   | 12.78               | 16.81 | 23.78 | 28.28 | 31.29 | 37.22 |

Fuente: Elaboración propia

| Components                       |        | Compute                     |        | Results    |        | Components                       |        | Compute    |        | Results                     |        | Components                       |        | Compute                     |        | Results    |        | Components                       |        | Compute    |        | Results                     |        |                                  |        |            |        |  |  |
|----------------------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|----------------------------------|--------|------------|--------|-----------------------------|--------|----------------------------------|--------|-----------------------------|--------|------------|--------|----------------------------------|--------|------------|--------|-----------------------------|--------|----------------------------------|--------|------------|--------|--|--|
| Precipitation                    |        |                             |        |            |        |                                  |        |            |        |                             |        |                                  |        |                             |        |            |        |                                  |        |            |        |                             |        |                                  |        |            |        |  |  |
| <b>Met Name: Met 10</b>          |        |                             |        |            |        | <b>Met Name: Met 20</b>          |        |            |        |                             |        | <b>Met Name: Met 50</b>          |        |                             |        |            |        | <b>Met Name: Met 100</b>         |        |            |        |                             |        | <b>Met Name: Met 1000</b>        |        |            |        |  |  |
| Probability: 10 Percent          |        |                             |        |            |        | Probability: 4 Percent           |        |            |        |                             |        | Probability: 2 Percent           |        |                             |        |            |        | Probability: 1 Percent           |        |            |        |                             |        | Probability: 0.2 Percent         |        |            |        |  |  |
| Input Type: Partial Duration     |        |                             |        |            |        | Input Type: Partial Duration     |        |            |        |                             |        | Input Type: Partial Duration     |        |                             |        |            |        | Input Type: Partial Duration     |        |            |        |                             |        | Input Type: Partial Duration     |        |            |        |  |  |
| Output Type: Partial Duration    |        |                             |        |            |        | Output Type: Partial Duration    |        |            |        |                             |        | Output Type: Annual Duration     |        |                             |        |            |        | Output Type: Annual Duration     |        |            |        |                             |        | Output Type: Annual Duration     |        |            |        |  |  |
| Intensity Duration: 5 Minutes    |        |                             |        |            |        | Intensity Duration: 5 Minutes    |        |            |        |                             |        | Intensity Duration: 5 Minutes    |        |                             |        |            |        | Intensity Duration: 5 Minutes    |        |            |        |                             |        | Intensity Duration: 5 Minutes    |        |            |        |  |  |
| Storm Duration: 6 Hours          |        |                             |        |            |        | Storm Duration: 6 Hours          |        |            |        |                             |        | Storm Duration: 6 Hours          |        |                             |        |            |        | Storm Duration: 6 Hours          |        |            |        |                             |        | Storm Duration: 6 Hours          |        |            |        |  |  |
| Intensity Position: 50 Percent   |        |                             |        |            |        | Intensity Position: 50 Percent   |        |            |        |                             |        | Intensity Position: 50 Percent   |        |                             |        |            |        | Intensity Position: 50 Percent   |        |            |        |                             |        | Intensity Position: 50 Percent   |        |            |        |  |  |
| Storm Area (KM2): 1425.42        |        |                             |        |            |        | Storm Area (KM2): 1425.42        |        |            |        |                             |        | Storm Area (KM2): 1425.42        |        |                             |        |            |        | Storm Area (KM2): 1425.42        |        |            |        |                             |        | Storm Area (KM2): 1425.42        |        |            |        |  |  |
| Curve: Uniform For All Subbasins |        |                             |        |            |        | Curve: Uniform For All Subbasins |        |            |        |                             |        | Curve: Uniform For All Subbasins |        |                             |        |            |        | Curve: Uniform For All Subbasins |        |            |        |                             |        | Curve: Uniform For All Subbasins |        |            |        |  |  |
| Duration                         |        | Partial-Duration Depth (MM) |        | Duration   |        | Partial-Duration Depth (MM)      |        | Duration   |        | Partial-Duration Depth (MM) |        | Duration                         |        | Partial-Duration Depth (MM) |        | Duration   |        | Partial-Duration Depth (MM)      |        | Duration   |        | Partial-Duration Depth (MM) |        |                                  |        |            |        |  |  |
| 5 Minutes                        | 9.4914 | 5 Minutes                   | 10.152 | 5 Minutes  | 10.894 | 5 Minutes                        | 11.390 | 5 Minutes  | 12.776 | 5 Minutes                   | 14.338 | 5 Minutes                        | 14.990 | 5 Minutes                   | 16.814 | 5 Minutes  | 18.894 | 5 Minutes                        | 20.277 | 5 Minutes  | 21.199 | 5 Minutes                   | 24.113 | 5 Minutes                        | 25.209 |            |        |  |  |
| 15 Minutes                       | 12.491 | 15 Minutes                  | 13.360 | 15 Minutes | 14.338 | 15 Minutes                       | 14.990 | 15 Minutes | 16.814 | 15 Minutes                  | 18.894 | 15 Minutes                       | 20.277 | 15 Minutes                  | 21.199 | 15 Minutes | 24.113 | 15 Minutes                       | 25.209 | 15 Minutes | 27.899 | 15 Minutes                  | 28.277 | 15 Minutes                       | 31.294 | 15 Minutes | 31.725 |  |  |
| 1 Hour                           | 17.665 | 1 Hour                      | 18.894 | 1 Hour     | 20.277 | 1 Hour                           | 21.199 | 1 Hour     | 23.249 | 1 Hour                      | 24.113 | 1 Hour                           | 25.209 | 1 Hour                      | 27.899 | 1 Hour     | 28.277 | 1 Hour                           | 31.294 | 1 Hour     | 31.725 | 1 Hour                      | 33.177 | 1 Hour                           | 37.215 | 1 Hour     | 37.215 |  |  |
| 2 Hours                          | 21.008 | 2 Hours                     | 22.469 | 2 Hours    | 24.113 | 2 Hours                          | 25.209 | 2 Hours    | 27.899 | 2 Hours                     | 28.277 | 2 Hours                          | 31.294 | 2 Hours                     | 31.725 | 2 Hours    | 33.177 | 2 Hours                          | 37.215 | 2 Hours    | 37.215 | 2 Hours                     | 37.215 | 2 Hours                          | 37.215 | 2 Hours    | 37.215 |  |  |
| 3 Hours                          | 23.249 | 3 Hours                     | 24.866 | 3 Hours    | 26.686 | 3 Hours                          | 27.899 | 3 Hours    | 31.294 | 3 Hours                     | 31.725 | 3 Hours                          | 33.177 | 3 Hours                     | 37.215 | 3 Hours    | 37.215 | 3 Hours                          | 37.215 | 3 Hours    | 37.215 | 3 Hours                     | 37.215 | 3 Hours                          | 37.215 | 3 Hours    | 37.215 |  |  |
| 6 Hours                          | 27.648 | 6 Hours                     | 29.571 | 6 Hours    | 31.725 | 6 Hours                          | 33.177 | 6 Hours    | 37.215 | 6 Hours                     | 37.215 | 6 Hours                          | 37.215 | 6 Hours                     | 37.215 | 6 Hours    | 37.215 | 6 Hours                          | 37.215 | 6 Hours    | 37.215 | 6 Hours                     | 37.215 | 6 Hours                          | 37.215 | 6 Hours    | 37.215 |  |  |
| 12 Hours                         |        | 12 Hours                    |        | 12 Hours   |        | 12 Hours                         |        | 12 Hours   |        | 12 Hours                    |        | 12 Hours                         |        | 12 Hours                    |        | 12 Hours   |        | 12 Hours                         |        | 12 Hours   |        | 12 Hours                    |        | 12 Hours                         |        | 12 Hours   |        |  |  |

Figura 3.4: Altura de precipitación ingresada al software HEC-HMS

- 4) Una vez que se ha dispuesto los variables de precipitación, se procede a completar el modelo al software, se procedió a ejecutar para obtener los hidrogramas simulados para los distintos periodos de retorno, que continuación se muestra en las figuras

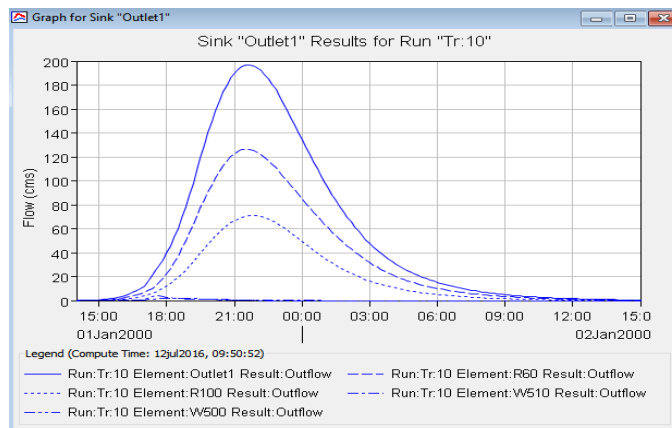


Figura 3.5: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 10 años

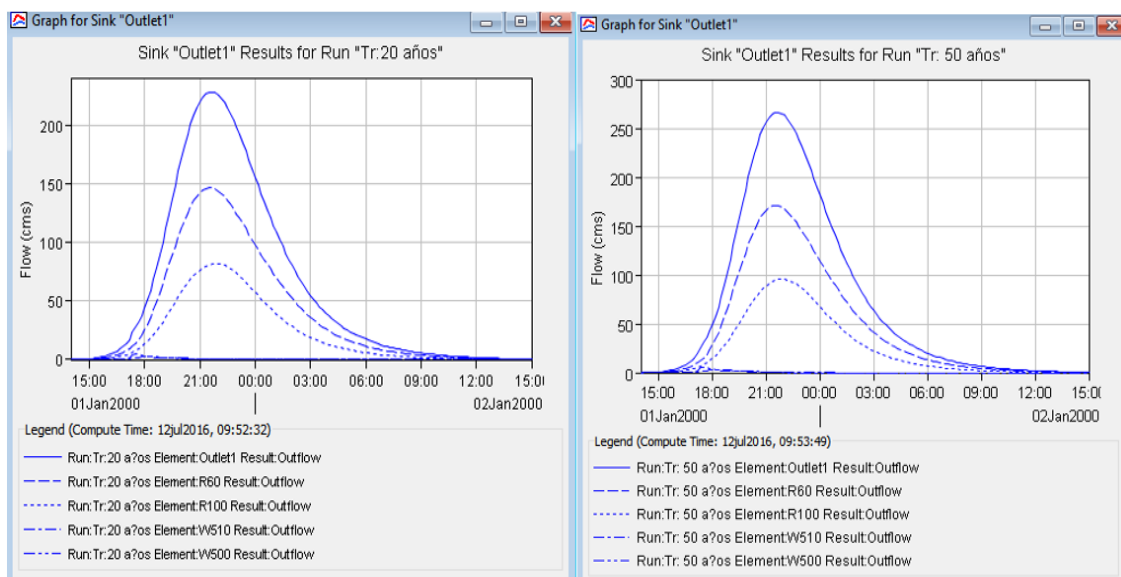


Figura 3.6: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 20 y 50 años

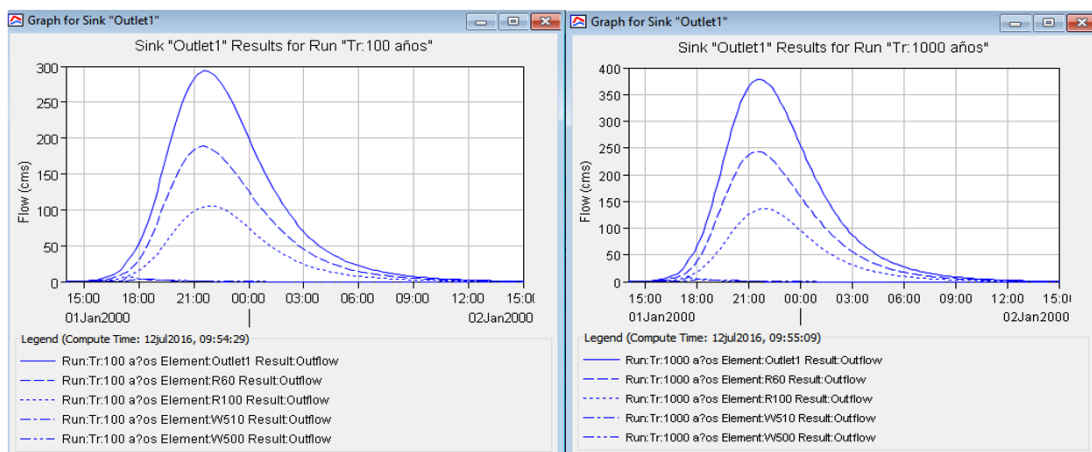


Figura 3.7: Hidrograma gráfica en el punto de aforo para un TR: 100 y 1000 años

los resultados numéricos de los Q<sub>máx</sub> avenida para TR = 10, 20, 50, 100 y 1000 años, se muestran en la tabla 3.5, siendo estos valores fueron ingresados al software HEC-RAS, con la finalidad de obtener la superficie del agua para cada uno de los tiempos de retorno mencionados.

Para una simulación dinámica en HEC-RAS, se debe de ingresar los valores numéricos del hidrograma (q/tiempo), para una visualización de cómo evoluciona las inundaciones.

Tabla 3.5: Resultado de los caudales máximos de la cuenca en estudio

| TR     | Q máx               |
|--------|---------------------|
| (años) | (m <sup>3</sup> /s) |
| 10     | 196.9               |
| 20     | 227.1               |
| 50     | 266.3               |
| 100    | 293.8               |
| 1000   | 378.2               |

Fuente: Elaboración propia

- 5) Para la generación de la data del área de posible inundación, utilizando la extensión HEC-GeoRAS, dentro de su módulo PreRAS, se tuvo que convertir el mapa topográfico a curvas de nivel en TIN, obteniendo las características geométricas del cauce (secciones transversales, pendiente del río, incorporación de “n” de Manning).

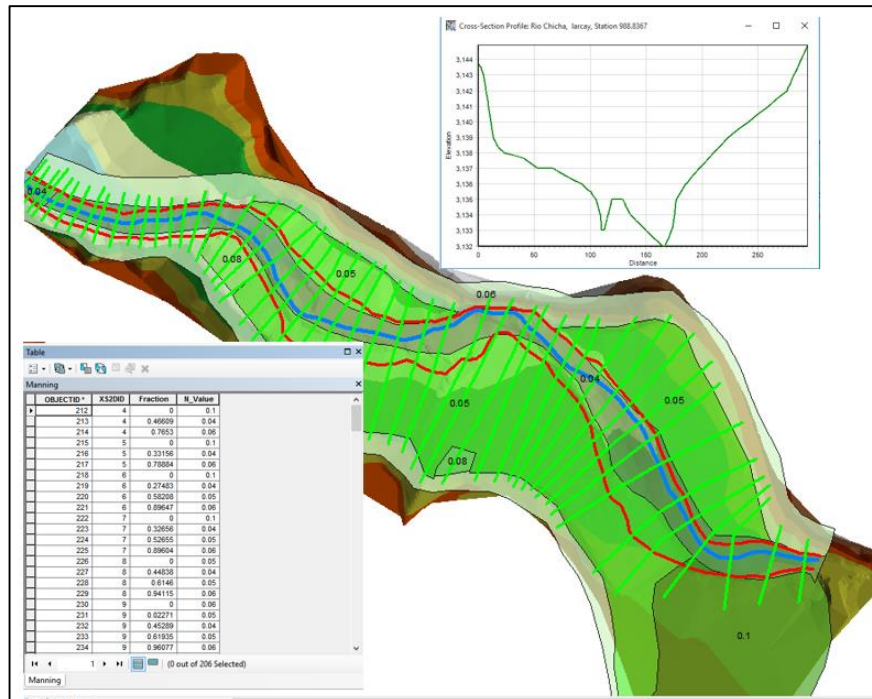


Figura 3.8: Data generada del tramo baños termales de Lircay, en entorno SIG.

- 6) Una vez completada la obtención de los parámetros geométricos, se procedió a exportar al modelo HEC-RAS para su simulación hidráulica, el cual fué exitosa y satisfactoria. Quedando listo para la complementación de los variables como son, el flujo, condición de régimen del modelamiento.

Luego de importar al modelo HEC-RAS, se verificó los datos en la pestaña **River Reach Stream Lines**, aceptando, para luego en la pestaña **Cross Sections and IB Nodes**, añadiendo la información en las ventanas **Import River e Import Reach** y redondeamos el número que nos identifica las secciones. **Round Selected RS.**

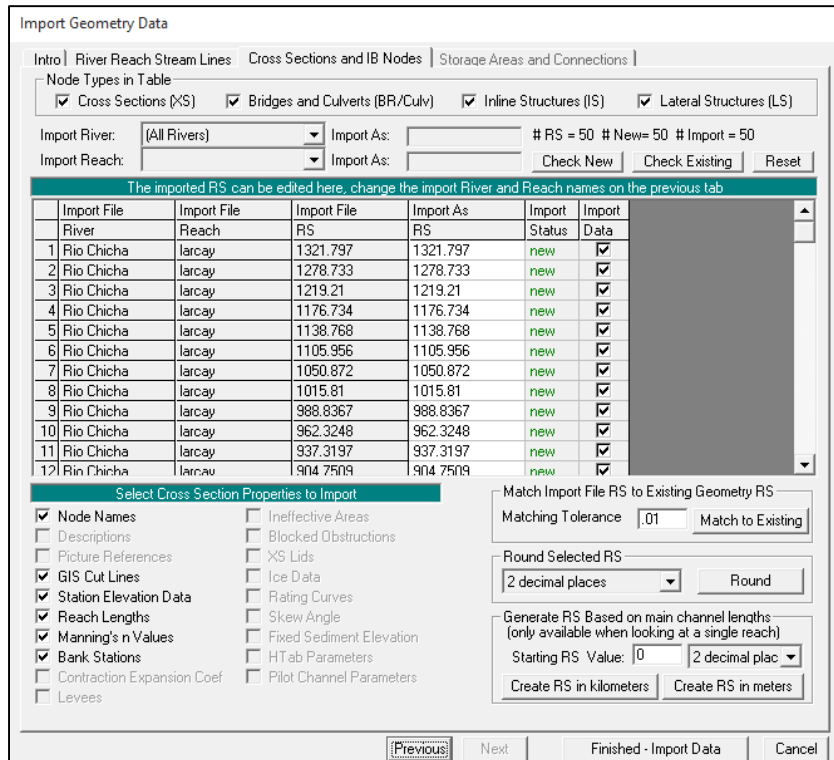


Figura 3.9: Data generada en entorno SIG, e importada en forma satisfactoria al HEC-RAS

Todos estos datos, al aceptar en **Finished – Import Data**, pasan al módulo de **Geometry Data**, como se muestra en la figura 3.10 dando a lugar a la verificación, editar las secciones geométricas, ingresar el “n” coeficiente de Manning, entre otras. En procedimiento anterior todos los parámetros ya fueron generados en el SIG, facilitando el tedioso trabajo de ingresar en forma manual las secciones y sus características.

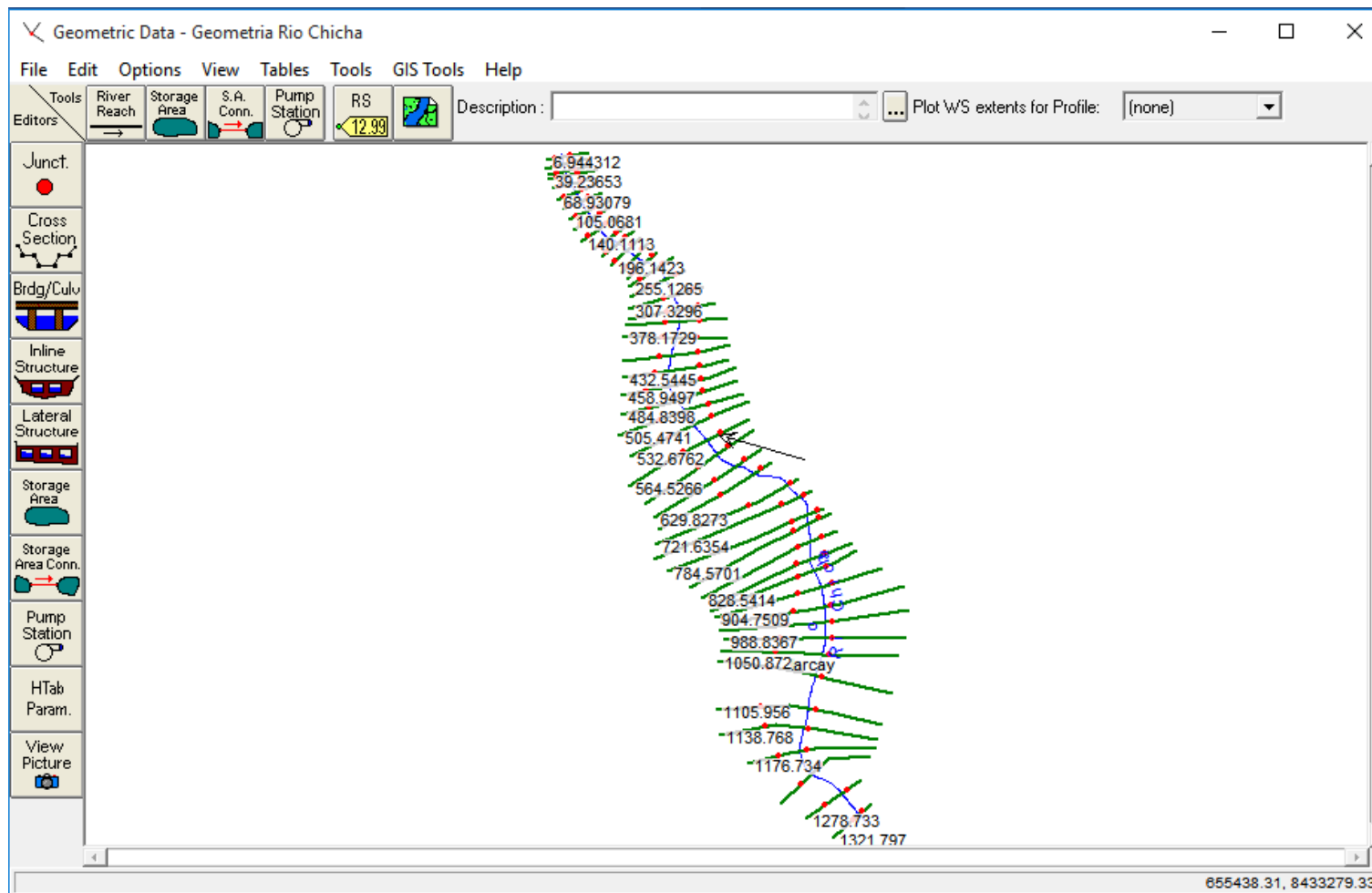


Figura 3.10: La data geométrica importada al HEC-RAS, desde el entorno SIG en forma satisfactoria

Edit Manning's n or k Values

River: [All Rivers]  Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: [All Regions]

Selected Area Edit Options: Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ... Reduce to L Ch R ...

| River | Reach     | river Static | Frictn In/K | n #1 | n #2 | n #3 | n #4 | n #5 |      |      |
|-------|-----------|--------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | Rio Chich | Jarcay       | 1321.797    | n    | 0.1  | 0.04 | 0.06 |      |      |      |
| 2     | Rio Chich | Jarcay       | 1278.733    | n    | 0.1  | 0.04 | 0.06 |      |      |      |
| 3     | Rio Chich | Jarcay       | 1213.21     | n    | 0.1  | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |
| 4     | Rio Chich | Jarcay       | 1176.734    | n    | 0.1  | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |
| 5     | Rio Chich | Jarcay       | 1139.768    | n    | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |      |
| 6     | Rio Chich | Jarcay       | 1105.956    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 7     | Rio Chich | Jarcay       | 1050.872    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 8     | Rio Chich | Jarcay       | 1015.81     | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 9     | Rio Chich | Jarcay       | 988.8367    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 10    | Rio Chich | Jarcay       | 962.3248    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 11    | Rio Chich | Jarcay       | 937.3197    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 12    | Rio Chich | Jarcay       | 904.7509    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 13    | Rio Chich | Jarcay       | 876.6505    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 14    | Rio Chich | Jarcay       | 856.8318    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 15    | Rio Chich | Jarcay       | 828.5414    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 16    | Rio Chich | Jarcay       | 798.2029    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |      |
| 17    | Rio Chich | Jarcay       | 784.5701    | n    | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |
| 18    | Rio Chich | Jarcay       | 750.0453    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |      |
| 19    | Rio Chich | Jarcay       | 721.6354    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 |      |      |
| 20    | Rio Chich | Jarcay       | 683.49      | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 21    | Rio Chich | Jarcay       | 629.8273    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 22    | Rio Chich | Jarcay       | 593.6248    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 23    | Rio Chich | Jarcay       | 564.5266    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 24    | Rio Chich | Jarcay       | 532.6762    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 25    | Rio Chich | Jarcay       | 505.4741    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 26    | Rio Chich | Jarcay       | 484.8398    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 27    | Rio Chich | Jarcay       | 458.9497    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 28    | Rio Chich | Jarcay       | 432.5445    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 29    | Rio Chich | Jarcay       | 407.4443    | n    | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 30    | Rio Chich | Jarcay       | 378.1729    | n    | 0.06 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 31    | Rio Chich | Jarcay       | 351.4695    | n    | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |
| 32    | Rio Chich | Jarcay       | 332.5102    | n    | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |      |

OK Cancel Help

Figura 3.11: Resultado del "n" coeficiente de Manning obtenido con el SIG

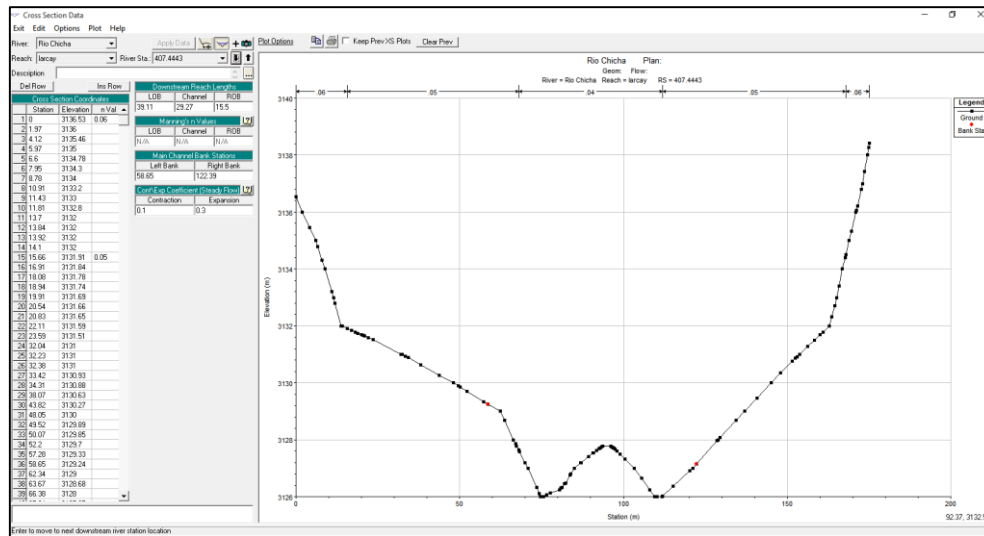


Figura 3.12: verificación de las secciones geométricas del tramo de interés

7) Una vez verificado los datos integrados del SIG en el modelo HEC-RAS, se procedió a complementar los datos de flujo obtenidos en la simulación hidrológica a nivel de la cuenca, ingresando los datos de la *Tabla 3.5*, además se estableció las condiciones de simulación, edición de nombre de los perfiles (Tr: 10, 20, 50, 100 y 1000 años), pendiente del río como se muestra en la *Figura 3.13*.

