



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA
CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA PARA EVALUAR
ZONAS DE INUNDACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTORES: CESAR DAVID MÉNDEZ PALACIOS

GEOVANNY DAVID VÁSQUEZ CORONEL

DIRECTOR: Ing. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCIA

CUENCA - ECUADOR

2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA
DEL RÍO MACHÁNGARA PARA EVALUAR ZONAS DE
INUNDACIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

AUTORES: CESAR DAVID MÉNDEZ PALACIOS

GEOVANNY DAVID VÁSQUEZ CORONEL

DIRECTOR: Ing. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCIA

CUENCA-ECUADOR

2021

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Cesar David Méndez Palacios y Geovanny David Vásquez Coronel portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N° **0106548795** y **0106081136**. Declaramos ser autore(a)s de la obra: **“MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **14 de septiembre de 2021**



F:
Cesar David Méndez Palacios
0106548795



F:
Geovanny David Vásquez Coronel
0106081136

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado “MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN”, certifico que fue realizado por los estudiantes CESAR DAVID MÉNDEZ PALACIOS y GEOVANNY DAVID VÁSQUEZ CORONEL, estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, bajo supervisión del suscrito; trabajo que reúne los requisitos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.



ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.

C.I. 010415814-2

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al tutor de esta tesis, Ing. Santiago Ochoa, por la dedicación y apoyo que nos ha brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo de titulación, por la dirección y la rigidez que ha facilitado a las mismas.

Asimismo, agradezco a mi compañero de tesis Geovanny Vásquez por el apoyo personal y técnico, además de su compromiso con la elaboración del presente trabajo.

Gracias a mi familia, a mis padres Cesar Méndez y Natalia Palacios quienes me han apoyado siempre a lo largo del proceso educativo de formación, brindándome su soporte y motivación, del mismo modo a mi esposa Denisse Yunga y mi hija Valerie Méndez, quienes han sido mi inspiración para seguir adelante frente a las adversidades.

Finalmente, y más importante quiero agradecer a Dios por la protección y oportunidad que me ha regalado, por ayudarme a no decaer en los momentos más difíciles.

Por todo esto y más, este trabajo no es solamente mío sino de cada uno de los que forman parte de mi historia.

Cesar David Méndez Palacios.

Agradezco a Dios por haberme regalado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo. A mi padre Giovanni, mi madre Janeth y mi hermana María Emilia dedico el presente trabajo, pues han fomentado en mí el deseo de superación. Un agradecimiento especial para un gran docente y amigo el Ing. Diego Coronel un pilar fundamental en mi desarrollo universitario, a mis compañeros de aula que con el paso de los años fueron el equipo principal para este gran juego llamado INGENIERIA CIVIL.

Geovanny David Vásquez Coronel.

Resumen

Dentro de los procesos ingenieriles empleados en la construcción de obras civiles, previo a los cálculos estructurales, son necesarios varios estudios que revelan información relevante acerca de los sitios de interés, entre los que se observan: estudios de suelos, análisis de la geología y, estudios hidrológicos e hidrodinámicos. Con este antecedente, el estudio realizado pretende analizar el comportamiento de la cuenca del río Machángara mediante un modelo hidrológico e hidrodinámico para la obtención de hidrogramas de crecida y la generación de mapas de inundación y zonas de riesgo, en consideración con la probabilidad de inundaciones o crecidas del cauce, en sitios cercanos a la red hídrica. Para ello, se ha empleado una metodología con enfoque mixto de tipo descriptivo y experimental, basado en las formulaciones existentes dentro de las simulaciones en los respectivos programas computacionales, siendo estos Hec-Hms y Hec-Ras, para cada uno de los modelos respectivamente. Además, para la asimilación de las variables previas al contexto de modelación, se ha empleado el software ArcGis con la ayuda de las distintas extensiones hidrológicas e hidrodinámicas como lo son Hec-GeoHms y Hec-GeoRas. Para la obtención de la información, se ha realizado una revisión bibliográfica, adicional a insumos proporcionados por distintos autores y profesionales, como fue en el caso de las precipitaciones, caudales y niveles de agua, registradas por las estaciones hidrometeorológicas, distribuidas en la extensión de la cuenca hidrográfica de estudio.