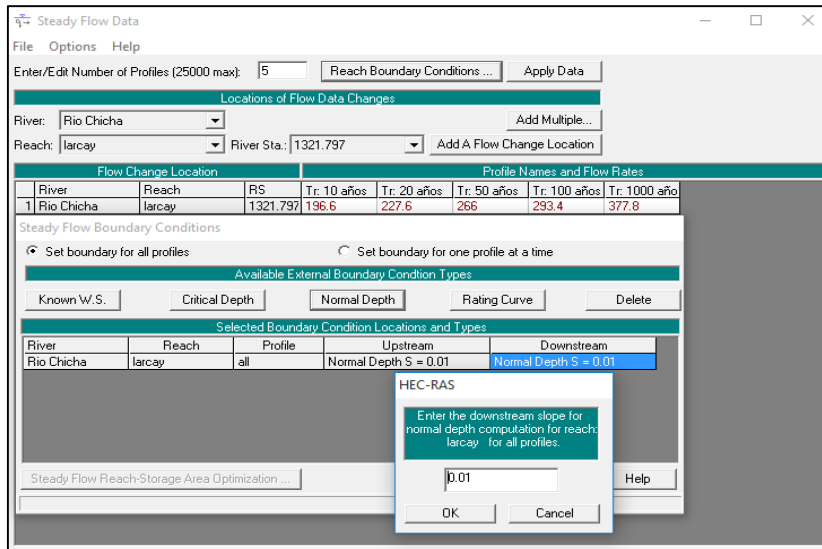


Figura 3.13: Ingreso de datos de caudales y definir las condiciones de simulación

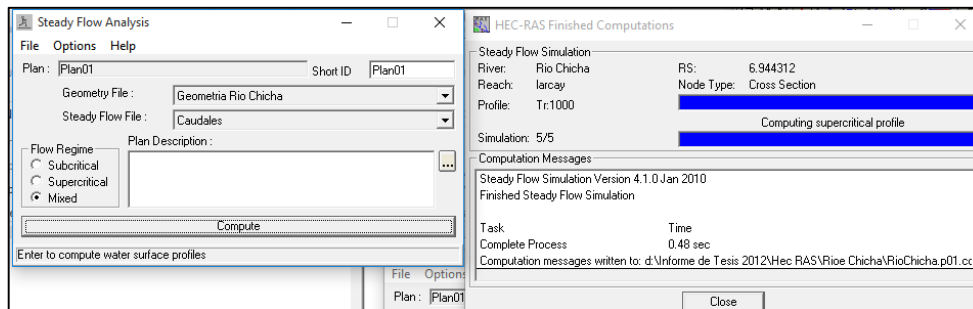


Figura 3.14: Elaboración de un plan y su posterior ejecución

- 8) Como resultado de la ejecución de la simulación hidráulica del tramo baños termales de Larcay, se puede visualizar los resultados en el modelo HEC-RAS que a continuación se muestra.

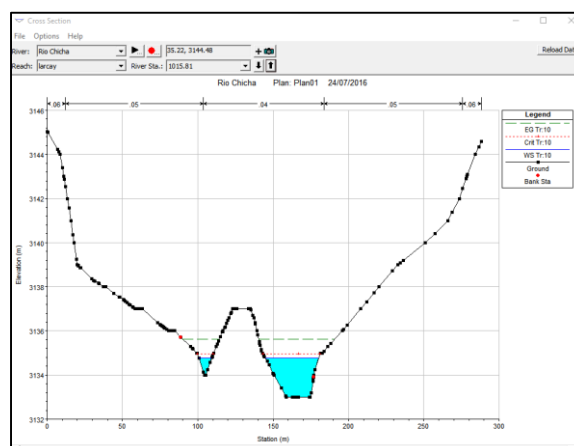


Figura 3.15: Resultado de superficie de flujo para un TR de 10 años, en la estación 1015.81

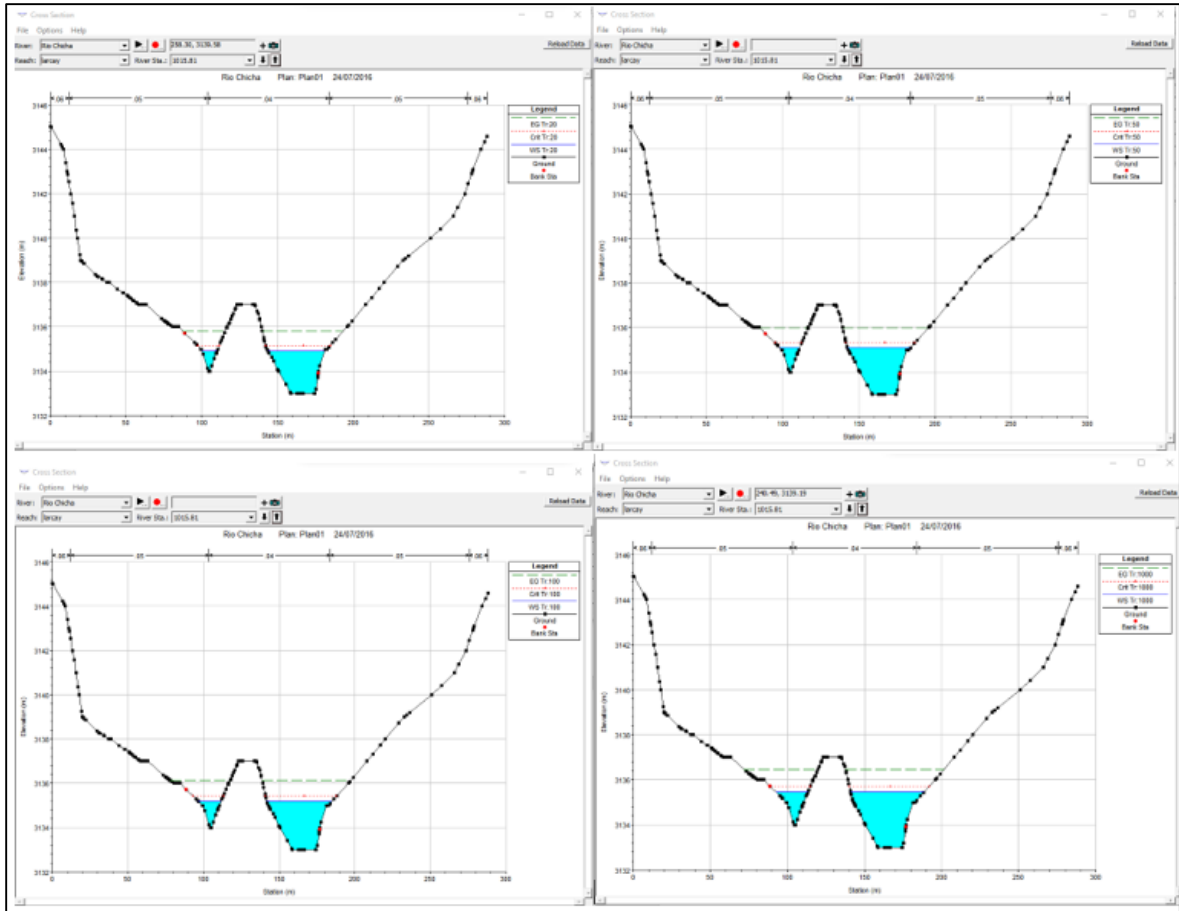


Figura 3.16: Resultado de superficie de flujo para un TR de 20, 50, 100 y 1000 años, en la estación 1015.81

Así se puede ir mostrando para cada una de las estaciones o cortes transversales, de las visualizaciones se puede deducir, que la superficie de inundación observando las ordenadas y abscisas de la 50 estaciones o secciones. Para un mayor entendimiento del profesional sobre el tema, también se puede reportar el perfil del tramo de río en evaluación. Como se muestra a continuación:

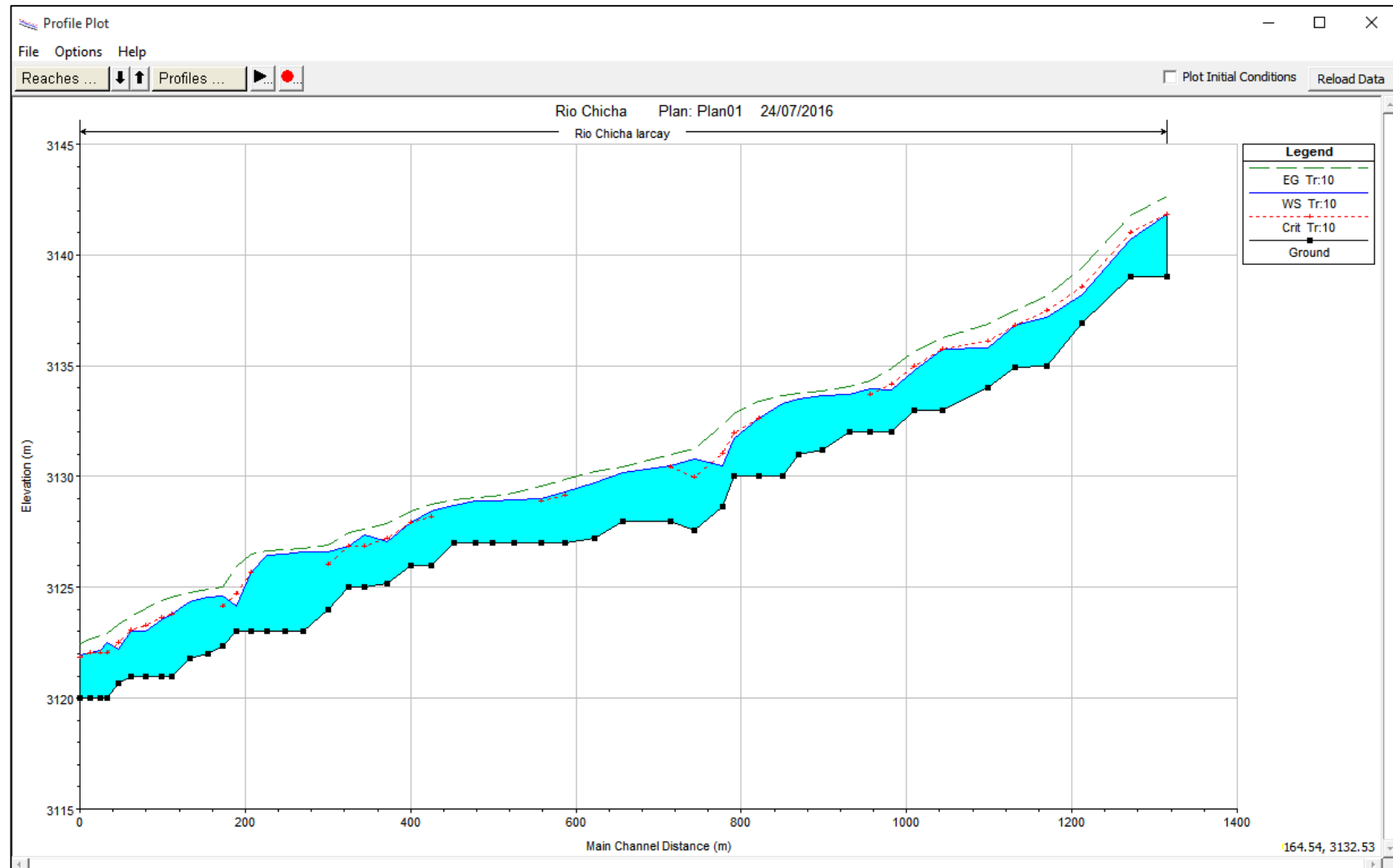


Figura 3.17: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 10 años.

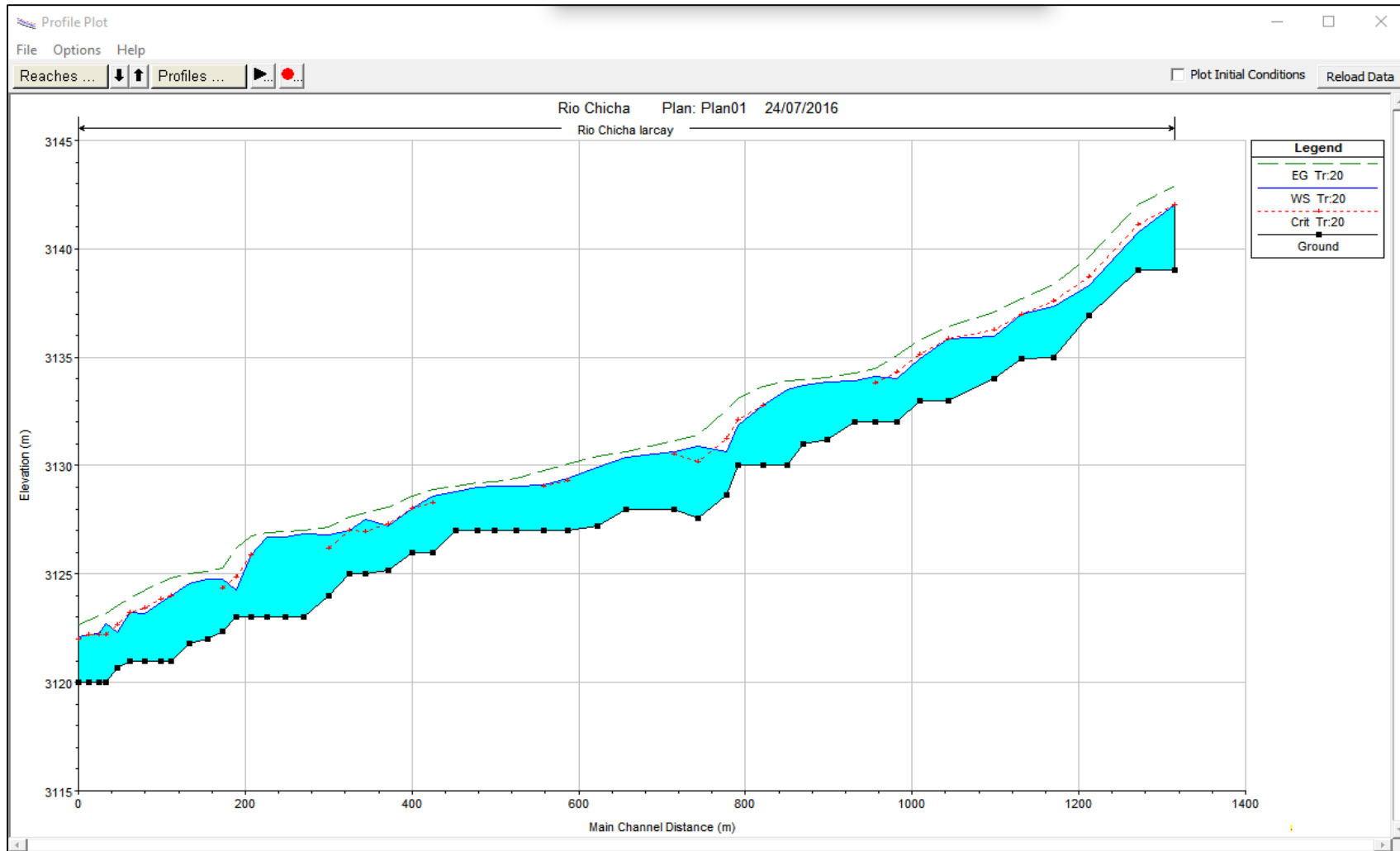


Figura 3.18: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 20 años.

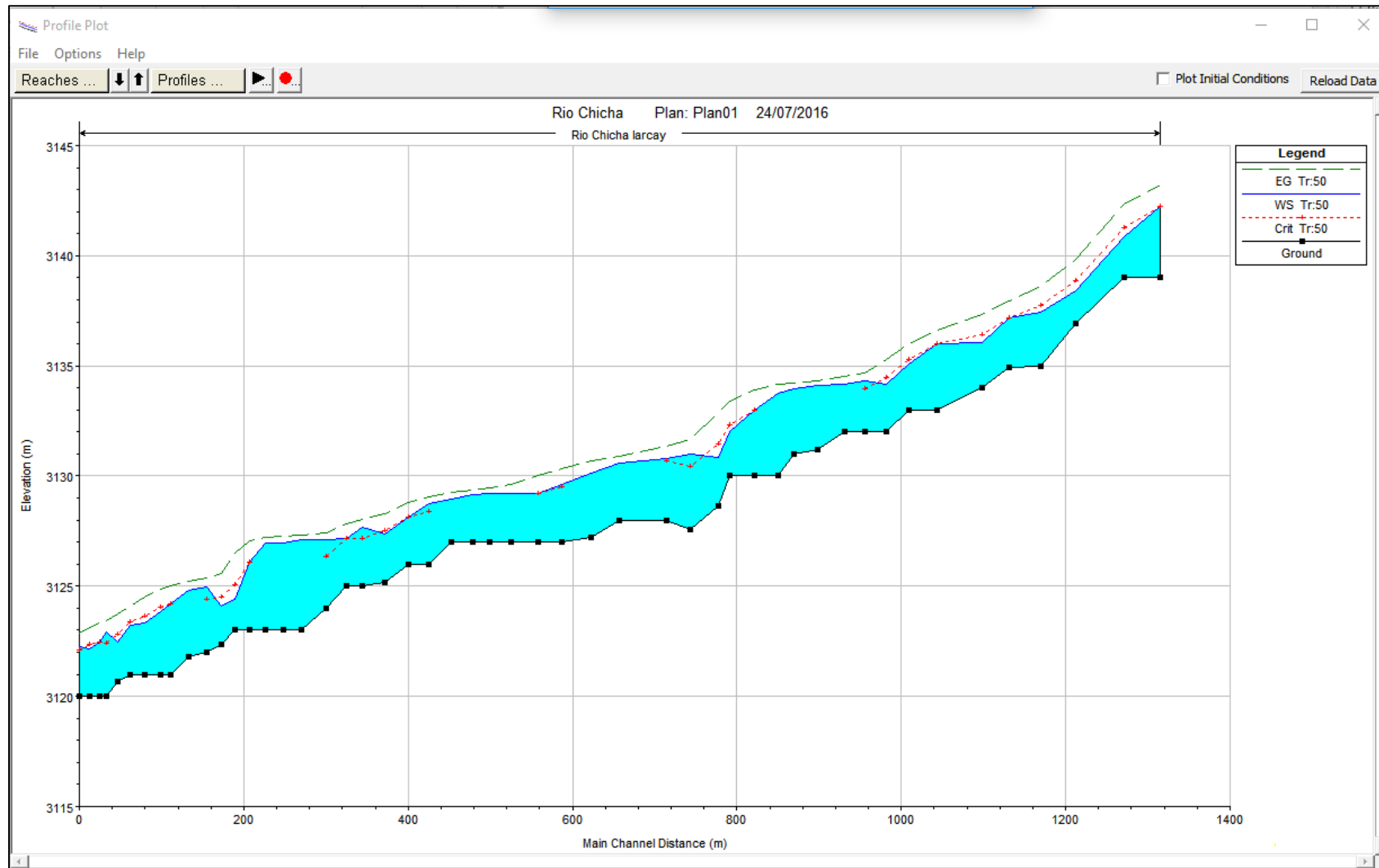


Figura 3.19: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 50 años.

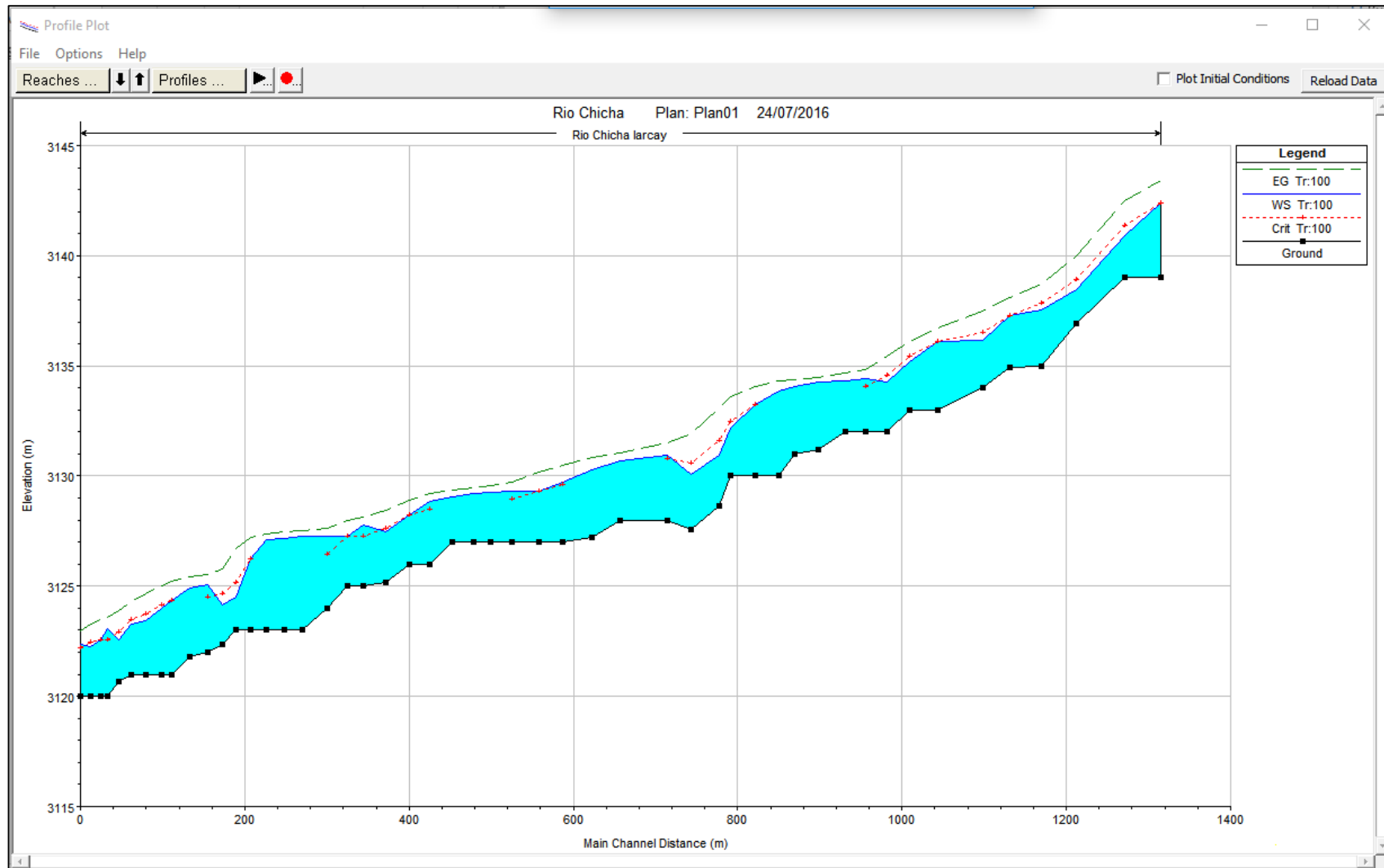


Figura 3.20: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 100 años.

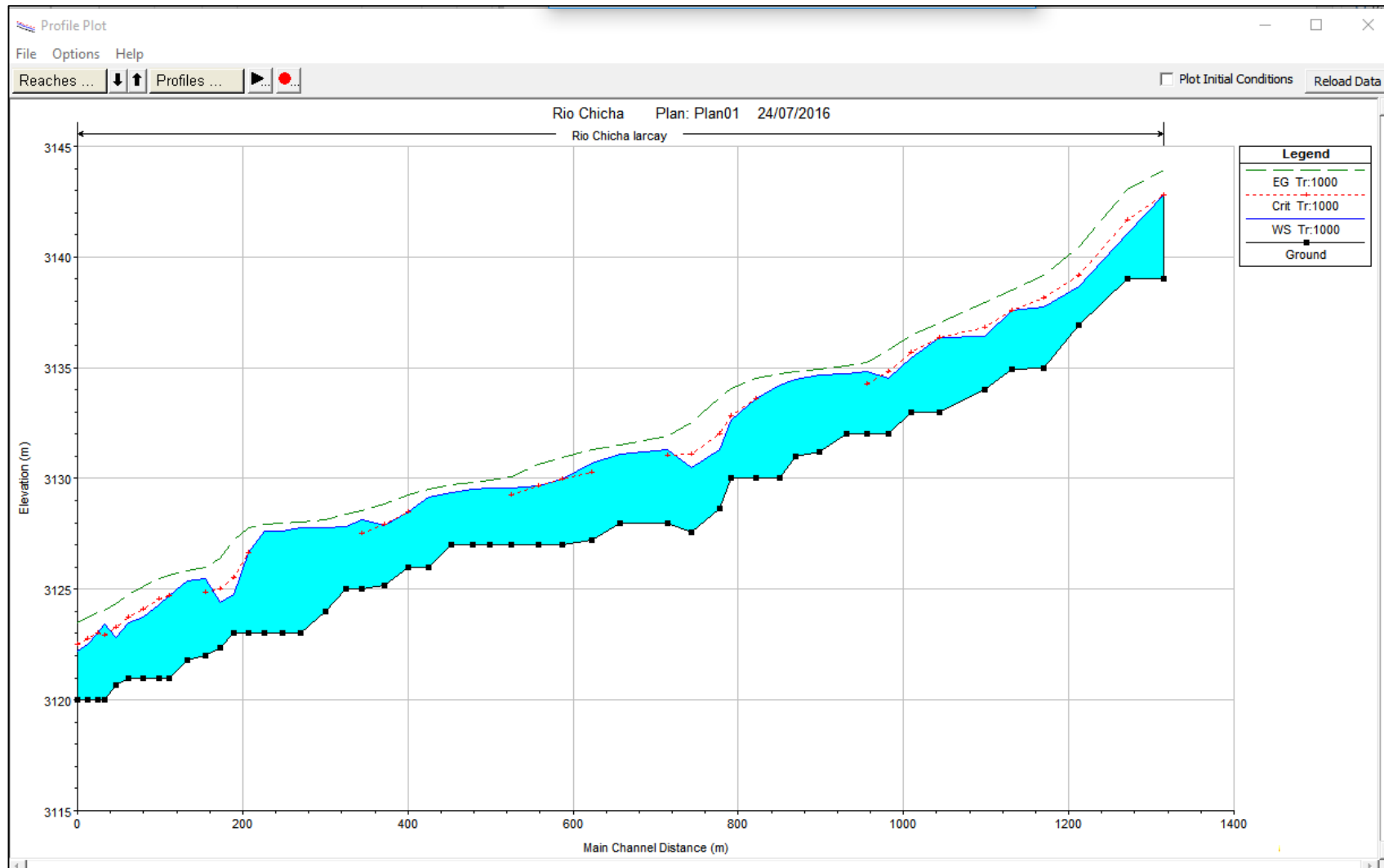


Figura 3.21: Resultado del flujo, vista de perfil del río para TR: 1000 años.

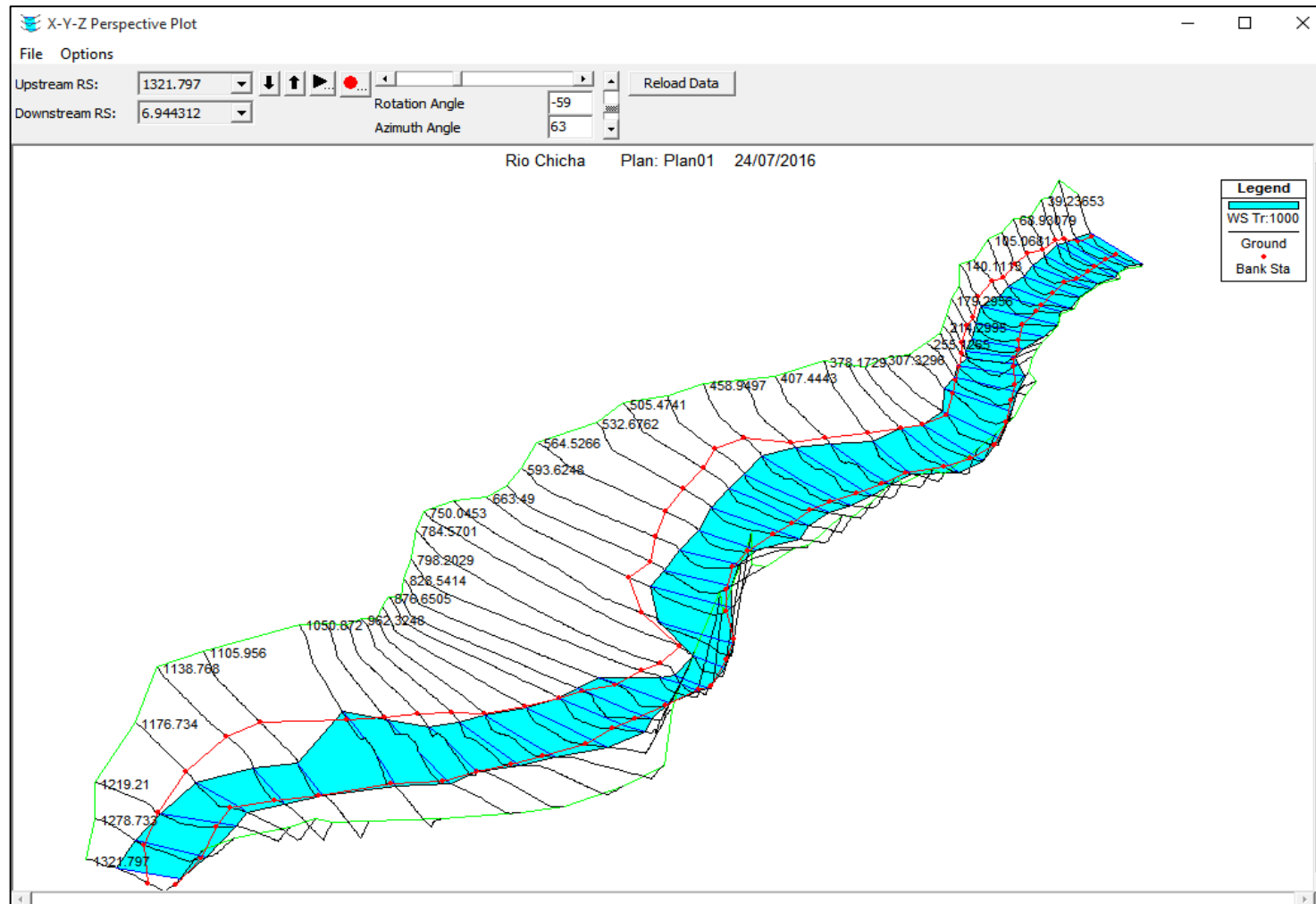
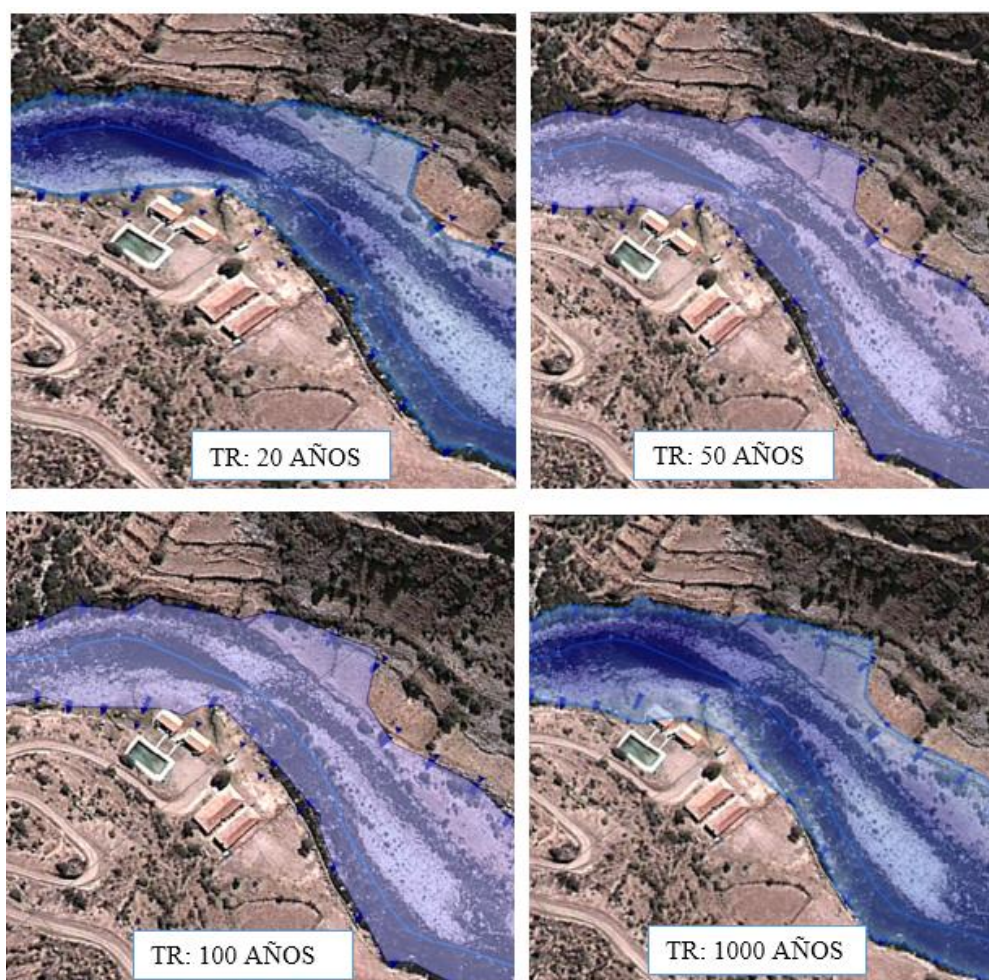


Figura 3.22: Vista isométrica de las planicies de inundación en entorno HEC-RAS para un TR: 1000 años

Todos los resultados observados, aún carecen de una presentación más visual, didáctica, para alcanzar el entendimiento de la mayoría de los profesionales, siendo aún exclusividad de los profesionales en la especialidad o que tengan experiencias sobre la interpretación de los resultados mostrados.

Para romper dicha barrera, se volvió a integrar los resultados de la simulación hidráulica del modelo HEC-RAS al SIG, con la finalidad de visualizar y realizar las evaluaciones con las herramientas que dota el SIG, el proceso se denomina POST-RAS, como producto final se tuvieron los siguientes resultados que se muestran en las figuras 3.23.



*Figura 3.23: Vista de las planicies de inundación en sus efectos para los distintos periodos de retorno, frente al complejo turístico de los baños termales de Larcay*

Los mismos resultados se encuentran anexados en los mapas elaboradas de EH-12 hasta EH-16. De esta manera concluyendo con los objetivos planteados.

## IV. DISCUSIÓN

### a. “Modelación hidrológica de precipitación y escorrentía en cuencas”

- 1) El SIG no es un simple sistema de computación para confeccionar mapas, más una herramienta analítica, la mayor ventaja de semejante herramienta es que nos permite, identificar las relaciones espaciales entre las características de los mapas. Esta habilidad es fundamental para que un SIG investigue modelamientos disponibles de agua. Smith (1993) Cada característica en un mapa de SIG, es el enlace con sus atributos almacenados en una base de datos. De acuerdo a los resultados, la cuenca tiene un área de 1425.42 Km<sup>2</sup>, por tanto, según la bibliografía manifestada por (Vásquez, 2000), esta pertenece a una clasificación de *cuenca*.

La discretización en 15 sub cuencas y no en menor cantidad, está de acuerdo a las conclusiones de una tesis de pregrado de (Rodríguez, 2011), el cual manifiesta que a mayor discretización de la cuenca, se obtendrá resultados más próximos a la realidad.

- 2) Los parámetros obtenidos en el entorno SIG extensión HEC-GeoHMS, y haber definido el modelo de simulación, y el proceso de importar dichos resultados al modelo HEC-HMS, para complementar los datos de precipitación y periodos de control. El HEC-HMS es un modelo de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa (Nanía, 2007). El modelo está diseñado para estimar los caudales de salida en una cuenca o varias sub-cuencas, a partir de unas condiciones de lluvias dadas. Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar.

- 3) Se decidió la obtención de un modelo semidistribuido debido al hecho de que se solo se contaba con información puntual de la lluvia. La posibilidad de utilizar un modelo distribuido implicaba contar, entre otros, con datos del radar y en este caso no se tenían

El método de los polígonos de Thiessen establece que la lluvia de una zona de la cuenca será igual a la precipitación registrada por el pluviómetro cuya área de influencia incluye dicha zona, afectada por un factor de ponderación igual al área de influencia entre el área total de la cuenca. Este método tiene como inconveniente que no toma en consideración en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia (Campos, 1992). Esta deficiencia puede ser superada con la utilización del método de las curvas isoyetas, pero dicho procedimiento necesita de muchísima información pluviométrica (espacial y temporal) que en el momento del estudio no se disponía.

En los eventos modelados no se pudo utilizar todas las estaciones pluviométricas, debido a se estableció el área de influencia de cada pluviómetro, quedando la cuenca en el área de influencia de la estación Pampachiri, obteniéndose luego la serie de precipitación media ponderada en 24 horas, para cada subcuenca.

Para la estimación del *Tiempo de Retorno* se basó en la recomendada por (Icg, 2011), texto desarrollado para el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. El tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez cada “T” años, se le denomina Período de Retorno “T”. Si se supone que los eventos anuales son independientes, es posible calcular la probabilidad de falla para una vida útil de n años.

*Tabla 4.1: Valores recomendados de riesgo admisible*

| <b>TIPO DE OBRA</b>   | <b>RIESGO ADMISIBLE (%)</b> |
|---|-----------------------------|
| Puentes   | 22                          |
| Alcantarilla de paso de quebradas importantes y badenes                 | 39                          |
| Alcantarilla de paso de quebradas menores y descarga de agua de cunetas | 64                          |
| Drenaje de la plataforma (a nivel longitudinal)                         | 64                          |
| Subdrenes   | 72                          |
| Defensas Ribereñas  | 22                          |

*Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Pág. 14 ICG-2011*

Tabla 4.2: Valores de períodos de retorno T (Años)

| RIESGO ADMISIBLE | VIDA ÚTIL DE LAS OBRAS (n años) |     |     |     |     |      |      |      |      |       |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
|                  | R                               | 1   | 2   | 3   | 5   | 10   | 20   | 25   | 50   | 100   |
| 0.01             | 100                             | 199 | 299 | 498 | 995 | 1990 | 2488 | 4975 | 9950 | 19900 |
| 0.02             | 50                              | 99  | 149 | 248 | 495 | 990  | 1238 | 2475 | 4950 | 9900  |
| 0.05             | 20                              | 39  | 59  | 98  | 195 | 390  | 488  | 975  | 1950 | 3900  |
| 0.10             | 10                              | 19  | 29  | 48  | 95  | 190  | 238  | 475  | 950  | 1899  |
| 0.20             | 5                               | 10  | 14  | 23  | 45  | 90   | 113  | 225  | 449  | 897   |
| 0.25             | 4                               | 7   | 11  | 18  | 35  | 70   | 87   | 174  | 348  | 695   |
| 0.50             | 2                               | 3   | 5   | 8   | 15  | 29   | 37   | 73   | 154  | 289   |
| 0.75             | 1.3                             | 2   | 2.7 | 4.1 | 7.7 | 15   | 18   | 37   | 73   | 144   |

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Pág. 13 ICG-2011

Según descrito anteriormente el período de retorno recomendable sería la de 100 años, con un riesgo admisible de 22% con una vida útil de 25 años. Para una mayor ilustración se evaluó para 5 períodos de retorno distintos tales como son, 10, 20, 50, 100 y 1000 años.

- 4) Se obtuvo para cada escenario, una representación gráfica (un hidrograma que refleja la variación del caudal en función del tiempo) asimismo una tabla con la variación del caudal cada 10 minutos (en las especificaciones de control habíamos definido un intervalo de cómputo de 10 minutos). El resultado final del hidrograma de una cuenca está basada fundamentalmente por el suelo y la humedad con la que dispone, es decir cuando se tiene un suelo con una mayor conductividad hidráulica saturada, la escorrentía generada es menor al disminuir la cantidad de agua que constituye el exceso (y al contrario, una menor  $K_s$  dará lugar a un incremento del agua excedente); el parámetro  $K_s$  es el más decisivo para analizar con exactitud los procesos lluvia-escorrentía, con lo cual su precisa determinación es siempre imprescindible para conseguir unas adecuadas simulaciones. Los parámetros relacionados con la lluvia (altura y duración) son fundamentales para determinar la magnitud de la escorrentía resultante, si bien estos no son predecibles exactamente sino que son objeto de un análisis histórico o estadístico con el fin de obtener los máximos zonales; sin embargo,  $K_s$  es inherente al suelo de la cuenca estudiada, pudiendo ser conocido independientemente de la condición temporal, o sea, es una característica invariable (conocida en la zona en que se mide), y para un chubasco de una magnitud dada, cada suelo de una cuenca responderá en función de ella, dando lugar a distintos hidrogramas de escorrentía con unas puntas en caudal y tiempo muy relacionadas con la  $K_s$ . Esto contrasta con los resultados de Loague (1988), para el que los parámetros edafológicos (en especial  $K_s$ ) ejercen una mayor influencia en la precisión de las predicciones de los hidrogramas de escorrentía resultantes.

Complementando los resultados de la simulación hidrológica, se realizó la calibración correspondiente por el método de huellas dejadas por los máximos eventos ocurridas hasta la fecha, donde su tuvo un resultado de un  $Q = 283.21 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual refleja los caudales obtenidos durante la simulación cercanas al TR de 100 años (se anexa los procedimientos de cálculo).

**b. “Modelación hidráulica en ríos”**

- 5) Referente a la modelación hidráulica, en la segunda etapa de este trabajo de investigación se desarrolló la extensión de HEC-GeoRAS (USACE, 2010), el cual es una extensión para ArcGIS desarrollado conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). Mediante el uso de estas herramientas se toman los datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río y secciones transversales, y posteriormente los resultados obtenidos se exportan desde HEC-RAS (USACE, 2010), a ArcGIS, para ser procesados y obtener mapas de inundación y riesgo; en este trabajo se simularon cinco escenarios, para periodos de retronó de 10, 20, 50, 100 y 1000 años. Previo a la implementación del modelo hidráulico se realizó el levantamiento de las secciones transversales del río.

Los coeficientes de rugosidad (Manning) se estimaron mediante inspección visual de todo el tramo de baños termales de Larcay, en función del tamaño de agregados del cauce y de la cobertura vegetal predominante en las márgenes (Chow, 1959). En el cauce principal se adoptó un coeficiente de Manning de 0.04 (gravas, piedras y algunos cantos rodados), mientras que en las planicies de inundación se adoptaron valores de acuerdo al tipo/uso del suelo dominante, con valores desde 0.05 – 0.08 (suelo con cobertura de arbustos) finalmente 0.10 (Eucalipto denso).

- 6) El modelo utilizado en la investigación, corresponde a un modelo matemático unidimensional HEC-RAS 4.1.0., software gratuito de origen estadounidense desarrollado por parte del Cuerpo de Ingenieros de la Armada (US Army Corps of Engineering), donde posee varios programas de computación para la administración de recursos de agua; y en razón al área de estudio de aplicación del modelo. El modelo HEC-RAS posee todas las capacidades necesarias para realizar una simulación en las condiciones previstas en el estudio, tiene una de las mejores funciones de pre y post procesamiento. Los datos presentan la disposición de editar, modificar y visualizarse en pantalla. De igual forma, tiene la capacidad para interactuar con modelos digitales de terreno (MED) mediante entorno de sistemas de información geográfica - GIS (ArcInfo, ArcView o ArcGIS) aumentando la eficacia del análisis relativo a parámetros topográficos, asimismo, la aplicación de la

extensión HEC-GeoRAS que trabaja en ese mismo entorno, proporciona resultados de alta calidad en cuanto a mapas de inundaciones con gran facilidad. (Torres & Gonzales, 2010) De acuerdo a cada periodo de retorno y considerando el mes más crítico el perteneciente a los meses de diciembre a marzo, en cuanto a mayores variaciones de niveles se puede observar varias manchas de agua.

- 7) El análisis hidráulico del tramo de estudio del río Chicha Soras, tramo baños termales de Larcay de 1.30 km de longitud, se ejecutó utilizando el modelo 1D HEC-RAS versión 4.1. Al ser un modelo 1D tiene la ventaja de requerir poca información, generalmente:
  - (a) geometría del cauce, definida a través de perfiles transversales, (b) datos hidrométricos, y (c) coeficientes de rugosidad.
- 8) Como se pueden observar los resultados de la primera parte a nivel de cuenca, se obtuvieron caudales para distintos periodos de retorno, el cual se incorporó en los puntos iniciales del modelo hidráulico (Punto de aforo). Finalmente, el esquema de la modelación del comportamiento de los Perfiles Hidráulicos, así como la obtención de Parámetros Hidráulicos está dado a la importancia de dicho sitio y dado también, a la posible ocurrencia de eventos hidrometeorológicos que pueden impactar catastróficamente (Torres & Gonzales, 2010) en tramo de baños termales de Larcay, se relaciona con la necesidad de contar con pronósticos de inundaciones de la dinámica de los niveles de agua del río Chicha Soras, centrando la necesidad en la predicción del riesgo, asociada a la amenaza hidrológica (nivel del agua). De cada uno de los caudales de crecida, que se muestran en los mapas adjuntos EH-12 hasta EH-16.