Palabras clave: hidrología, hidrodinámica, cuenca hidrográfica, precipitaciones.

Abstract

Within the engineering processes employed in the construction of civil constructions, before the structural calculations, several studies are necessary to reveal relevant information about the sites of interest, among them soil studies, geological analysis, as well as hydrological and hydrodynamic studies. With this background, this study aims to analyze the behavior of the Machángara River basin through a hydrological and hydrodynamic model to obtain flood hydrographs and generate flood maps and risk zones, considering the probability of flooding or flooding of the riverbed in sites close to the water network. To this end, a methodology with a mixed descriptive and experimental approach has been utilized, based on the existing formulations within the simulations in the respective computer programs, these being Hec-Hms and Hec-Ras, for each of the models respectively. Furthermore, for the assimilation of the variables before the modeling context, ArcGis software has been used with the help of the different hydrological and hydrodynamic extensions such as Hec-GeoHms and Hec-GeoRas. To obtain the information, a literature review was conducted, in addition to inputs provided by various authors and professionals, as in the case of rainfall, flow rates, and water levels, recorded by hydro-meteorological stations, distributed in the extension of the study watershed.

Keywords: hydrology, hydrodynamics, hydrographic basin, precipitation

Índice General:

Índice General:	4
Introducción:.....	15
Antecedentes:.....	16
Justificación:.....	17
Objetivos:.....	19
General:	19
Específicos:	19
Capítulo 1: Marco Teórico	20
1.1 Antecedentes Hidrológicos	20
1.1.1 Hidrología:	20
1.1.2 Ciclo Hidrológico.....	20
1.1.3 Procesos del ciclo hidrológico.....	21
1.1.4 Cuenca Hidrográfica	22
1.2 Modelación Hidrológica.....	23
1.2.1 Calibración y Validación del modelo hidrológico:	24
1.2.2 Modelo HEC-HMS	24
1.2.3 Métodos Hidrológicos utilizados por Hec-Hms	25
1.2.4 Ecuaciones empleadas por Hec-Hms.....	26
1.2.5 Extensión Hec-GeoHMS	27
1.2.5 Aplicaciones de Hec-Hms.....	28
1.3 Modelación Hidráulica.....	29
1.3.1 Hidráulica de Canales Abiertos	29
1.3.2 Tipos de Flujo	29
1.3.3 Estado de flujo	30

1.3.4 Morfología Fluvial	31
1.3.5 Topografía en las cuencas Hídricas.	31
1.3.6 Secciones transversales	32
1.3.7 Condiciones de Contorno.....	32
1.3.8 Información Requerida para un modelo hidrodinámico.	32
1.3.9 Implementación del Modelo 1-D.....	33
1.4 Aplicación HEC-RAS. (River Analysis Sistem).....	36
1.4.1 Hipótesis planteadas en el programa.....	37
1.4.2 Base Teórica para el Cálculo de Perfiles	37
1.4.3 Asignación de rugosidades al terreno	38
1.4.4 Resultados en el HEC-RAS	39
1.4.5 Simulación Dinámica de Inundaciones.....	39
1.4.6 Llanuras de Inundación.....	40
1.4.7 Frecuencia de inundaciones	40
1.5 Sistemas de Información Geográfica aplicados al manejo hídrico	41
1.5.1 Generalidades SIG	41
1.5.2 Componentes de un SIG	42
1.5.3 Aplicaciones de los SIG en las Modelizaciones Hidrológicas.....	42
Capítulo 2. Parámetros Hidro-Morfológicos de la cuenca del Machángara	43
2.1 Ubicación de la zona de estudio.....	44
2.2 Hidrografía de la cuenca del Río Machángara	45
2.3 Geología de la cuenca del Río Machángara	47
2.4 Cobertura del suelo.....	49
2.5 Uso del Suelo	51
2.5.1 Mapa de suelos.....	53
2.6 Delimitación de la cuenca del Machángara en Hec-GeoHms.....	54