## V. CONCLUSIONES

### a. “Modelación hidrológica de precipitación y escorrentía en cuencas”

- 1) Los SIG ofrecen una gran capacidad para el diagnóstico y valoración paisajística la posibilidad de integración de elementos georreferenciados. Esto facilita la capacidad de estudio del espacio geográfico.
- 2) La integración del SIG en HEC-HMS, es un proceso que nos permite, obtener los parámetros físicos de cuenca de forma rápida y exacta.
- 3) Cuando en la zona de estudio se carece o existe una limitada cantidad de estaciones meteorológicas y/o pluviométricas, es una buena alternativa construir curvas intensidad – duración – período de retorno (IDT) utilizando el modelo GROBE, conocido como el modelo de Dyck y Peschke, para una duración de 6 h. a partir de datos de precipitación máxima en 24 horas.
- 4) La obtención de los hidrogramas de máxima avenida, para los distintos periodos retorno, nos muestra resultados no calibrados, puesto que no se tuvo una estación existente para poder calibrarlo.

### b. “Modelación hidráulica en ríos”

- 5) El SIG. un complemento muy fundamental para poder preparar data para el HEC-RAS, simplificando una labor tediosa, en la obtención de secciones y la alimentación de los parámetros como el “n” de Manning.
- 6) El HEC-RAS, es un modelo matemático bastante desarrollado para modelar diferentes escenarios de un río, incluso permite involucrar estructuras hidráulicas existentes.
- 7) El HEC-RAS es un modelo complejo que permite, realizar desde una simulación básica (solo caudales), hasta la más compleja con múltiples variables (sedimentos, calidad de agua, entre otros).
- 8) El verdadero interés de la aplicación de los SIG. a la evaluación hidráulica reside en que esta se puede llevar a cabo de una manera rápida y económica, facilitando el estudio de grandes áreas y su interpretación sencilla.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- 1) La calidad del MED, es determinante para la obtención de una buena desagregación de las subcuencas y los demás parámetros requeridos por el modelo HEC-HMS. Evitar que los vacíos de los MED sean tan grandes, ya que conducirán a errores. Es necesario que se tome en cuenta los resultados de diferentes desagregaciones que el programa HEC-GeoHMS v 10.2 genera para comprender y optar por un correcto resultado, que este programa facilita la desagregación de las subcuencas y así obtener resultados más aproximados a la realidad, sobre todo con los cauces existentes y que tengan incidencia en el comportamiento de la cuenca.
- 2) Para la integración de los resultados del SIG al modelo HEC-HMS, se debe realizar con sumo cuidado, siguiendo la secuencialidad descrita, verificando el reflejo real de la data, en caso contrario, el modelo HEC-HMS simplemente no reconocerá el modelo de la cuenca. Una vez dentro de ella, volver a verificar los parámetros importados en cada elemento del modelo de cuenca.
- 3) Antes de ingresar los datos de precipitación para los cálculos respectivos, es necesario realizar una evaluación de consistencia, ya que varía en el rendimiento de la cuenca.
- 4) Para una mejor lectura de los resultados tanto gráficas y numéricas del HEC-HMS, se debe utilizar en forma complementaria el Software HEC-DSSVue (Hydrologic Engineering Center Data Storage System Visual Utility Engine), ya que permite realizar reportes gráficos y numéricos fáciles de interpretar.
- 5) Los trabajos de topografía de campo se deben realizar con mayor detalle posible, ya que este afectará directamente en los resultados de las planicies de inundación. En gabinete se

debe de procesar teniendo en cuenta que los resultados son fiel reflejo del campo (plano topográfico).

- 6) Para la integración de los resultados del SIG al HEC-RAS se debe de realizar siguiendo la secuencialidad de descrita en el presente trabajo de investigación, como en los manuales de usuarios, en caso contrario, no se tendrá resultados.
- 7) La introducción de los demás parámetros al modelo HEC-RAS, se deben de dar con conocimiento y fundamento tanto los datos de ingreso y salida que se quiere obtener.
- 8) La integración de los resultados del modelo HEC-RAS al SIG, en la forma similar que anteriormente descrita, se debe de llevar en completa secuencialidad. En caso contrario no se tendrá resultados.
- 9) Recomendar a los profesionales involucrados en el campo de la hidrología y la hidráulica, aplicar estos procedimientos metodológicos en sus estudios, por ser útil y versátil reduciendo los tiempos y costos de los estudios. Sobre todo, porque permite predecir la respuesta hidrológica de la cuenca.
- 10) Sin embargo, para poder emplear el potencial que tiene los modelamientos, se requiere de una buena instrumentación en las cuencas hidrográficas, que permita obtener información suficiente, consistente y confiable, de los diferentes parámetros hidrológicos que requiere el modelo. Por tanto, invocar a las autoridades del Gobierno Regional de Ayacucho (GRA). Autoridad Nacional del Agua (ANA) y SENAMHI, a fin de ejecutar políticas de implementación de estaciones meteorológicas a nivel de todas las cuencas de la región. A la vez implementar políticas de gestión integral de cuencas en las partes alta y media, con la finalidad de atenuar el escurrimiento superficial evitando desastres de desbordamiento e inundación en las partes bajas de la cuenca.
- 11) A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a implementar laboratorios especializados para propiciar investigaciones a nivel de docentes y estudiantes en este tema. Luego realizar la publicación de los resultados y experiencias a fin de que estén a la disposición de la sociedad en su conjunto

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrysiak, P., & Maidment, D. (2000). *Visual Floodplain Modeling with Geographic Information Systems (GIS)*. TEXAS - USA.: Bureau of Engineering Research.
- Bendient, P. B., & Huber, W. (1992). *Hydrology and Floodplain, 2da Edición*. Addison-Wesley: Reading MA.
- Bosque, S. J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid - España: Rialp.
- Burrough, & McDonnel, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems (Sistemas de Información Geográfica)*. New York - EEUU: Oxford University Press.
- Buzai, G. (1997). *Enseñar e investigar con Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Buenos Aires Argentina: Troquel.
- Campos, D. F. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Mexico: Universidad Autonoma del San Luis Potosí.
- Chavarri, V. (2002). Separatas del Curso de Métodos de Análisis en Recursos Hídricos. *Maestría en Recursos Hídricos - UNALM*, 18.
- Chow, V. T. (2000). *Hidraulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrologogía Aplicada*. Santa Fé de Bogotá: McGRW-HILL INTERAMERICANA, S.A.
- Fernandez, I. A., & Coppel. (2001). El Datum. *Localizaciones Geográficas - Universidad de Valladolid*, 21.
- Giles, P., & Chapman, M. (1994). Incorporation of a digital elevation model derived from stereoscopic satellite imagery in automated terrain analysis. *Computers and Geoscience, Vol. 20*, 441-460.
- Guevara, P., & Lena, H. (1991). *Una Introducción al la Ciencia Hidrología Aplicada*. Valencia - Venezuela: Universidad de Carabobo.
- Henderson, F. M. (1966). *Open Chanel Flow*. New York: Macmillan.
- Horton, R. (1933). Separate roughness coefficients for channel bottom and sides:. *Engineering News Record, 11(22)*, 652-653.
- Icg, I. d. (2011). *Manual de Hidrología, Hidraulica y Drenaje para Obras Viales de MTC*. Lima - Perú: ICG, [www.construccion.org](http://www.construccion.org).

- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulus, L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Cali - Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.
- Loague, K. M. (1988). Impact of rainfall hydraulic property information on runoff predictions at the hillslope scale. *Water Resour*, 24:1501-1510.
- Maidment, D. (1996). *GIS and hydrological modeling - an assessment of progress 3ra edition*. New Mexico - USA: International Conference on GIS.
- McDonnell, R. A. (1996). Including the spatial dimension: Using geographical information systems in hidrology. *Progress in Physical Geography*, Vol 20, N° 2, 159-177.
- Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: LIMUSA S.A.
- Morad, M., & Triveño, P. (2001). Sistemad de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas. *bolitin de la A.G.E. N° 31*, 23-46.
- Nania, B. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada - España: Universidad de Granada.
- Olaya, V. (2011). Fundamentos cartográficos y geodésicos. *Sistema de Información Geográfica*, 47.
- Overton, D., & Meadows, M. (1976). *Stromwater Modeling*. New York: Academic Press.
- Ponce, V. M. (1978). Convergence of four-point Implicit Water Wave Models. *Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 104*, 947 - 958.
- Ramos, J. C., & Achuy, S. J. (2006). *ArcGIS Manual de Sistema de Inofrmación Geográfica*. Lima - Perú: Grupo Universatario SAC.
- Rodriguez, M. P. (2011). Simulacion de Cuencas Urbanas y Rurales Mediante Sistema de Información Geográfica y HEC-GeoHMS. *Tesis Para Obtar Titulo de Ingeniero Civil - UNSCH*, 278-283.
- San Roman, S. (2016). Relación Precipitación - Escorrentía. *Hidrología Superficial (III) - Universidad de Salamanca*, 1-18.
- Smith, M. B. (1993). A GIS based distributet parameter hydrological model for urban areas. *Hidrologic Processes. Vol 7*, 45-61.
- Survey, I.-A. G. (1950). Proyección Lambert para Costa Rica. *Army Map Service*,, 25.
- Tate, E. C. (1998). *Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS (Masters Thesis)*. Texas - USA: Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin.
- Torres, Q. E., & Gonzalez, N. E. (2010). Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - Sector Alicachin . *Preveniendo*, 14.

- Ugarte, C. O. (2012). *Diseño Geométrico de Carreteras con AutoCAD Civil 3D*. Lima - Perú: Macro E.I.R.L.
- US Army, C. O. (1982). *HEC-2 Water Surface Profiles, User Manual*. USA: Hidrologic Engineering Center.
- US Army, C. O. (2009). *HEC-GeoRAS, An extension for support of HEC-RAS using ArcGIS*. USA: Hydrologic Engineering Center.
- US Army, C. O., & DAVIS, C. (2009). *HEC-GeoHMS, And extension for support of ArcGIS*. USA: Hydrologic Engineering Center.
- Usace, C.-6. (2010). *"User's Manual HEC-RAS River Analysis System" Ver. 4.1*. USA.
- Vásquez, A. (2000). *Manejo de Cuencas Altoandinas. Tomo I*. Lima - Perú: Charles Sutton.
- Villon, B. M. (2002). *Hidrología. 2da Edición*. Lima - Perú: Villón.
- Villon, B. M. (2009). *HEC-RAS Ejemplos. 2da Edición*. Cartago - Costa Rica: Villon.
- Villon, B. M. (2010). *HEC-HMS EEjemplos 2da Edición*. Cartago - Costa Rica: Villon.
- Villón, B. M. (2012). *Hidroesta 2: Cálculos Hidrológicos, Manual del Usuario*. Lima - Perú: Max-Soft Villón.
- Woolhiser, D. (1990). Kinematic Runoff and Erosion Model. *U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Documentación And User Manual*, 130.

## **ANEXOS**

Anexo 1: Resultados numéricos y gráficos del HEC-HMS

Anexo 2: Calibración del modelo HEC-HMS por el método de huellas

Anexo 3: Resultados numéricos y gráficos del HEC-RAS

Anexo 4: Mapas elaborados

Anexo 5: Panel fotográfico.

Anexo 6: Datos hidrometeorológicos utilizados

**ANEXO 4: PANEL FOTOGRÁFICO DEL PROYECTO**



*Foto 01: Vista Panorámica de majestuoso Ccarhuarazo*



*Foto 02: Conformación típica de la cuenca, predominan pastos naturales.*



*Foto 03: La vegetación es bastante escasa, debido a que sus suelos son poco desarrollados, que favorecen a la escorrentía superficial.*



*Foto 04: Toma de control con GPS, de las áreas de la cuenca.*



*Foto 05: Al fondo se divisa el distrito de Pampachire – Apurímac, que está ubicado en una parte encañonada.*



*Foto 06: Vista del río Chicha, que es el límite entre las regiones de Apurímac y Ayacucho.*



*Foto 07: Georreferenciación de los cauces principales de la cuenca del río Chicha.*



*Foto 08: Vista panorámica del tramo Baños termales de Larcay, objeto de la presente tesis.*



*Foto 09: Vista del río Chicha Soras en unión con el río Larcay.*



*Foto 10: Huellas dejadas por los máximos eventos ocurridas.*



*Foto 11: Levantamiento topográfico del cauce del tramo baños termales de Larcay, con estación total*



*Foto 12: Levantamiento topográfico de las riberas y cauces*



*Foto 13: Levantamiento topográfico de las riberas y cauces*



*Foto 14: Medición y seccionamiento de tramos del cauce, para el control en gabinete.*



*Foto 15: Configuración del cauce y la vegetación circundante.*



*Foto 16: Vista panorámica de la conformación de un tramo del río, baños termales de Larcay.*



*Foto 17: Áreas agrícolas afectables por una ocurrencia de máxima avenida*



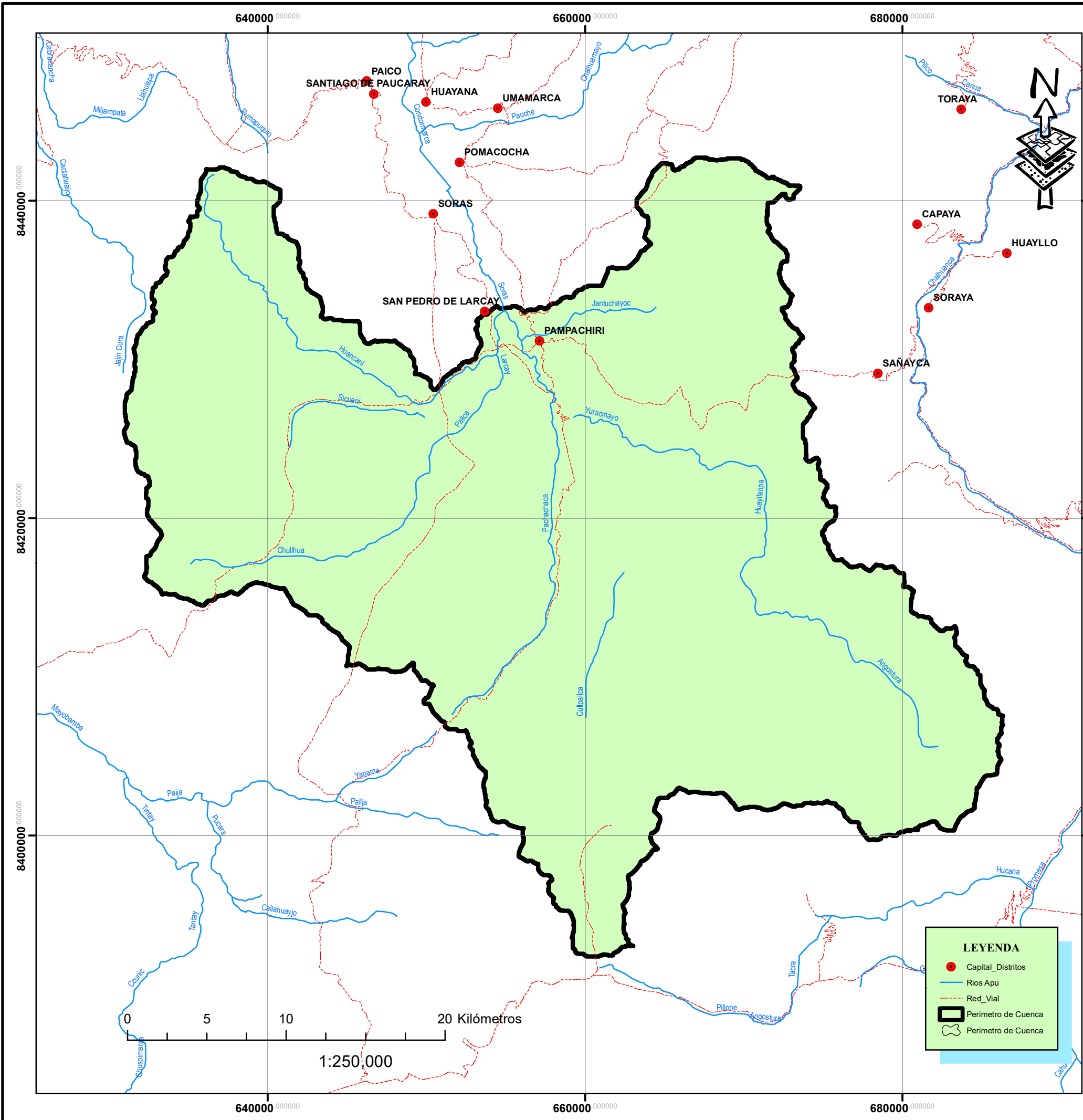
*Foto 18: Terrenos agrícolas afectadas por una ocurrencia de máxima avenida*



*Foto 19: Cuadrilla de topografía en toma de datos en campo.*

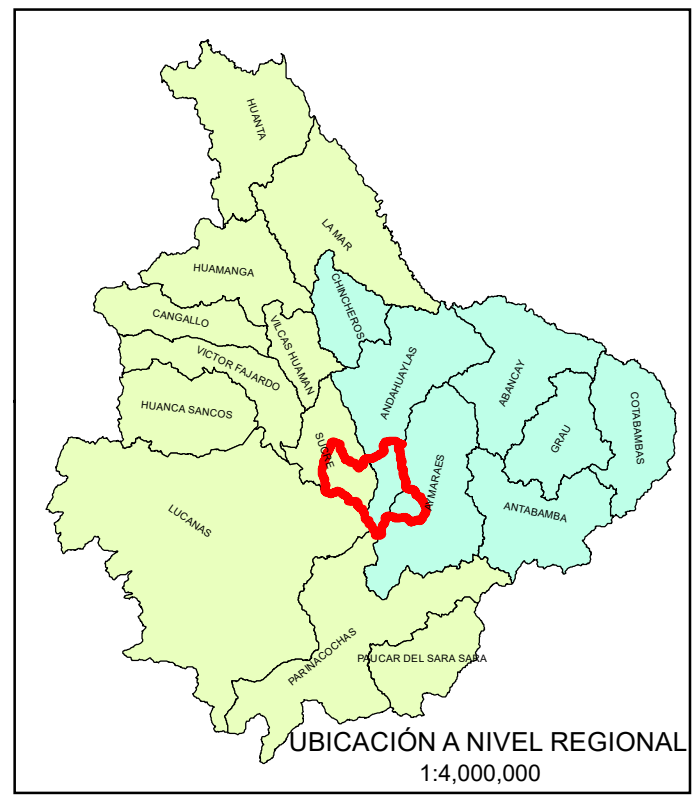


*Foto 20: Infraestructura que sería afectado por una crecida de un evento.*

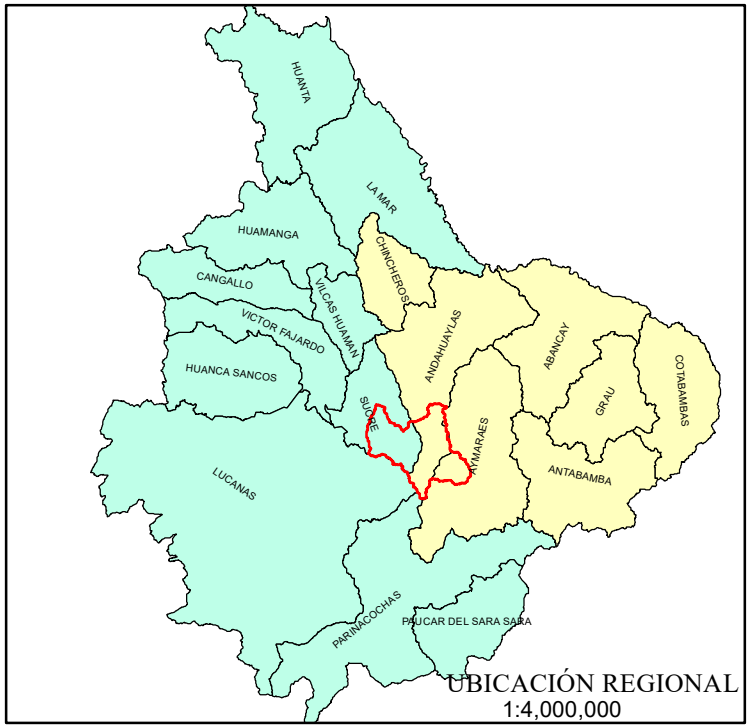
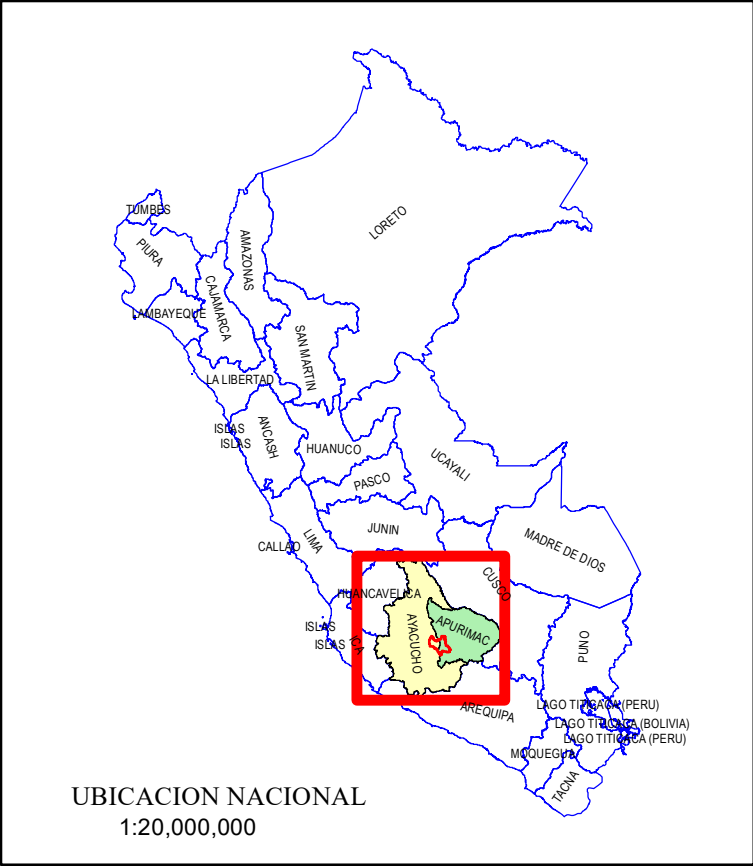
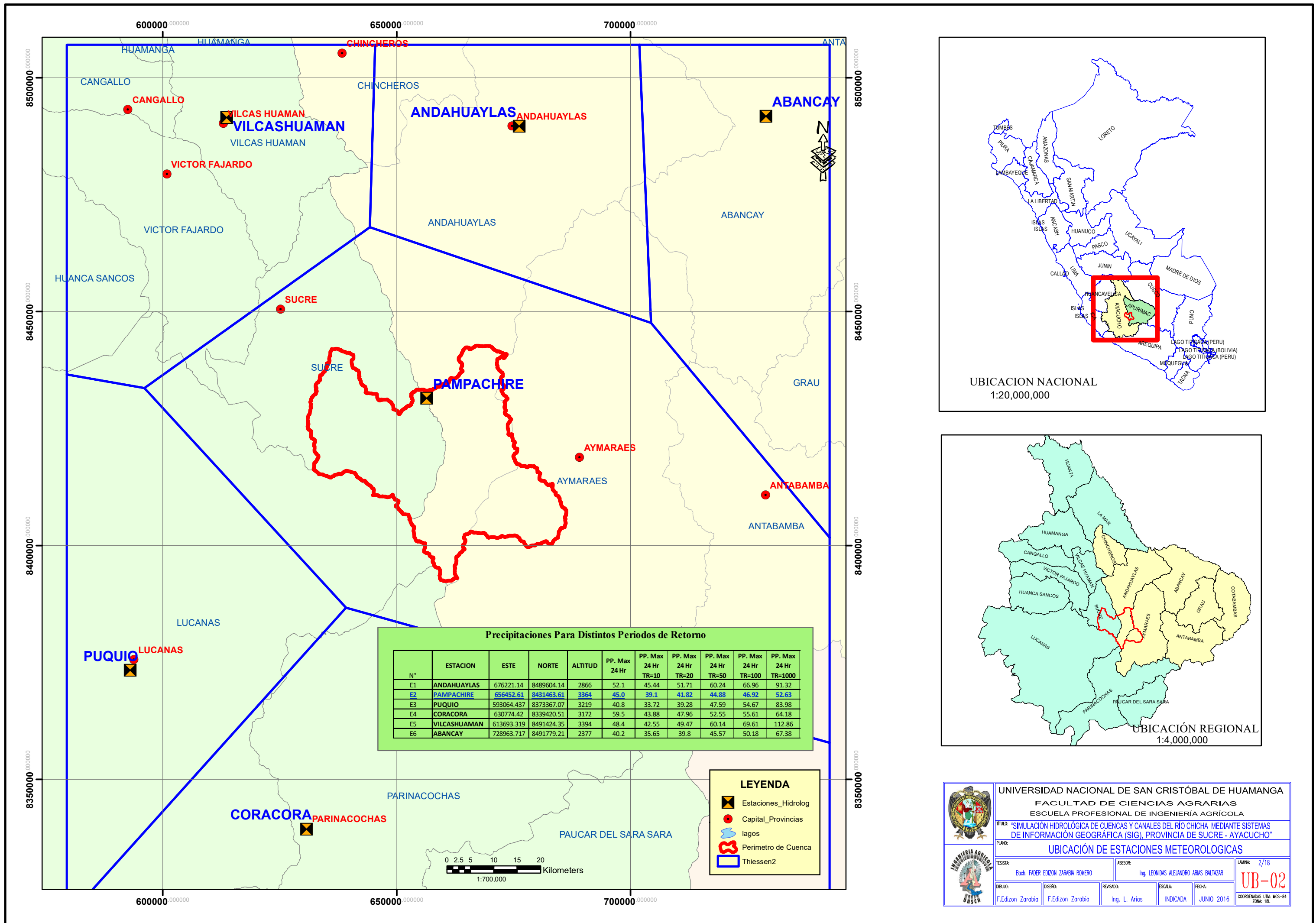


**LEYENDA**

- Capital\_Distritos
- Rios Apu
- - - Red\_Vial
- ▭ Perimetro de Cuenca
- Perimetro de Cuenca



|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
|   | <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b><br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA               |   |  |
|   | TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |   |  |
| PLANO:<br><b>UBICACIÓN POLÍTICA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA</b> | TESISTA:<br>Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO   | ASESOR:<br>Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LAMINA:<br>1/18                                      |
| DIBUJO:<br>F. Edizon Zarabia                                  | DISEÑO:<br>F. Edizon Zarabia  | REVISADO:<br>Ing. L. Arias                        | ESCALA:<br>INDICADA                                  |
| FECHA:<br>JUNIO 2016  |   |   | <b>UB-01</b><br>COORDENADAS UTM: WGS-84<br>ZONA: 18L |

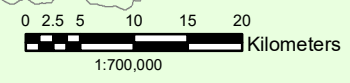


**Precipitaciones Para Distintos Periodos de Retorno**

| N° | ESTACION     | ESTE       | NORTE      | ALTITUD | PP. Max<br>24 Hr | PP. Max<br>24 Hr<br>TR=10 | PP. Max<br>24 Hr<br>TR=20 | PP. Max<br>24 Hr<br>TR=50 | PP. Max<br>24 Hr<br>TR=100 | PP. Max<br>24 Hr<br>TR=1000 |
|----|--------------|------------|------------|---------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| E1 | ANDAHUAYLAS  | 676221.14  | 8489604.14 | 2866    | 52.1             | 45.44                     | 51.71                     | 60.24                     | 66.96                      | 91.32                       |
| E2 | PAMPACHIRE   | 656452.61  | 8431463.61 | 3364    | 45.0             | 39.1                      | 41.82                     | 44.88                     | 46.92                      | 52.63                       |
| E3 | PUQUIO       | 593064.437 | 8373367.07 | 3219    | 40.8             | 33.72                     | 39.28                     | 47.59                     | 54.67                      | 83.98                       |
| E4 | CORACORA     | 630774.42  | 8339420.51 | 3172    | 59.5             | 43.88                     | 47.96                     | 52.55                     | 55.61                      | 64.18                       |
| E5 | VILCASHUAMAN | 613693.319 | 8491424.35 | 3394    | 48.4             | 42.55                     | 49.47                     | 60.14                     | 69.61                      | 112.86                      |
| E6 | ABANCAY      | 728963.717 | 8491779.21 | 2377    | 40.2             | 35.65                     | 39.8                      | 45.57                     | 50.18                      | 67.38                       |

**LEYENDA**

- Estaciones\_Hidrolog
- Capital\_Provincias
- lagos
- Perimetro de Cuenca
- Thiessen2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

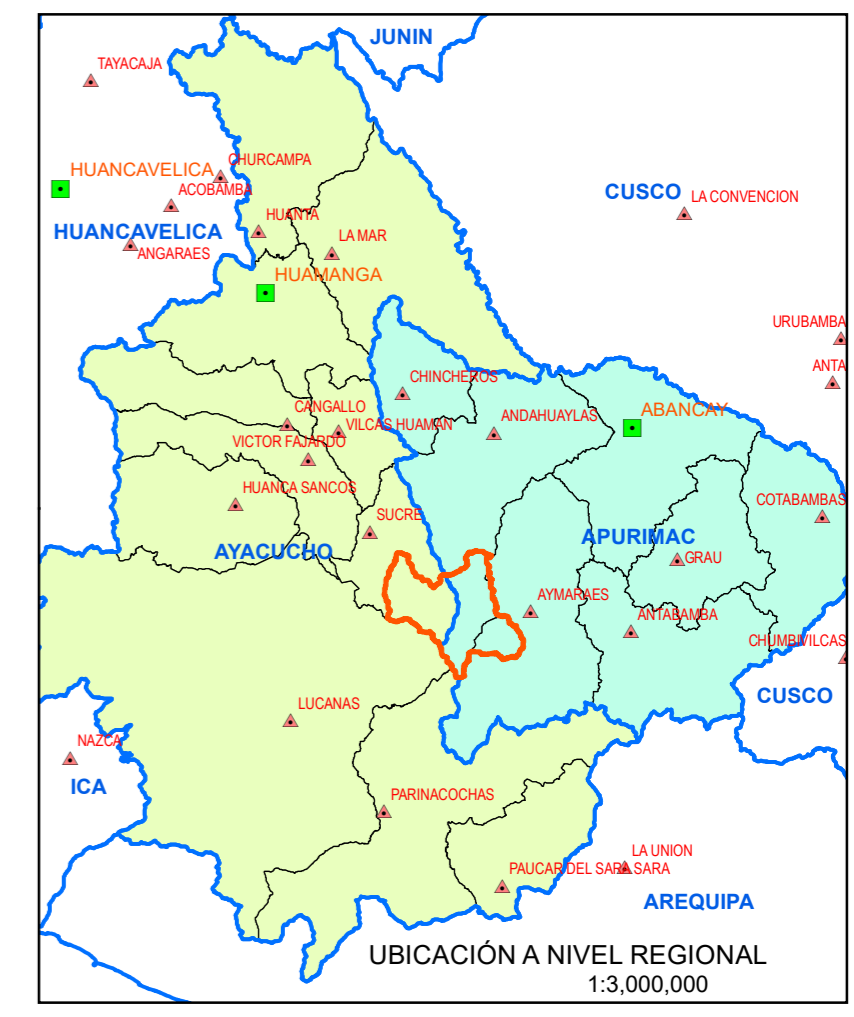
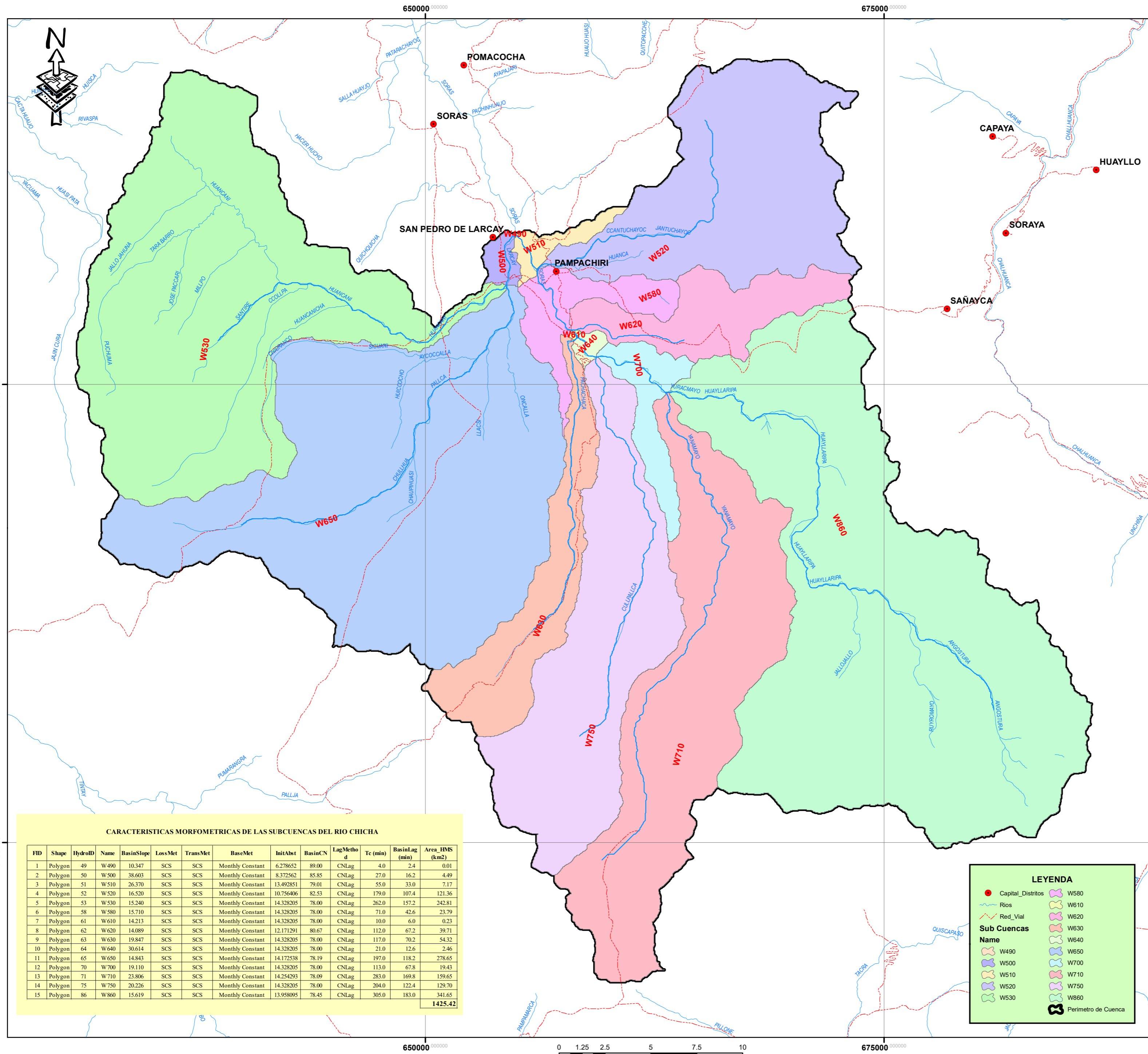
TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"

PLANO: UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

TESISTA: Boch. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO      ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR      LÁMINA: 2/18

DESIGNO: F. Edizon Zarabia      REVISADO: Ing. L. Arias      ESCALA: INDICADA      FECHA: JUNIO 2016      **UB-02**

COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA: 18L

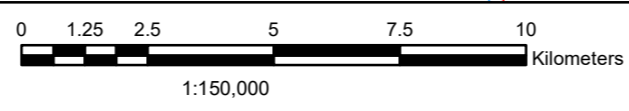


**CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO CHICHA**

| FID            | Shape   | HydroID | Name | BasinSlope | LossMet | TransMet | BaseMet          | InitAbst  | BasinCN | LagMetho | Tc (min) | BasinLag (min) | Area_HMS (km2) |
|----------------|---------|---------|------|------------|---------|----------|------------------|-----------|---------|----------|----------|----------------|----------------|
| 1              | Polygon | 49      | W490 | 10.347     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 6.278652  | 89.00   | CNlag    | 4.0      | 2.4            | 0.01           |
| 2              | Polygon | 50      | W500 | 38.603     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 8.372562  | 85.85   | CNlag    | 27.0     | 16.2           | 4.49           |
| 3              | Polygon | 51      | W510 | 26.370     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 13.492851 | 79.01   | CNlag    | 55.0     | 33.0           | 7.17           |
| 4              | Polygon | 52      | W520 | 16.520     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 10.756406 | 82.53   | CNlag    | 179.0    | 107.4          | 121.36         |
| 5              | Polygon | 53      | W530 | 15.240     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 262.0    | 157.2          | 242.81         |
| 6              | Polygon | 58      | W580 | 15.710     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 71.0     | 42.6           | 23.79          |
| 7              | Polygon | 61      | W610 | 14.213     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 10.0     | 6.0            | 0.23           |
| 8              | Polygon | 62      | W620 | 14.089     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 12.171291 | 80.67   | CNlag    | 112.0    | 67.2           | 39.71          |
| 9              | Polygon | 63      | W630 | 19.847     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 117.0    | 70.2           | 54.32          |
| 10             | Polygon | 64      | W640 | 30.614     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 21.0     | 12.6           | 2.46           |
| 11             | Polygon | 65      | W650 | 14.843     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.172538 | 78.19   | CNlag    | 197.0    | 118.2          | 278.65         |
| 12             | Polygon | 70      | W700 | 19.110     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 113.0    | 67.8           | 19.43          |
| 13             | Polygon | 71      | W710 | 23.806     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.254293 | 78.09   | CNlag    | 283.0    | 169.8          | 159.65         |
| 14             | Polygon | 75      | W750 | 20.226     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 14.328205 | 78.00   | CNlag    | 204.0    | 122.4          | 129.70         |
| 15             | Polygon | 86      | W860 | 15.619     | SCS     | SCS      | Monthly Constant | 13.958095 | 78.45   | CNlag    | 305.0    | 183.0          | 341.65         |
| <b>1425.42</b> |         |         |      |            |         |          |                  |           |         |          |          |                |                |

**LEYENDA**

- Capital\_Distritos
- Rios
- Red\_Vial
- Sub Cuencas
- Name
- W490
- W500
- W510
- W520
- W530
- W580
- W610
- W620
- W630
- W640
- W650
- W700
- W710
- W750
- W860
- Perimetro de Cuenca



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"

PLANO: **CARTOGRAFÍA DE LA CUENCA**

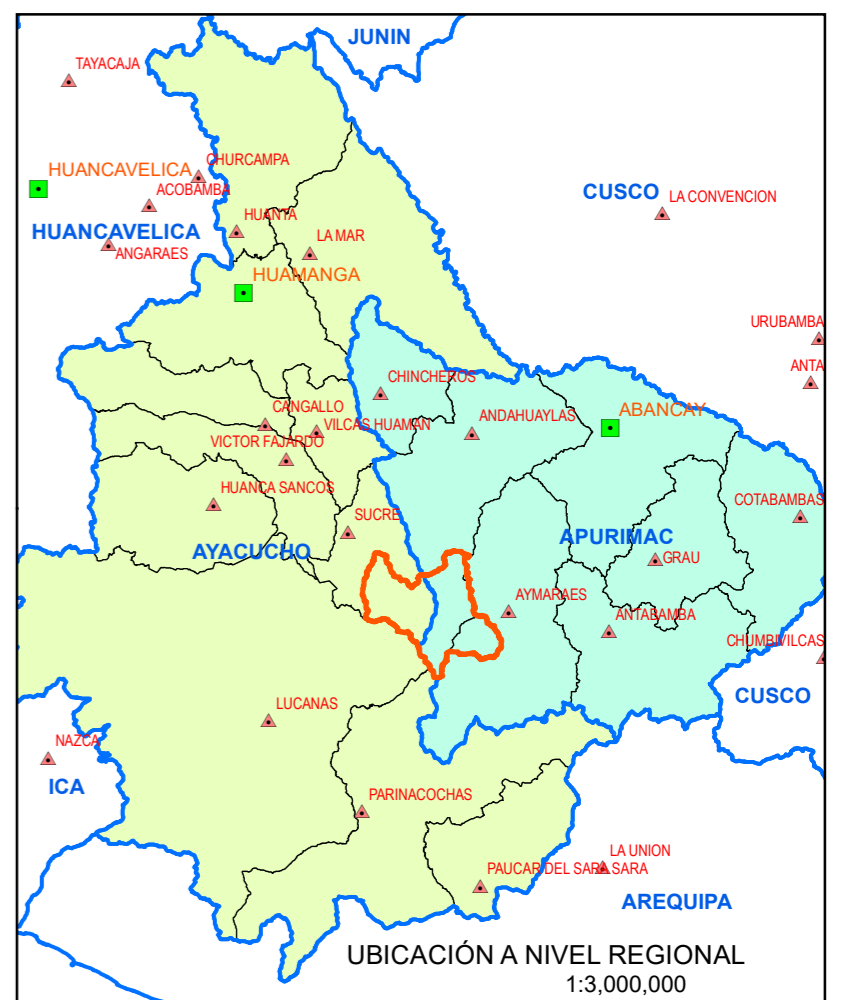
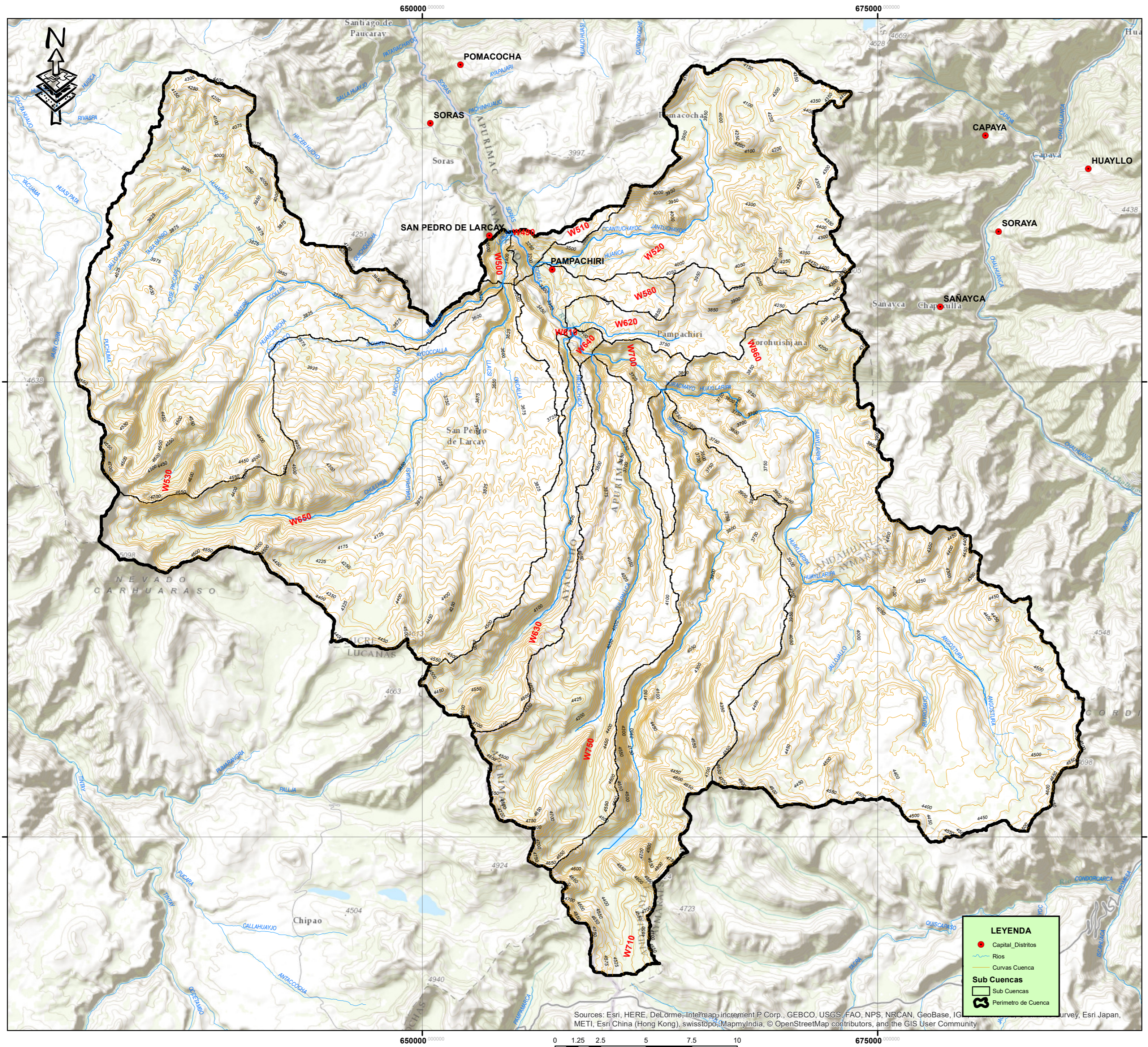
FECHA: 3/18

BOCH: Bach. FADER EDZON ZARABIA ROMERO      ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARVAS BALTAZAR

DEBUI: F. Edizon Zarabia      REVISADO: Ing. L. Arias      ESCALA: INDICADA      FECHA: JUNIO 2016

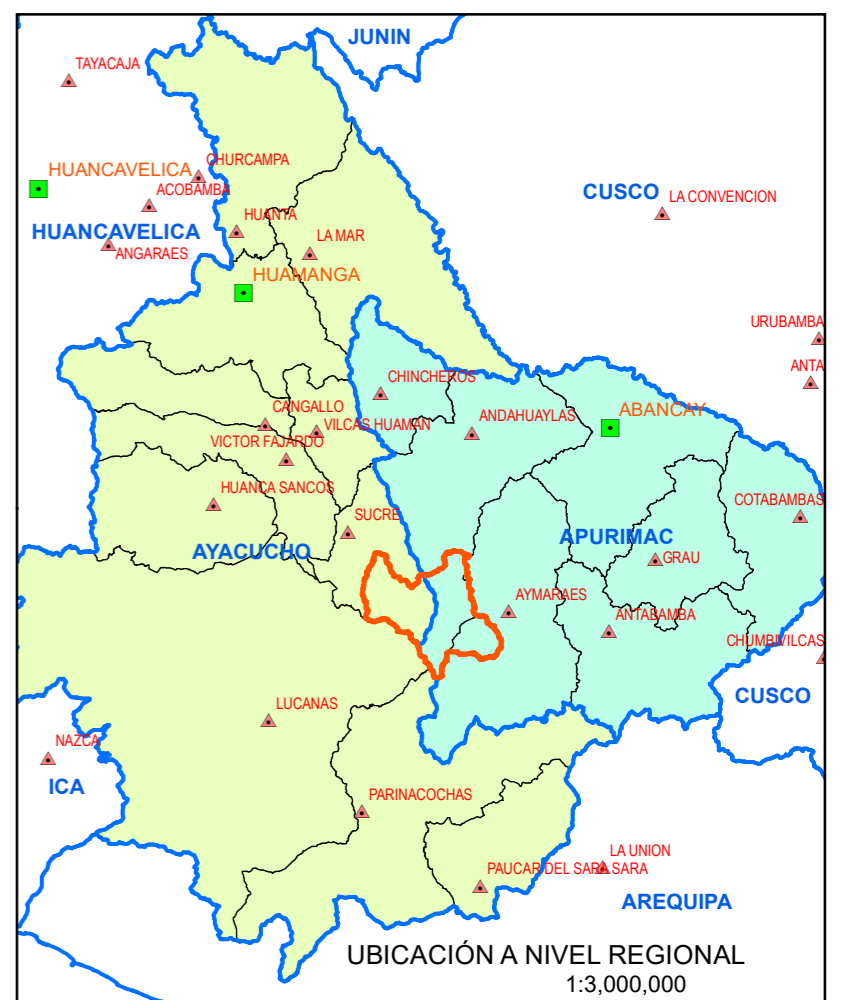
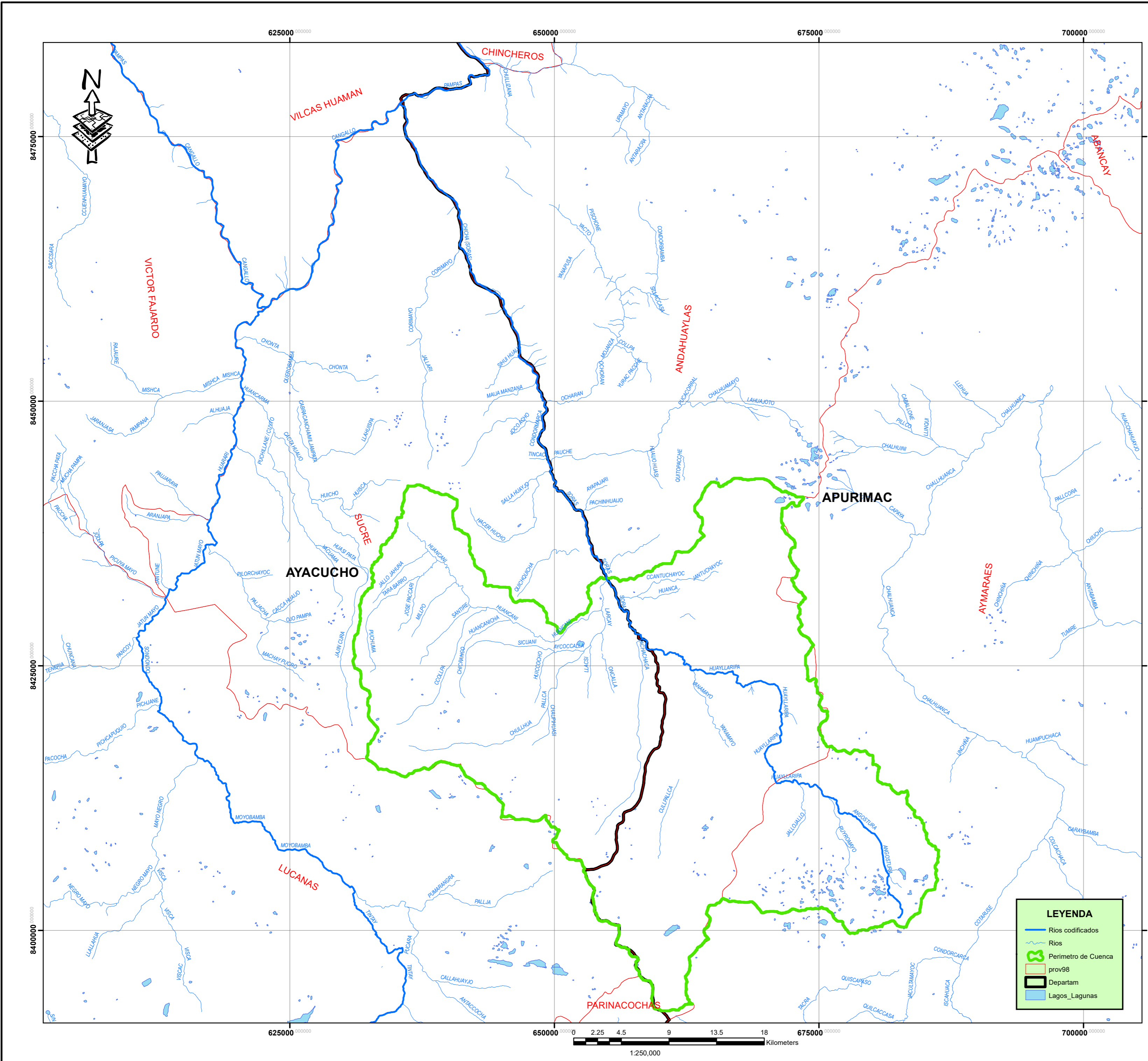
EH-01

COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA: 18L



|  |   |                                      |                     |
|--|---|--------------------------------------|---------------------|
|   |   |                                      |                     |
| <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b><br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA                |   |                                      |                     |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CAÑALES DEL RÍO CHICHA, MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |   |                                      |                     |
| <b>TOPOGRAFÍA DE LA CUENCA</b>   |   |                                      |                     |
| TESISISTA:<br>Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO  | ASESOR:<br>Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LAMINA: 4/18                         |                     |
| DIBUJÓ:<br>F. Edizon Zarabia   | DISEÑO:<br>F. Edizon Zarabia                      | REVISADO:<br>Ing. L. Arias           | ESCALA:<br>INDICADA |
| FECHA:<br>JUNIO 2016   |   | COORDENADAS UTM: WGS-84<br>ZONA: 18E |                     |

Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

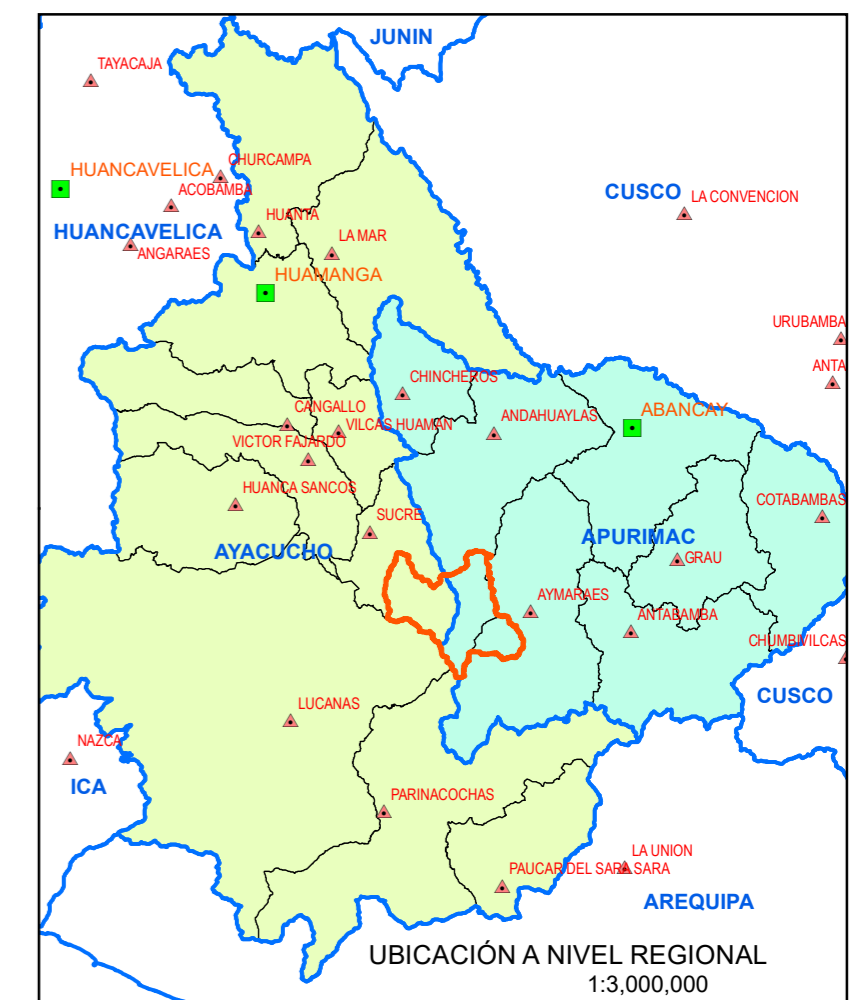
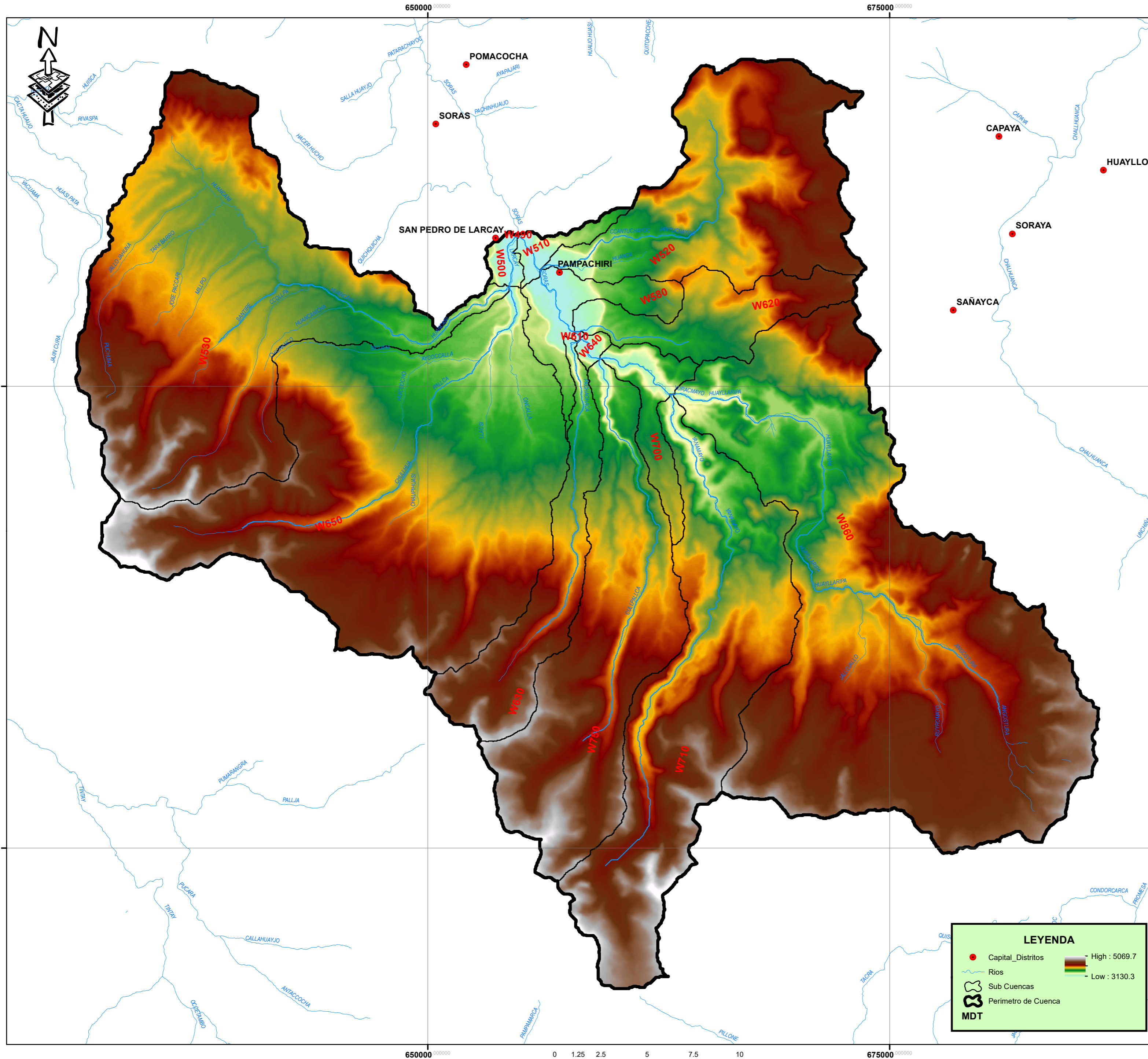


**LEYENDA**

- Rios codificados
- Rios
- Perimetro de Cuenca
- prov98
- Departam
- Lagos\_Lagunas

|   |                                   |         |                   |                                       |                 |
|---|-----------------------------------|---------|-------------------|---------------------------------------|-----------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b><br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA |                                   |         |                   |                                       |                 |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"   |                                   |         |                   |                                       |                 |
| <b>HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA</b>   |                                   |         |                   |                                       |                 |
| PLANO:  | Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO |         | ASESOR:           | Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTARZ |                 |
| TESISTA:  | Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO |         | REVISADO:         | Ing. L. Arias                         |                 |
| DIBUJO:   | F. Edizon Zarabia                 | DISEÑO: | F. Edizon Zarabia | ESCALA:                               | INDICADA        |
| FECHA:  | JUNIO 2016                        |         | FECHA:            | JUNIO 2016                            |                 |
|   |                                   |         |                   | LÁMINA:                               | 5/18            |
|   |                                   |         |                   | COORDENADAS UTM:                      | WGS-84 ZONA 18L |

**EH-03**



**LEYENDA**

- Capital\_Distritos
- Rios
- Sub Cuencas
- Perimetro de Cuenca
- MDT

High : 5069.7  
Low : 3130.3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"

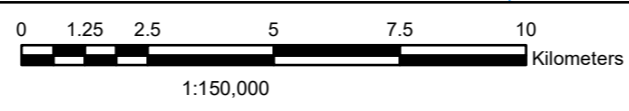
PLANO: **MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LA CUENCA (MED)**

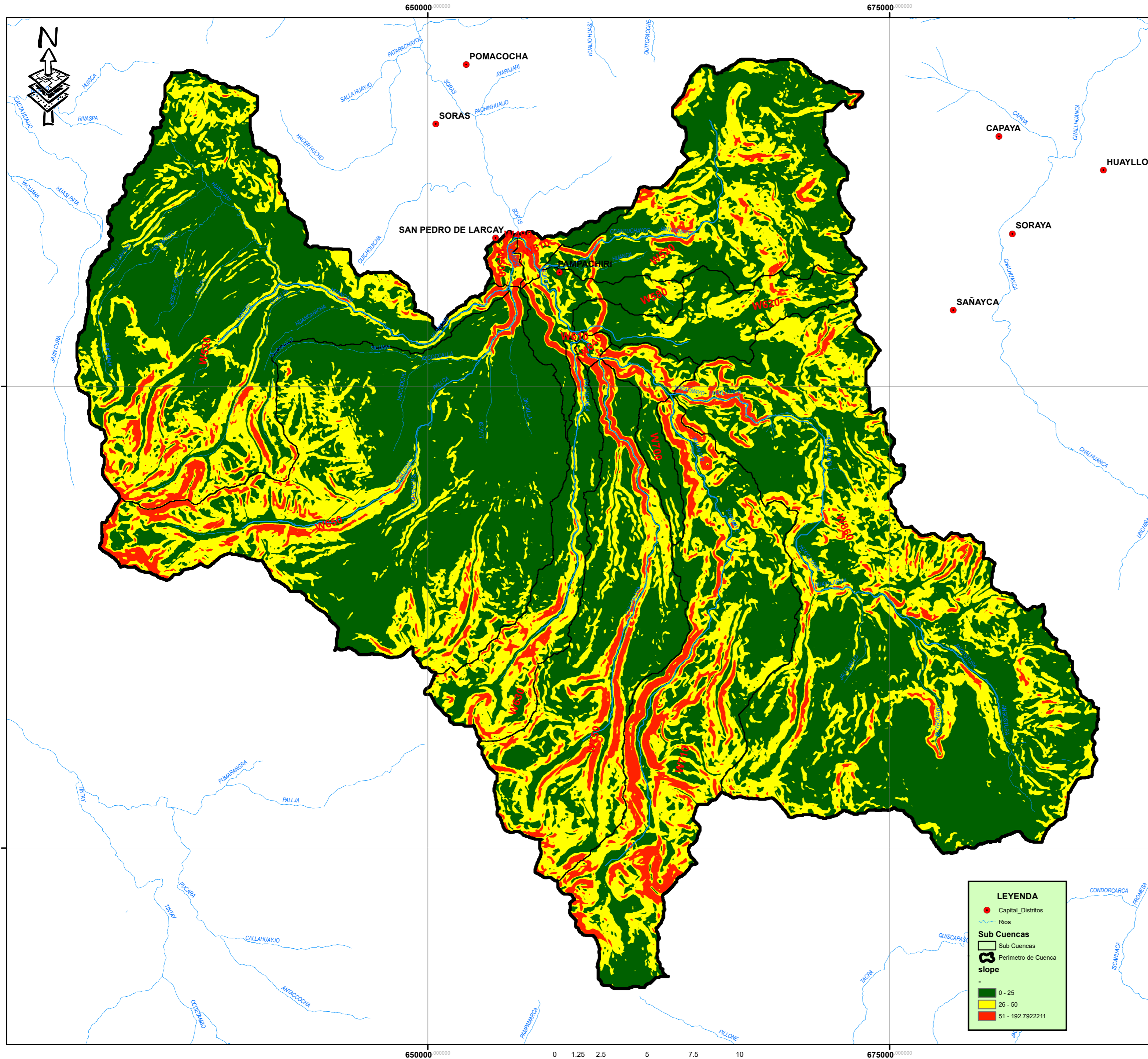
TESISTA: Boch. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO      ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR      LÍMITE: 6/18

DISEÑO: F. Edizon Zarabia      REVISADO: Ing. L. Arias      ESCALA: INDICADA      FECHA: JUNIO 2016

**EH-04**

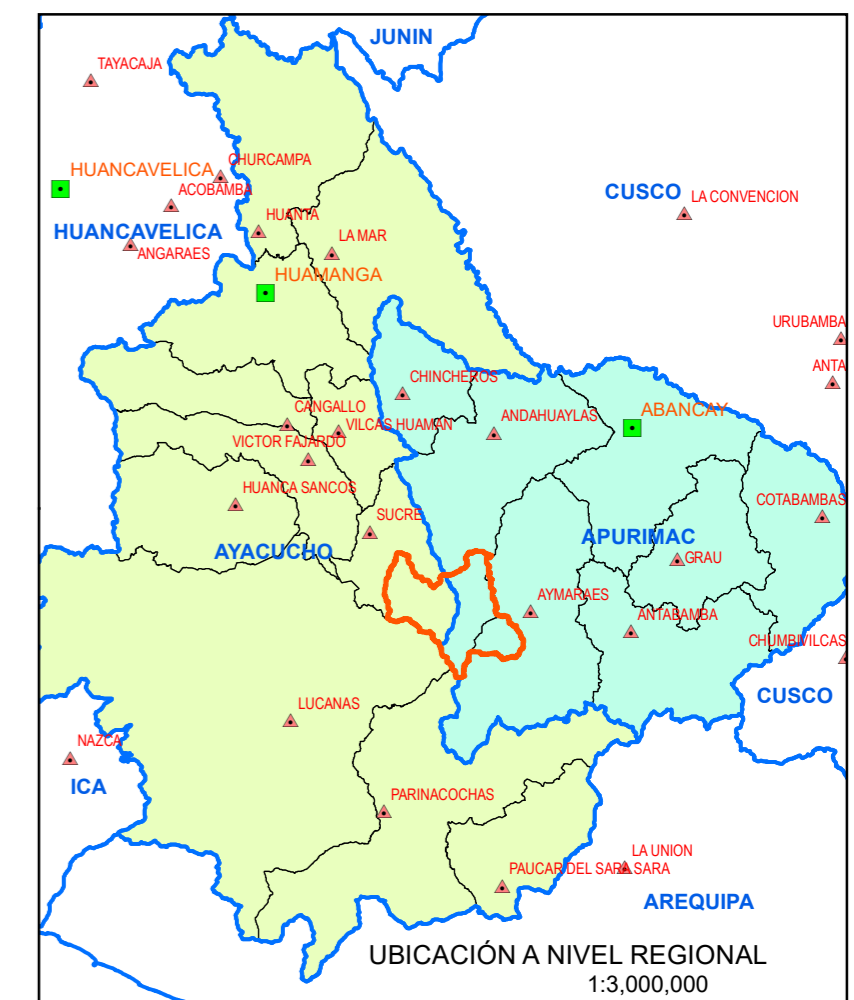
COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA: 18L



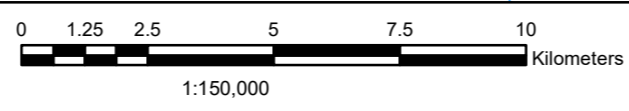


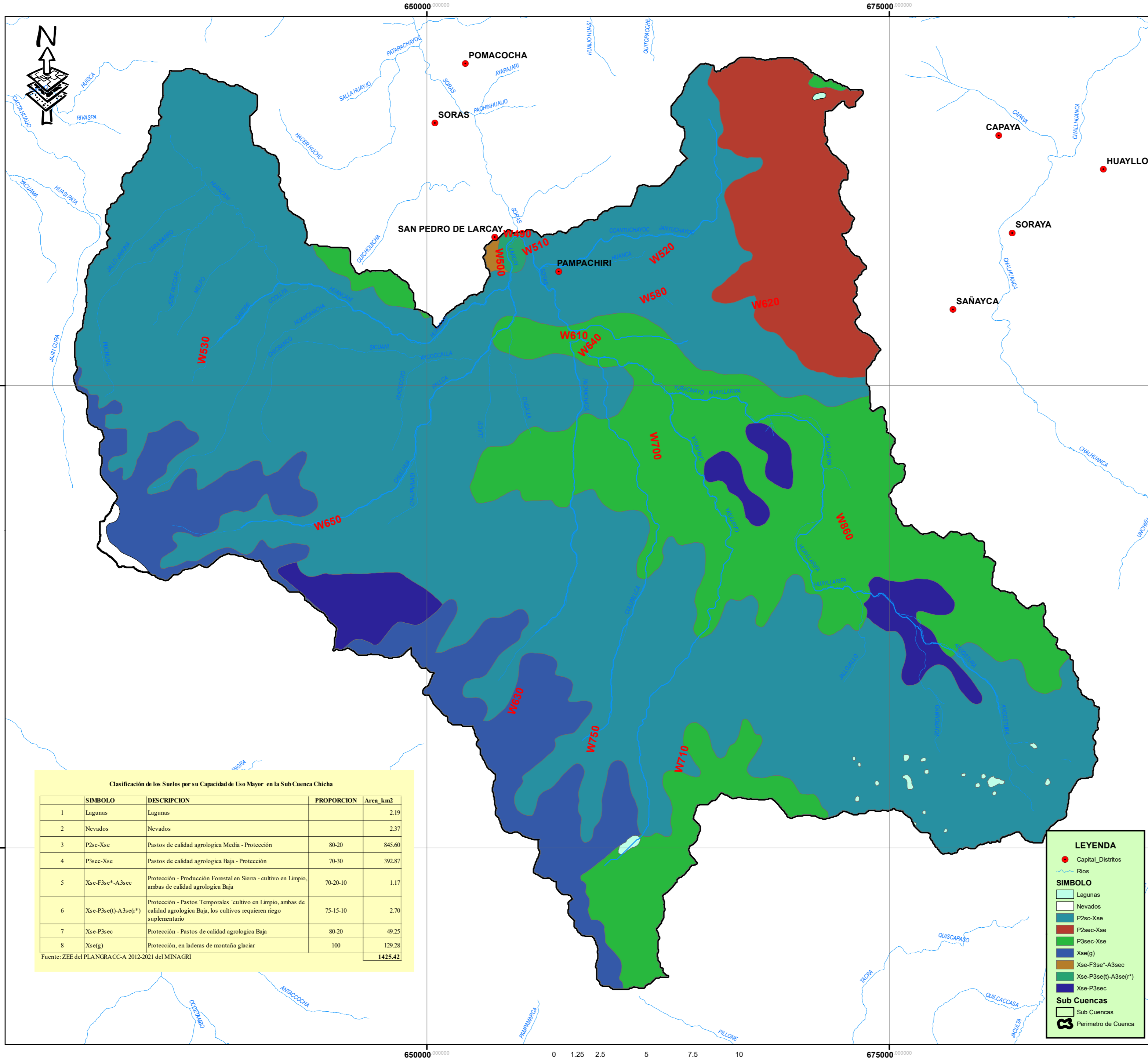
**LEYENDA**

- Capital\_Distritos
- ~ Rios
- Sub Cuentas
- Sub Cuentas
- ⊞ Perimetro de Cuenca
- slope
- 0 - 25
- 26 - 50
- 51 - 192.7922211



|   |  |               |                                      |
|---|--|---------------|--------------------------------------|
|   |  |               |                                      |
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA<br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA                      |  |               |                                      |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |  |               |                                      |
| PLANO: <b>PENDIENTES DE LA CUENCA</b>   |  |               |                                      |
| REGISTRO:   | BOCH:                                  | ASESOR:       | LUMINA:                              |
| Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO   | Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | 7/18          |                                      |
| DIBUJO:   | DISEÑO:                                | REVISADO:     | ESCALA:                              |
| F. Edizon Zarabia   | F. Edizon Zarabia                      | Ing. L. Arias | INDICADA                             |
|   |  |               | FECHA:                               |
|   |  |               | JUNIO 2016                           |
|   |  |               | COORDENADAS UTM: WGS-84<br>ZONA: 18S |