2.7	Parámetros fisiográficos e hidrográficos de la cuenca del Machángara.	56
2.8	Parámetros de Altitud de la cuenca del Machángara	59
2.8.1	Curva Hipsométrica de cuenca del Machángara.....	61
2.8.2	Polígono de Frecuencia de Altitudes	62
2.9	Cálculo de Pendiente de la cuenca del Machángara	62
2.10	Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del Machángara	63
2.11	Clasificación de la cuenca del Río Machángara a nivel de microcuencas.	65
2.12	Parámetros Fisiográficos y de red Hídrica de las microcuencas.	66
2.13	Obtención de numero de curva por el método SCS.	69
2.13.1	Mapa de numero de curva de la sub-cuenca alta del Río Machángara.....	70
2.13.2	Mapa de número de curva de la subcuenca del Río Chulco (Subcuenca Media).....	71
2.13.3	Mapa de número de curva de la subcuenca baja del Río Machángara.	72
2.14	Condiciones antecedentes de humedad	74
2.15	Polígonos de Thiessen	76
2.16	Embalses de la sub-cuenca del Machángara	77
2.16.1	Embalse de Chanlud	77
2.16.2	Embalse de Labrado.....	78
Capítulo 3.	Modelación Hidrológica del Machángara.....	79
3.1	Determinación de hietogramas e hidrogramas para la modelación hidrológica ...	79
3.2	Modelación Hidrológica Hec-Hms	83
3.3	Preparación de los datos para la calibración y validación de los datos.....	86
3.4	Calibración y validación de los datos.....	87
3.5	Tormentas de Diseño.....	90
3.5.1	Cálculo de eventos máximos anuales de precipitación.....	91
3.5.2	Distribución de Gumbel.....	93

3.5.3 Tormentas de diseño para cada estación y periodo de retorno	99
3.6 Hidrogramas de crecida para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.....	110
Capítulo 4: Modelación Hidrodinámica de Inundaciones	114
4.1 Modelación Hidráulica Unidimensional	114
4.1.1 Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca hidrográfica.....	114
4.1.2 Parámetros de entrada HEC-GeoRas.	115
4.1.3 Modelación Hec-Ras.....	117
4.1.3.1 Coeficiente de rugosidad.....	118
4.1.3.2 Análisis de flujo no estacionario.....	119
4.1.4 Calibración y Validación del Modelo Hidrodinámico.....	121
4.1.4.1 Calibración del Modelo Hidrodinámico	121
4.1.4.2 Validación del Modelo Hidrodinámico	123
4.2 Mapas de amenaza de inundación en GIS.....	124
4.2.1 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 25 años, del parámetro Profundidad.....	125
4.2.2 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 50 años, de los parámetros Profundidad y Velocidad.....	129
4.2.3 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 100 años, del parámetro Profundidad.....	133
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.....	137
5.1 Conclusiones	137
5.2 Aspectos relevantes del trabajo	138
5.2.1 Procedimientos empleados.....	139
5.2.2 Sensibilidad de los Modelos.....	139
5.3 Recomendaciones	140
Bibliografía.....	142
Anexos	145

Índice de Tablas

Tabla 1: Métodos Hidrológicos más utilizados en Hec-Hms Fuente: Arias 2015.	25
Tabla 2: Viscosidad de turbulencia coeficientes de mezcla transversal Fuente: Manual de Referencia Hidráulica. (Ejército(US), 2016).....	35
Tabla 3: Ríos del Machángara	46
Tabla 4: Geología cuenca Río Machángara.....	48
<i>Tabla 5: Cobertura del Suelo. Fuente: Universidad del Azuay.6 Elaborado por: Autores.....</i>	<i>50</i>
Tabla 6: Tabla de tipología del suelo. Fuente: Ortega (2012).	52
Tabla 7: Tabla de unidades hidrográficas y rangos Fuente: DSMC-DGASI (1983).....	56
Tabla 8: Tabla de formas de una cuenca hidrográfica en función de su coeficiente de compacidad.....	57
Tabla 9: Rangos aproximados del factor de forma. Fuente: Pérez (1979).	57
Tabla 10: Tabla resumen de los parámetros fisiográficos de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.....	58
Tabla 11: Tabla de reclasificación de altitudes de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.	59
Tabla 12: Cuadro de áreas entre curvas de nivel. Elaborado por: Autores.	60
Tabla 13: Parámetros red hidrográfica Cuenca Machángara. Elaborado por: Autores. .	64
Tabla 14: Datos Fisiográficos de las microcuencas del río Machángara. Elaborado por: Autores.....	66
Tabla 15: Datos Fisiográficos de las microcuencas del río Machángara Segunda Parte. Elaborado por: Autores.....	67
Tabla 16: Parámetros red hidrográfica de las microcuencas del Machángara. Elaborado por: Autores.	68
Tabla 17: Tabla Uso de suelo VS CN Fuente: Agua y SIG (2021).....	69

Tabla 18: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Alta del Machángara. Elaborado por: Autores.....	73
Tabla 19: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Media del Machángara. Elaborado por: Autores.....	73
Tabla 20: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Baja del Machángara. Elaborado por: Autores.....	74
Tabla 21: Números de curva en condiciones húmedas. Elaborado por: Autores.	75
Tabla 22: Tabla comparativa de caudal observado y caudal calculado. Elaborado por: Autores.....	86
Tabla 23: Error medio absoluto.	87
Tabla 24: Error medio relativo cuadrado.....	87
Tabla 25: Coeficiente de eficiencia.	88
Tabla 26: Correlación de los datos.	88
Tabla 27: Eventos máximos anuales, estación Chulco.....	91
Tabla 28: Eventos máximos anuales, estación Labrados.	91
Tabla 29: Eventos máximos anuales, estación Chanlud.....	92
Tabla 30: Tabla de Gumbel. Fuente: Ven te Chow (1994).	93
Tabla 31: Ecuaciones de intensidad diaria para un periodo de retorno. Fuente: Estrella (2016).....	94
Tabla 32: Parámetros de distribución Gumbel, estación Chulco.....	94
Tabla 33: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Chulco.....	95
Tabla 34: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Chulco.	95
Tabla 35: Parámetros de distribución Gumbel, estación Labrados.	96
Tabla 36: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Labrados.	96
Tabla 37: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Labrados.	97
Tabla 38: Parámetros de distribución Gumbel, estación Chanlud.....	98

Tabla 39: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Chanlud.....	98
Tabla 40: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Chanlud.	98
Tabla 41: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Chulco. Elaborado por: Autores.....	100
Tabla 42: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Chulco. Elaborado por: Autores.....	101
Tabla 43: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Chulco. Elaborado por: Autores.....	102
Tabla 44: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Labrados. Elaborado por: Autores.....	104
Tabla 45: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Labrados. Elaborado por: Autores.....	105
Tabla 46: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Labrados. Elaborado por: Autores.....	106
Tabla 47: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Chanlud. Elaborado por: Autores.....	107
Tabla 48: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Chanlud. Elaborado por: Autores.....	108
Tabla 49: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Chanlud. Elaborado por: Autores.....	109
Tabla 50: Tabla 4.8 Valores de coeficientes de rugosidad, literal D Cursos Naturales. Fuente: Chow (1959).	118

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Representación de los términos de la ecuación de la energía Fuente: (Zeas, 2001).....	38
Ilustración 2: Ubicación de la Cuenca del Río Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 21.....	45
Ilustración 3: Mapa de la Cobertura del suelo. Fuente: Universidad del Azuay. Elaborado por: Autores. Anexo 16.	49
Ilustración 4: Mapa Taxonomía del suelo en la Cuenca Hidrográfica Machángara. Fuente: Universidad del Azuay. Elaborado por: Autores. Anexo 20.	54
Ilustración 5: Delimitación de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 22.....	55
Ilustración 6: Curva Hipsométrica de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores,.....	61
Ilustración 7: Tipología de las curvas hipsométricas.....	61
Ilustración 8: Polígono de frecuencia de altitudes Cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.	62
Ilustración 9: Cuenca hidrográfica del río Machángara a nivel de microcuencas. Elaborado por: Autores. Anexo 23.	65
Ilustración 10: Mapa de numero de curva de la sub-cuenca alta del Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 2.	70
Ilustración 11: Mapa número de curva de la sub-cuenca media del Río Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 3.	71
Ilustración 12: Mapa número de curva de la sub-cuenca baja del Río Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 1.	72
Ilustración 13: Polígonos de Thiessen. Elaborado por: Autores. Anexo 24.....	76
Ilustración 14: Estaciones hidrometeorológicas en la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo 17.	79
Ilustración 15: Hidrograma estación Llantera. Elaborado por: Autores.....	80