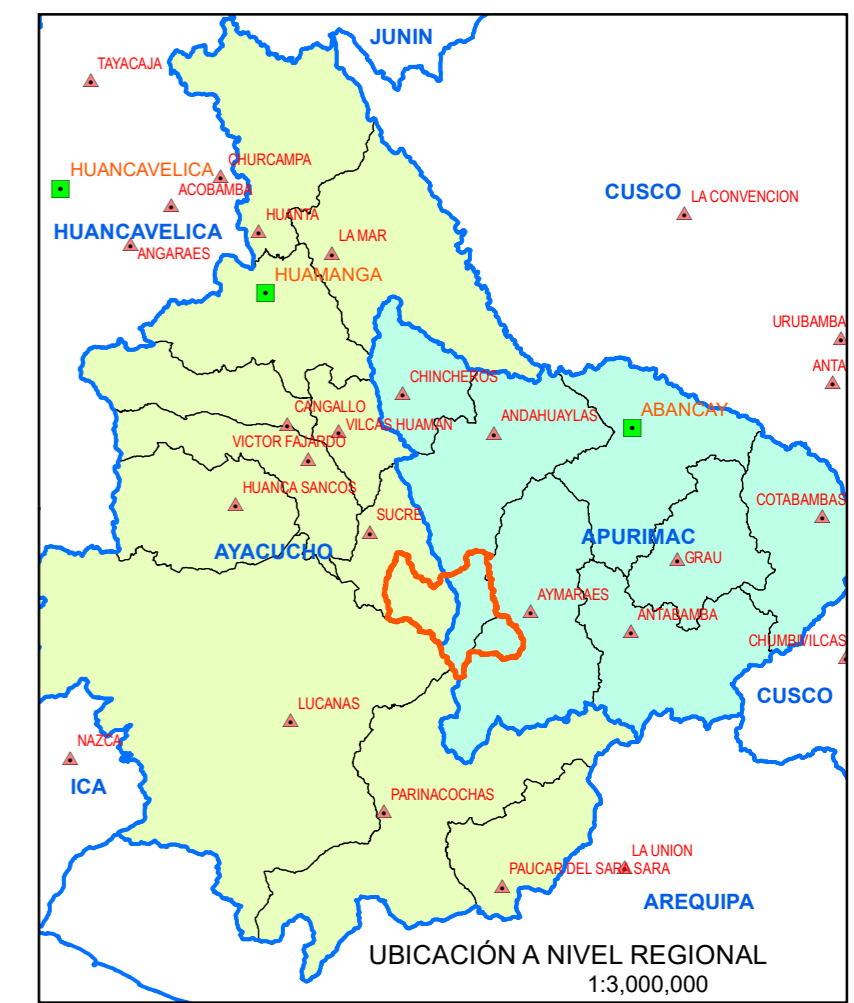


**Clasificación de los Suelos por su Capacidad de Uso Mayor en la Sub Cuenca Chicha**

| SÍMBOLO  | DESCRIPCIÓN         | PROPORCIÓN | Área km <sup>2</sup> |
|--|---------------------|------------|----------------------|
| 1  | Lagunas             |            | 2.19                 |
| 2  | Nevados             |            | 2.37                 |
| 3  | P2sc-Xsc            | 80-20      | 845.60               |
| 4  | P3sec-Xsc           | 70-30      | 392.87               |
| 5  | Xsc-F3se*-A3sec     | 70-20-10   | 1.17                 |
| 6  | Xsc-P3se(t)-A3se(*) | 75-15-10   | 2.70                 |
| 7  | Xsc-P3sec           | 80-20      | 49.25                |
| 8  | Xsc(g)              | 100        | 129.28               |
| Fuente: ZEE del PLANRACC-A 2012-2021 del MINAGRI |                     |            | <b>1425.42</b>       |

**LEYENDA**

- Capital\_Distritos
- ~ Ríos
- SÍMBOLO**
- Lagunas
- Nevados
- P2sc-Xsc
- P3sec-Xsc
- Xsc(g)
- Xse-F3se\*-A3sec
- Xse-P3se(t)-A3se(\*)
- Xse-P3sec
- Sub Cuenclas**
- Sub Cuenclas
- ⊞ Perimetro de Cuenca



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"

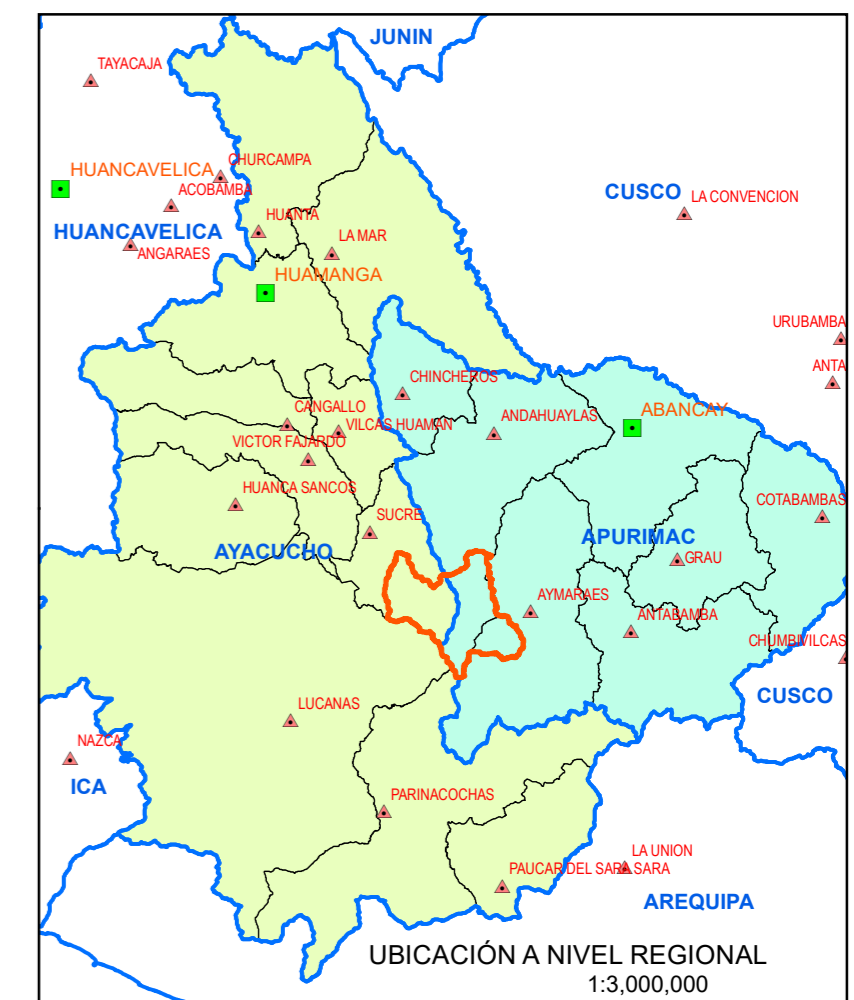
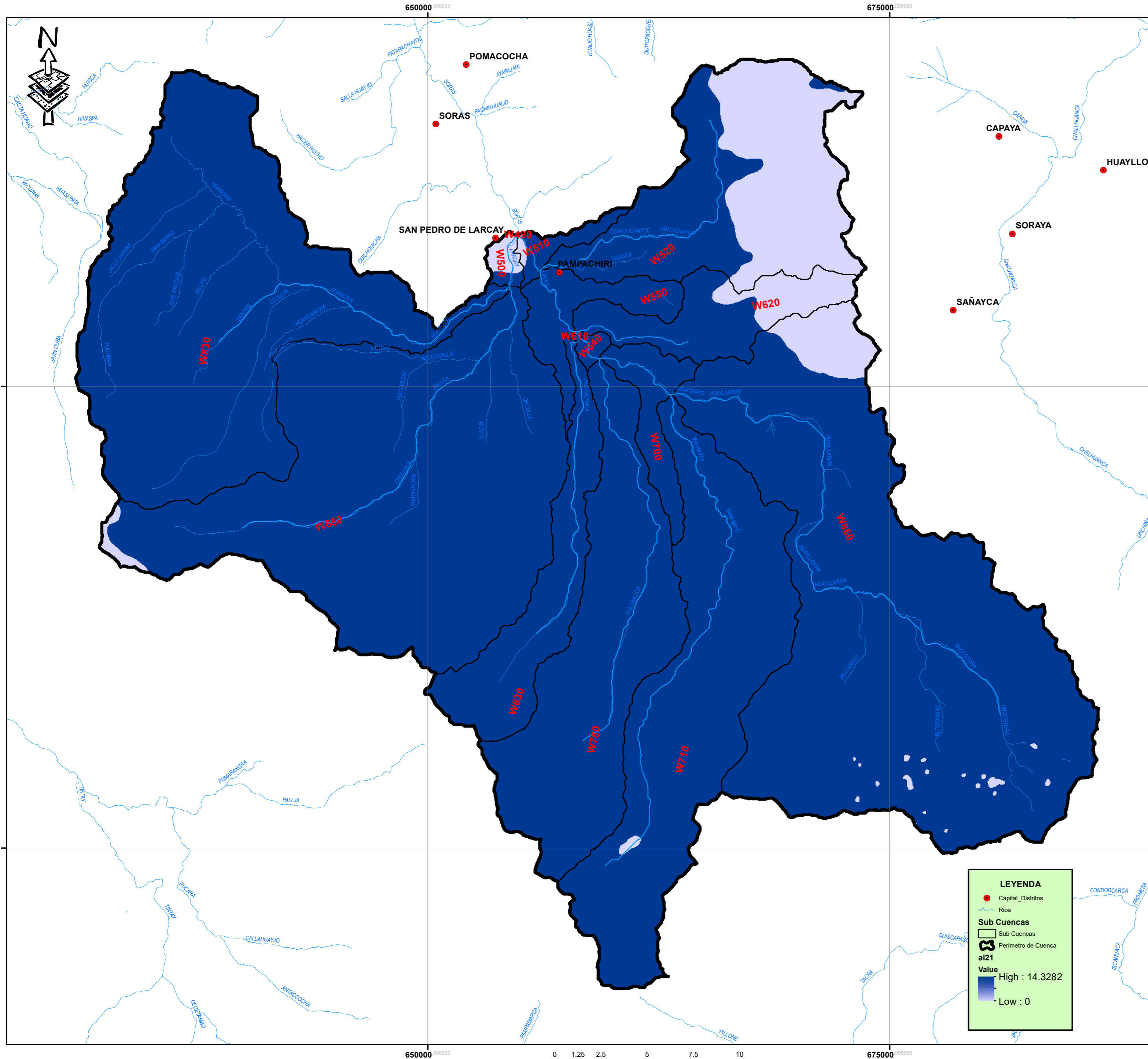
PLANO: **CAPACIDAD DE USO MAYOR DE SUELOS**

TESTA: Bach. FADIER EDIZON ZARABIA ROMERO      ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR      LAMINA: 8/18

DIBUJO: F. Edizon Zarabia      DISEÑO: F. Edizon Zarabia      REVISADO: Ing. L. Arias      ESCALA: INDICADA      FECHA: JUNIO 2016

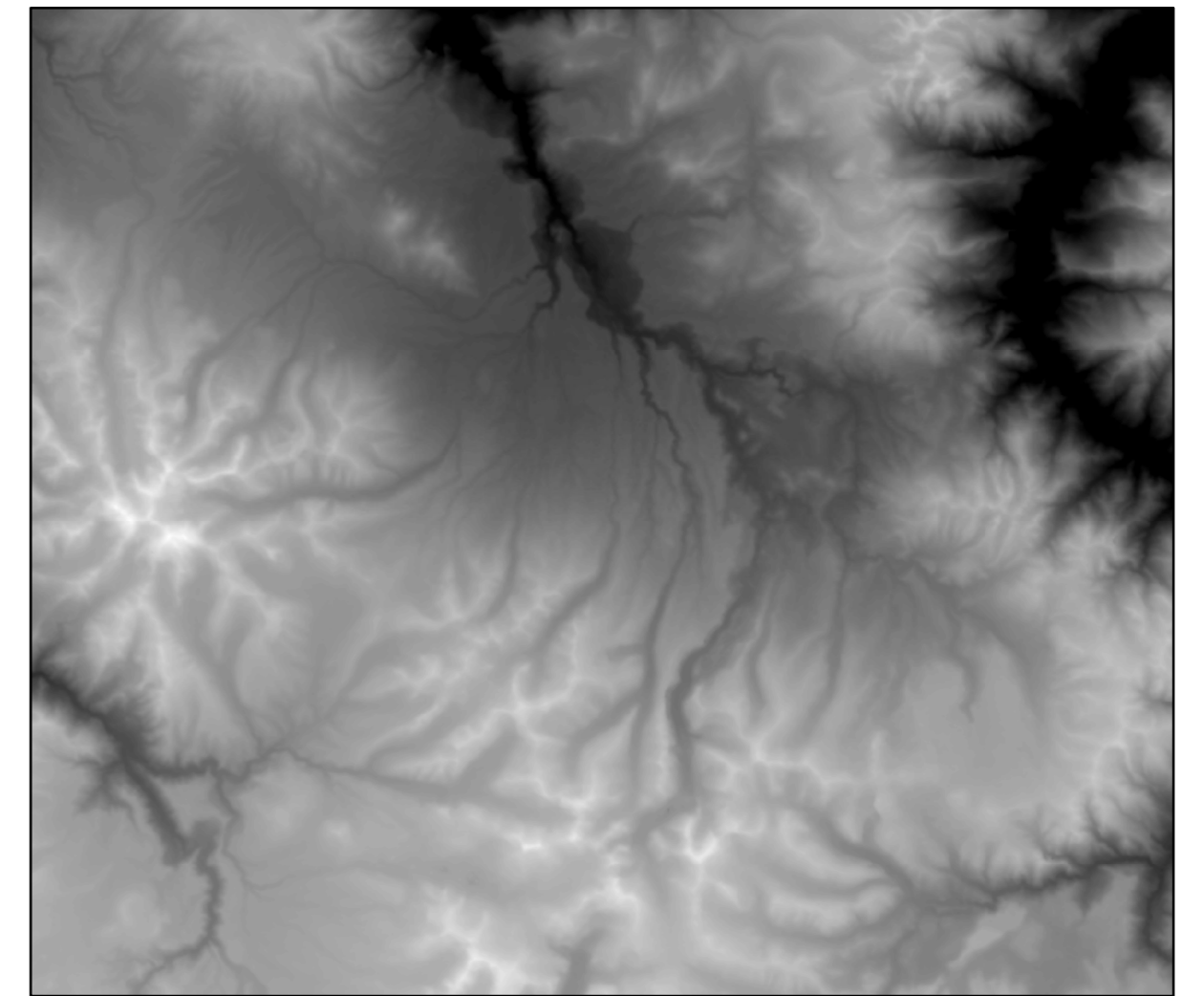
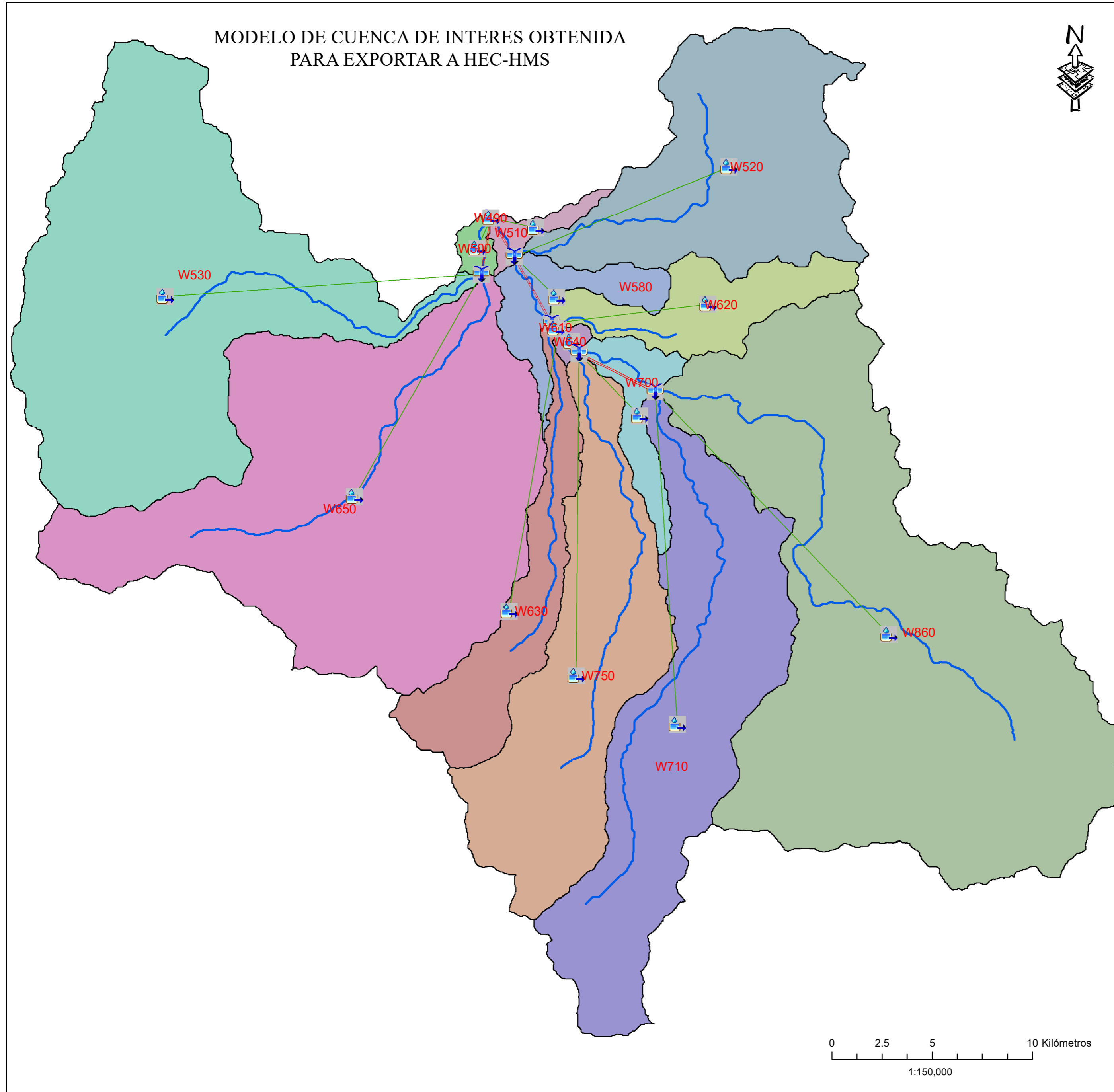
**Eh-06**  
COORDENADAS UTM WGS-84 ZONA 18L



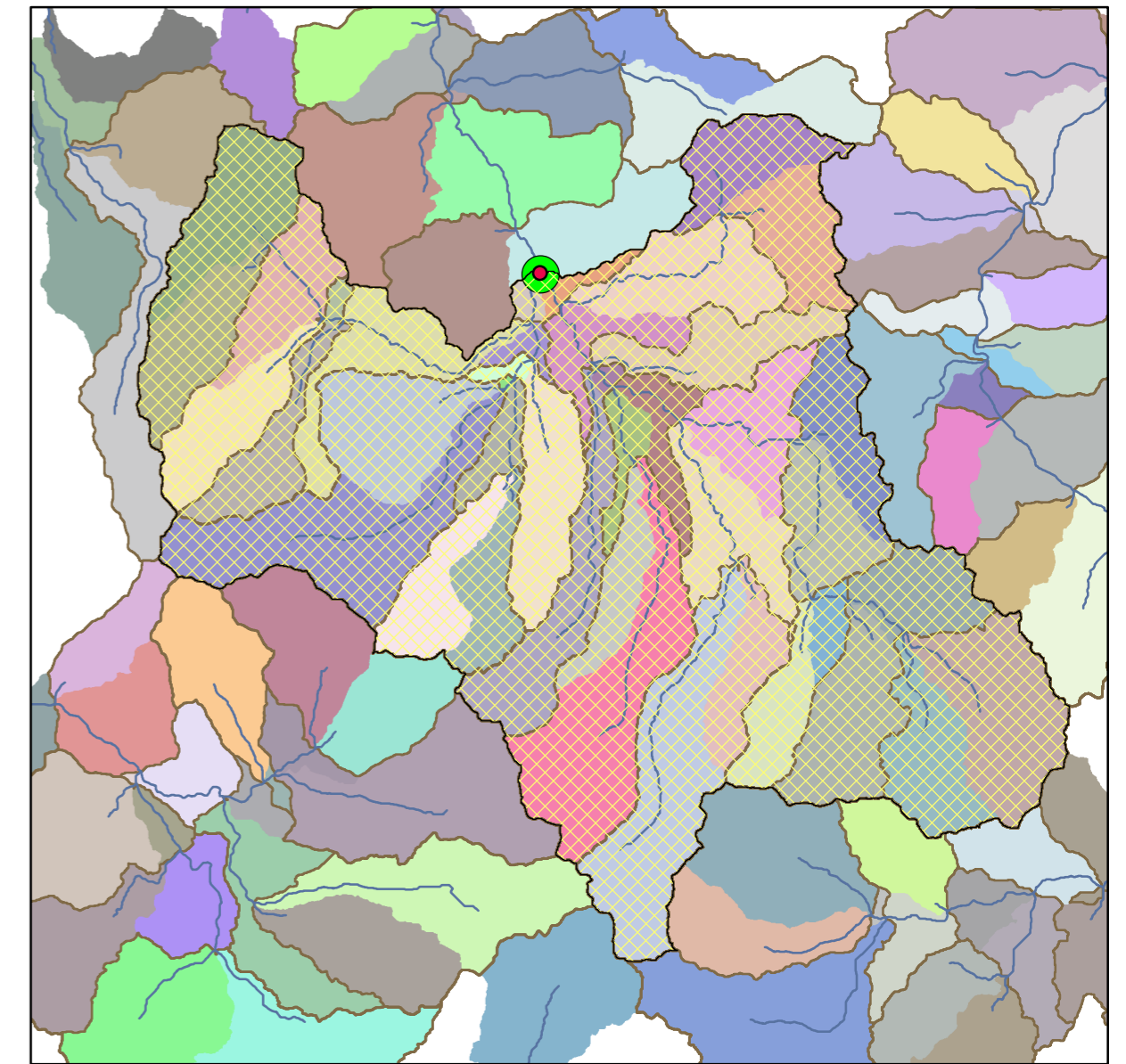


|   |                                   |  |                                   |
|---|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA</b><br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA |                                   |  |                                   |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"   |                                   |  |                                   |
| <b>ABSTRACCIÓN INICIAL DE LAS CUENCAS (ai)</b>  |                                   |  |                                   |
| PLANO:  | TESTISTA:                         | ASESOR:                                | LÁMINA:                           |
|   | Boch. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO | Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | 10/18                             |
| DIBUJO:   | DISEÑO:                           | REVISADO:                              | ESCALA:                           |
| F. Edizon Zarabia   | F. Edizon Zarabia                 | Ing. L. Arias                          | INDICADA                          |
|   |                                   |  | FECHA:                            |
|   |                                   |  | JUNIO 2016                        |
|   |                                   |  | COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA: 18L |
|   |                                   |  | <b>EH-08</b>                      |

DTM: DEM 1:400,000



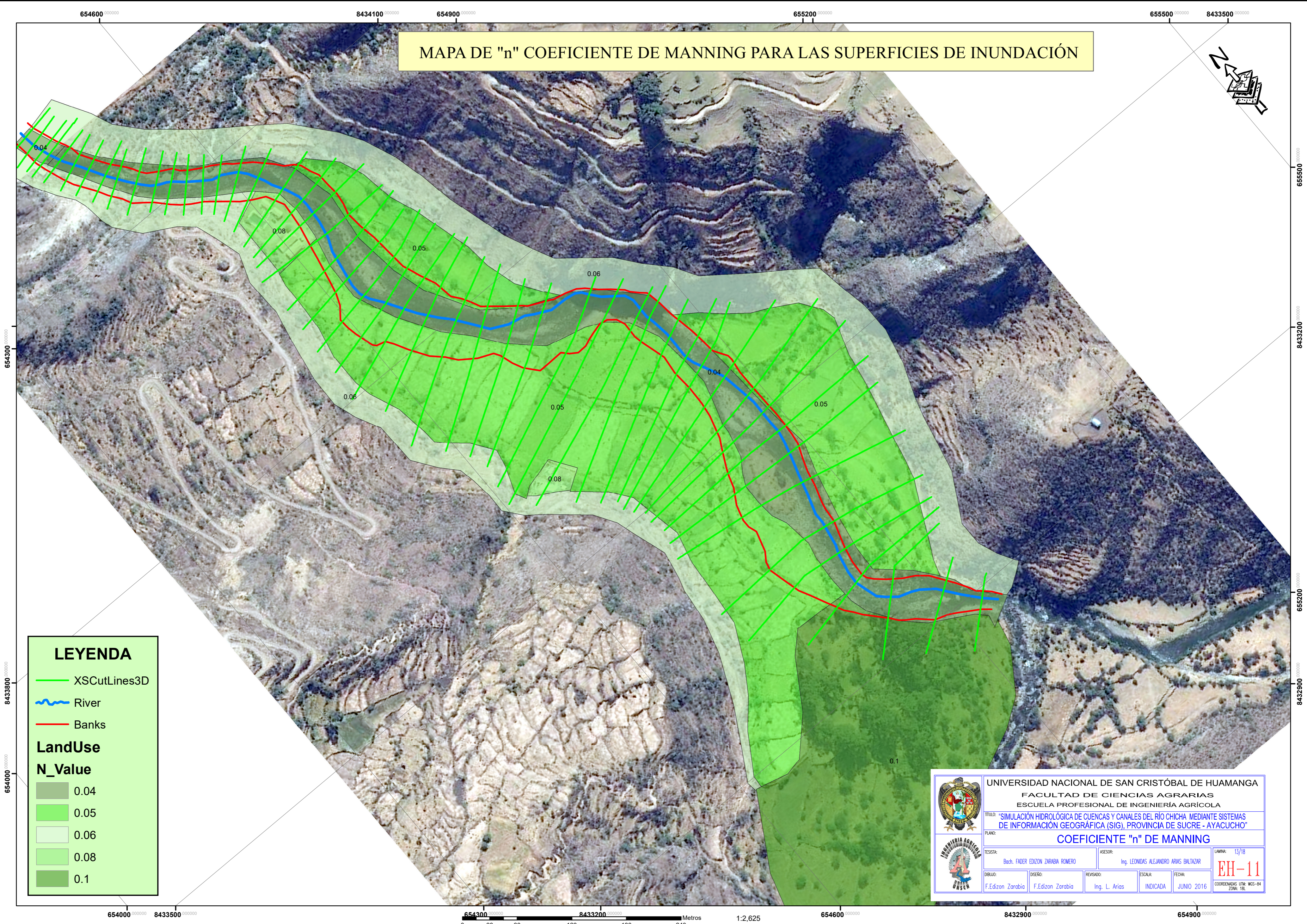
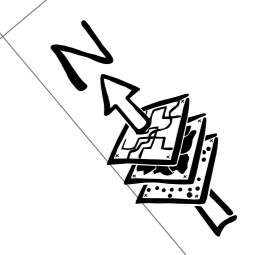
OBTENCIÓN DE SUBCUENCAS 1:400,000



|          |   |         |  |                                      |
|----------|---|---------|--|--------------------------------------|
|          | UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA   |         |  |                                      |
|          | FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA   |         |  |                                      |
|          | TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |         |  |                                      |
|          | PLANO: <b>SUB CUENCAS Y RÍOS PARA EL MODELO HEC-HMS</b>   |         |  |                                      |
| TESISTA: | Boch. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO   | ASESOR: | Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LAMINA: 11/18                        |
| DIBUJO:  | F. Edizon Zarabia   | DISEÑO: | F. Edizon Zarabia                      | REVISADO:                            |
|          |   |         | Ing. L. Arias                          | ESCALA:                              |
|          |   |         | INDICADA                               | FECHA:                               |
|          |   |         |  | JUNIO 2016                           |
|          |   |         |  | COORDENADAS UTM: WGS-84<br>ZONA: 18L |

**EH-09**

MAPA DE "n" COEFICIENTE DE MANNING PARA LAS SUPERFICIES DE INUNDACIÓN



**LEYENDA**

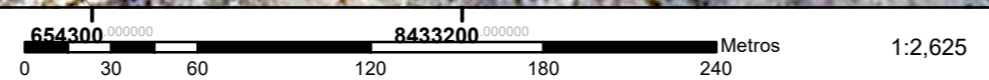
- XSCutLines3D
- ~ River
- Banks

**LandUse**

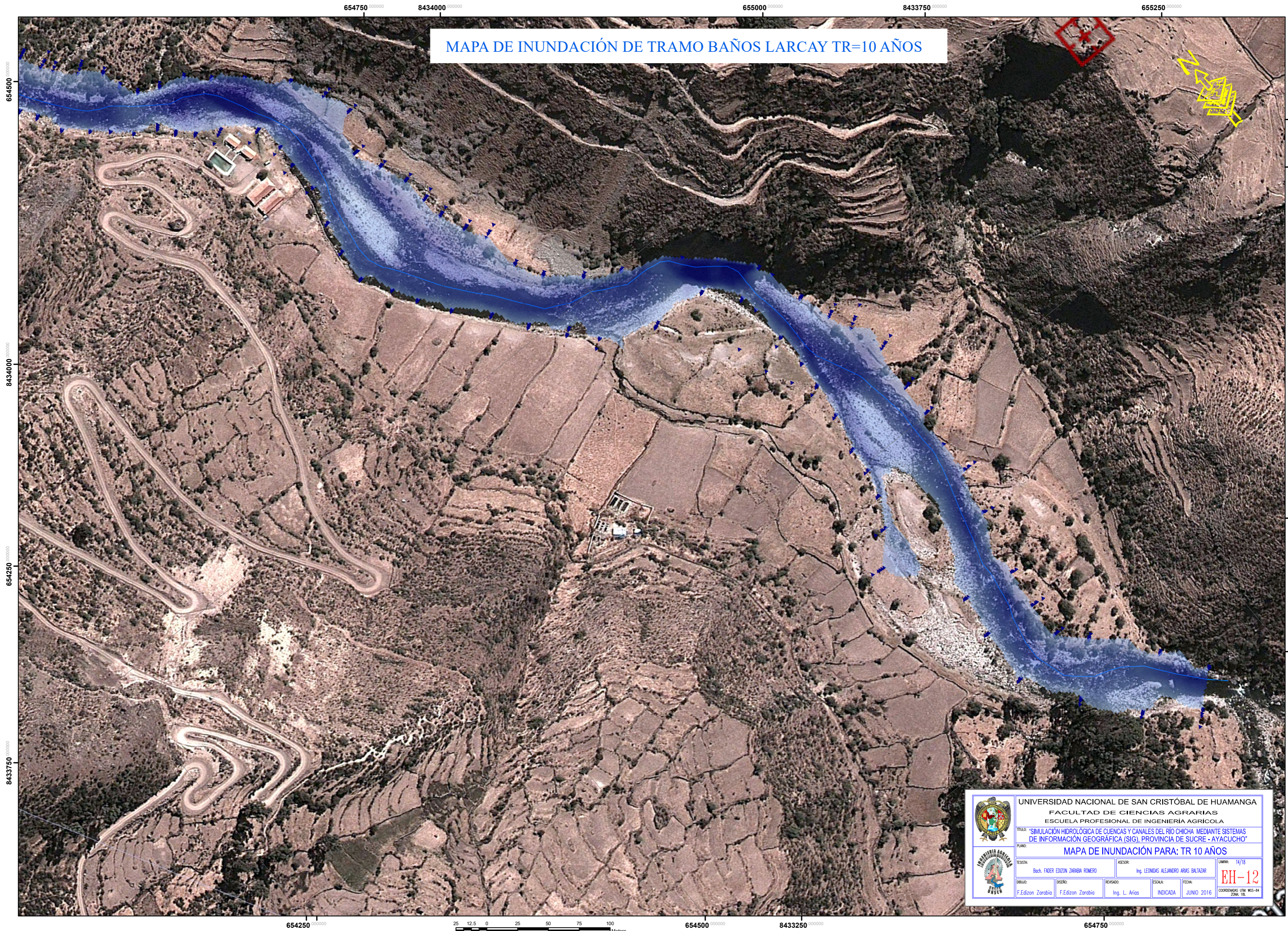
**N\_Value**

- 0.04
- 0.05
- 0.06
- 0.08
- 0.1

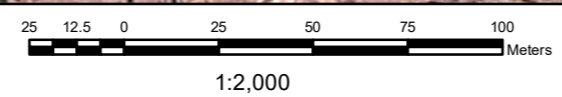
|  |  |                         |   |
|--|--|-------------------------|---|
|  UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA<br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA |  |                         |   |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"  |  |                         |   |
| PLANO: <b>COEFICIENTE "n" DE MANNING</b>   |  |                         |   |
| TESIS: Bach. FADIER EDIZON ZARABIA ROMERO  | ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LAMINA: 13/18           |   |
| DIBUJO: F. Edizon Zarabia  | DISEÑO: F. Edizon Zarabia                      | REVISADO: Ing. L. Arias | ESCALA: INDICADA<br>FECHA: JUNIO 2016                                     |
|  |  |                         | <span style="font-size: 2em; font-weight: bold; color: red;">EH-11</span> |
| COORDENADAS: UTM: WGS-84 ZONA: 18L   |  |                         |   |



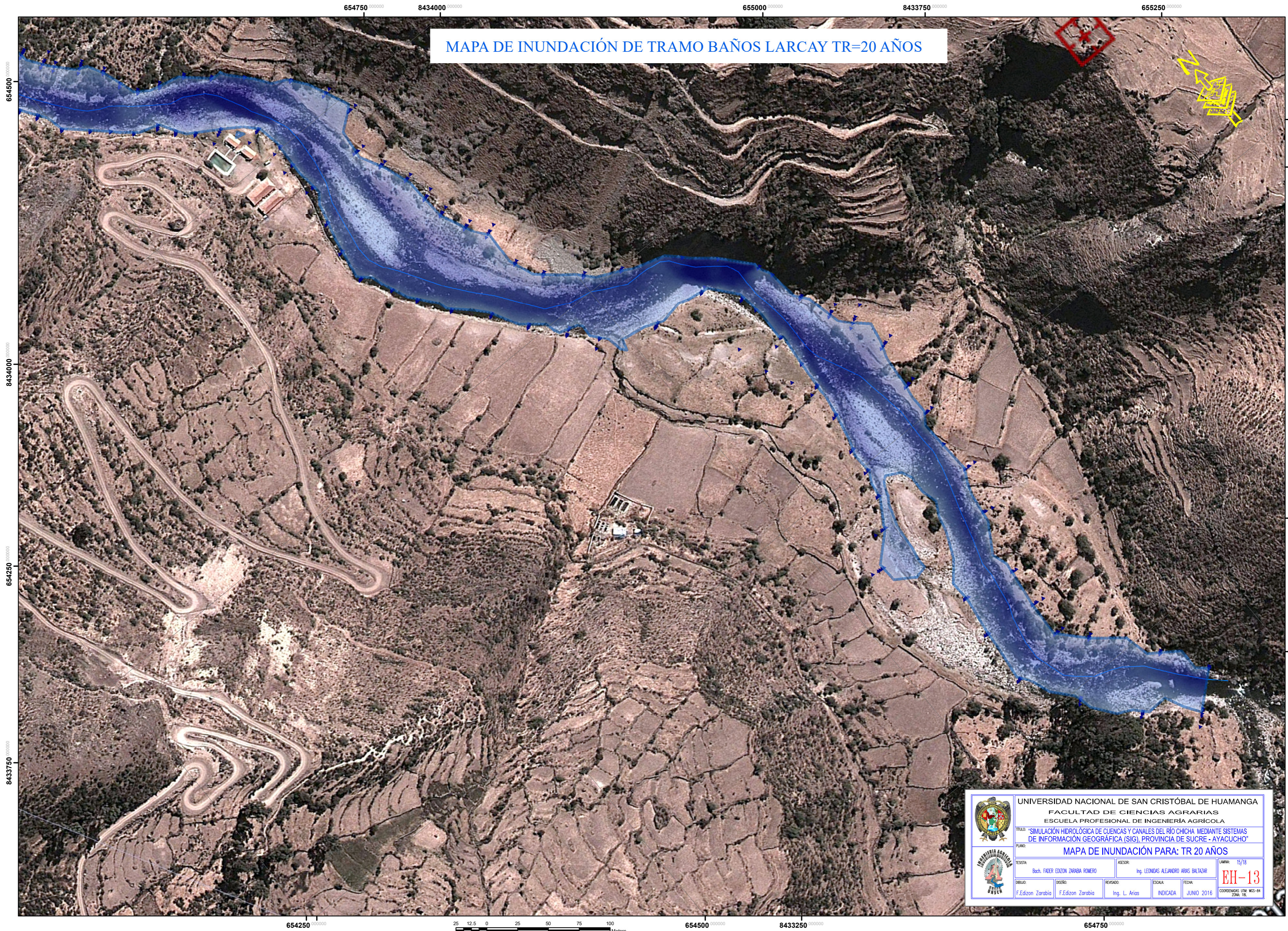
MAPA DE INUNDACIÓN DE TRAMO BAÑOS LARCAY TR=10 AÑOS



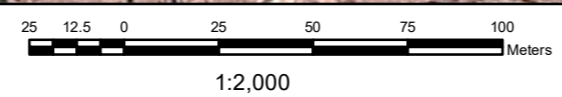
|  |   |                          |                     |
|--|---|--------------------------|---------------------|
|  UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA<br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA |   |                          |                     |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"  |   |                          |                     |
| PLANO: <b>MAPA DE INUNDACIÓN PARA: TR 10 AÑOS</b>  |   |                          |                     |
| TESISTA:<br>Bach. FADER EDZON ZARABIA ROMERO   | ASESOR:<br>Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LÁMINA: 14/18            |                     |
| DIBUJÓ:<br>F. Edizon Zorobio   | DISEÑO:<br>F. Edizon Zorobio                      | REVISÓ:<br>Ing. L. Arias | ESCALA:<br>INDICADA |
| JUNIO 2016   |   | FECHA:<br>JUNIO 2016     |                     |
| COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA 18S   |   | <b>EH-12</b>             |                     |



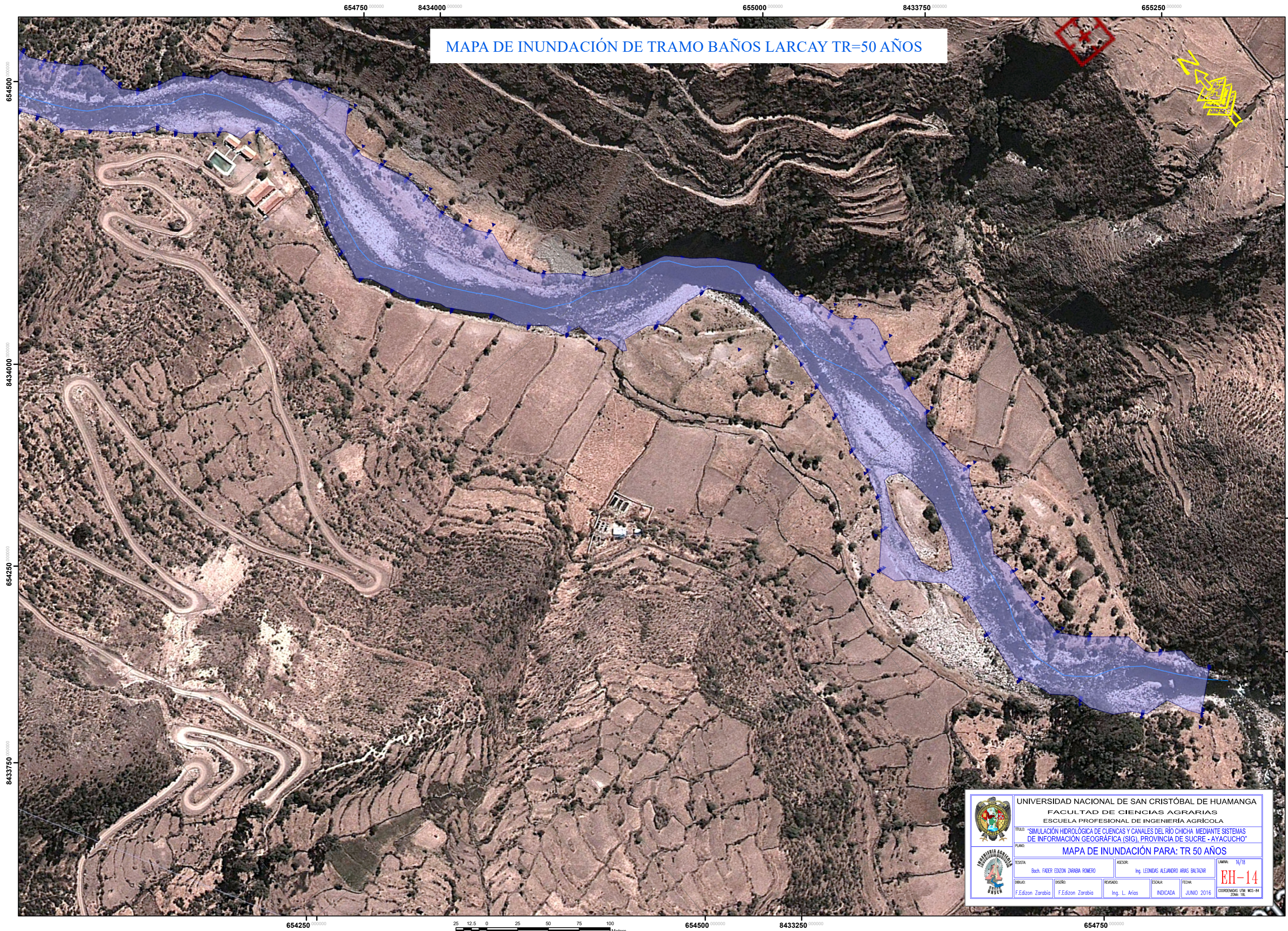
MAPA DE INUNDACIÓN DE TRAMO BAÑOS LARCAY TR=20 AÑOS



|   |                                   |  |  |
|---|-----------------------------------|--|--|
|    |                                   | UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA<br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA |  |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |                                   |  |  |
| PLANO:  |                                   | MAPA DE INUNDACIÓN PARA: TR 20 AÑOS  |  |
| TESIS:  | Bch. FALCER EDIZON ZARABIA ROMERO | ASESOR:  | Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARBAS BALTAZAR |
| DISEÑO:   | F. Edizon Zarabia                 | REVISADO:  | Ing. L. Arias                          |
| ESCALA:   |                                   | INDICADA   | JUNIO 2016                             |
| LAMINA: 15/18   |                                   |  | <b>EH-13</b>                           |
| COORDENADAS UTM: 654250 8433750   |                                   |  |  |



# MAPA DE INUNDACIÓN DE TRAMO BAÑOS LARCAY TR=50 AÑOS



|  |   |  |               |
|--|---|--|---------------|
|  | UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA   |  |               |
|  | FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA   |  |               |
|  | TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |  |               |
|  | PLANO: <b>MAPA DE INUNDACIÓN PARA: TR 50 AÑOS</b>   |  |               |
|  | TESISTA: Bach. FIDER EDIZON ZAPABA ROMERO   | ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LÁMINA: 16/18 |
|  | DIBUJÓ: F. Edizon Zarabia   | REVISÓ: F. Edizon Zarabia                      | ING. L. Arias |
|  | ESCALA: INDICADA  | FECHA: JUNIO 2016                              | <b>EH-14</b>  |
|  | COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA 18S  |  |               |

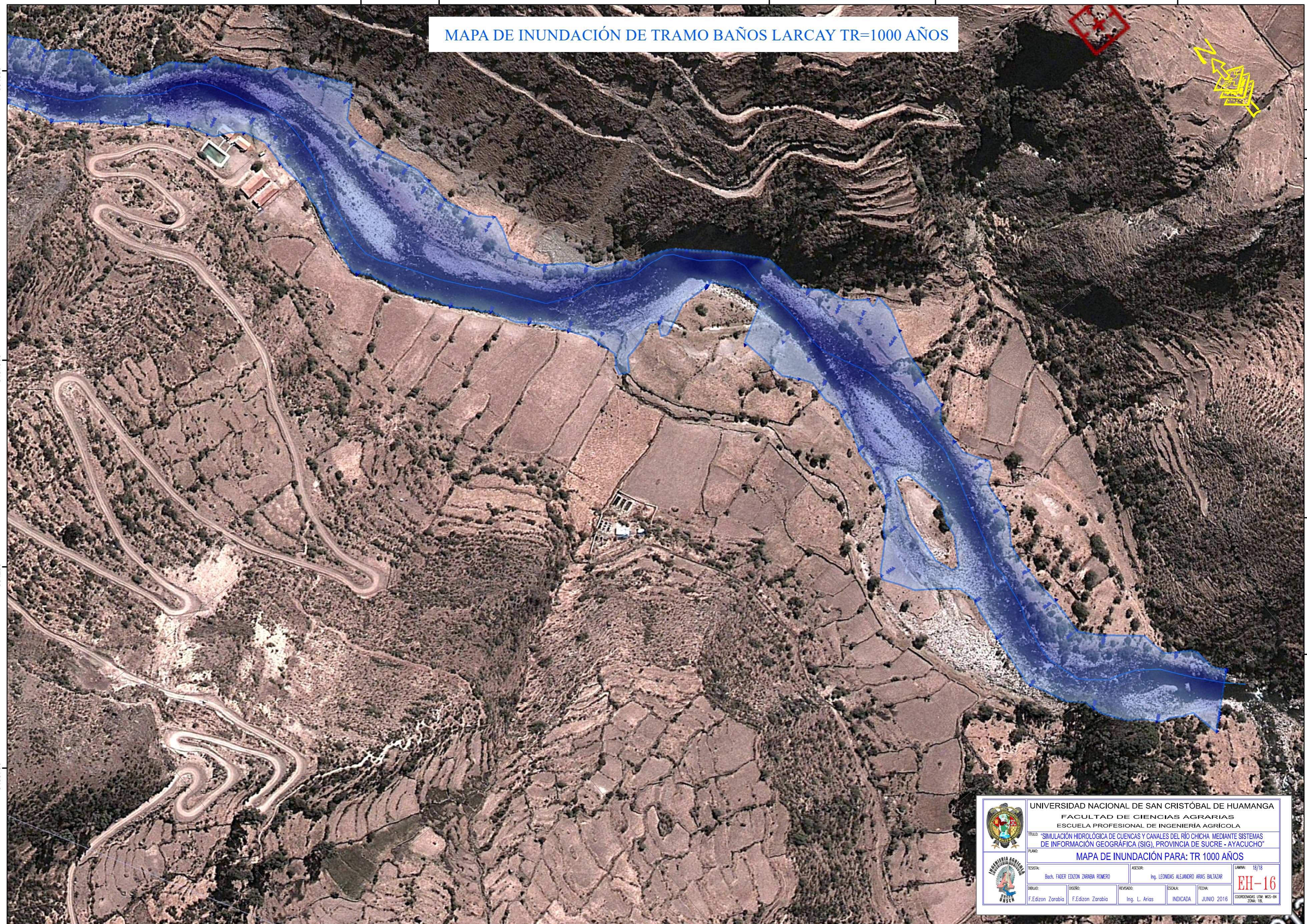
# MAPA DE INUNDACIÓN DE TRAMO BAÑOS LARCAY TR=100 AÑOS



|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
|    |  | UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA |  |
|   |  | FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS                     |  |
|   |  | ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA        |  |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO" |  |   |  |
| PLANO: <b>MAPA DE INUNDACIÓN PARA: TR 100 AÑOS</b>  |  |   |  |
| TEJETA: Bach. FADER EDIZON ZARABIA ROMERO   |  | ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARAS BALTAZAR     |  |
| DISEÑO: F. Edizon Zarabia   |  | REVISOR: Ing. L. Arias                            |  |
| FECHA: JUNIO 2016   |  | ESCALA: INDICADA                                  |  |
|   |  | LÁMINA: 17/18                                     |  |
|   |  | <b>EH-15</b>                                      |  |
|   |  | COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA: 18E                 |  |

1:2,000  
Meters

MAPA DE INUNDACIÓN DE TRAMO BAÑOS LARCAY TR=1000 AÑOS



|  |  |                  |                   |
|--|--|------------------|-------------------|
|  UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA<br>FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS<br>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA |  |                  |                   |
| TÍTULO: "SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CANALES DEL RÍO CHICHA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), PROVINCIA DE SUCRE - AYACUCHO"  |  |                  |                   |
| PLANO: <b>MAPA DE INUNDACIÓN PARA: TR 1000 AÑOS</b>  |  |                  |                   |
| TESIS: Bach. FAIDER EDIZON ZARABIA ROMERO  | ASESOR: Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR | LÁMINA: 18/18    |                   |
| DISEÑO: F. Edizon Zarabia  | REVISADO: Ing. L. Arias                        | ESCALA: INDICADA | FECHA: JUNIO 2016 |
| COORDENADAS UTM: WGS-84 ZONA 18S   |  |                  | <b>EH-16</b>      |