Ilustración 16: Hietograma Chanlud, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016. Elaborado por: Autores.....	81
Ilustración 17: Hietograma Chulco, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016. Elaborado por: Autores.....	81
Ilustración 18: Hietograma Labrados, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016. Elaborado por: Autores.....	82
Ilustración 19: Modelo hidrológico de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.....	84
Ilustración 20: Gráfica resultado de la primera simulación HEC-HMS. Elaborado por: Autores.....	85
Ilustración 21: Resultado caudal pico, primera simulación HEC-HMS. Elaborado por: Autores.....	85
Ilustración 22: Parámetros estadísticos para validación del Modelo Hidrológico. Elaborado por: Autores.....	89
Ilustración 23: Grafica de dispersión de los valores calculados en función de los datos observados. Elaborado por: Autores.....	90
Ilustración 24: Curvas IDF, estación Chulco.....	95
Ilustración 25: Curvas IDF, estación Labrados.	97
Ilustración 26: Curvas IDF, estación Chanlud.....	99
Ilustración 27: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 25 años. .	100
Ilustración 28: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 50 años. .	102
Ilustración 29: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 100 años.	103
Ilustración 30: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 25 años.	104
Ilustración 31: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 50 años.	106
Ilustración 32: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 100 años.	107
Ilustración 33: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 25 años.	108

Ilustración 34: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 50 años.	109
Ilustración 35: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 100 años.	110
Ilustración 36: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 25 años.	111
Ilustración 37: Hidrograma de crecida con periodo de retorno de 25 años.	111
Ilustración 38: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 50 años.	112
Ilustración 39: Hidrograma de crecida con periodo de retorno a 50 años.	112
Ilustración 40: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 100 años.	113
Ilustración 41: Hidrograma de crecida con periodo de retorno a 100 años.	113
Ilustración 42: Modelo Digital de Elevaciones, Cuenca Hidrográfica del Machángara. Elaborado por: Autores. Anexo: 18.	115
Ilustración 43: Digitalización del tramo del río Machángara, Hec-GeoRas. Elaborado por: Autores.	116
Ilustración 44: Sección transversal, tramo del río Machángara. Elaborado por: Autores.	116
Ilustración 45: Modelación Hidráulica Hec-RAS, Geometría. Elaborado por: Autores.	117
Ilustración 46: Números de Manning iniciales, Modelación Hidrodinámica Hec-RAS. Elaborado por: Autores.	119
Ilustración 47: Condiciones de frontera, Modelación Hidrodinámica Hec-RAS. Elaborado por: Autores.	120
Ilustración 48: Hidrograma inicial para la Modelación Hidráulica, Hec-RAS. Elaborado por: Autores.	120
Ilustración 49: Comparación de caudales calculas y observados, HEC-RAS. Elaborado por: Autores.	121
Ilustración 50: Alturas de agua, simulación No.10, $n=0.035$. Elaborado por: Autores.	122
Ilustración 51: Modelo Hidrodinámico Calibrado, HEC-RAS. Elaborado por: Autores.	123

Ilustración 52: Validación del Modelo Hidrodinámico. Elaborado por: Autores.	124
Ilustración 53: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 4.....	125
Ilustración 54: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 5.....	126
Ilustración 55: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 6.	127
Ilustración 56: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 7.	128
Ilustración 57: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 8.....	129
Ilustración 58: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 9.....	130
Ilustración 59: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 10.	131
Ilustración 60: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 11.	132
Ilustración 61: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 12.....	133
Ilustración 62: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Profundidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 13.....	134
Ilustración 63: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 14.	135
Ilustración 64: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Velocidad. Elaborado por: Autores. Anexo: 15.	136

Introducción:

La modelación numérica de los procesos hidrológicos e hidráulicos, son herramientas que facilitan la comprensión del funcionamiento de una cuenca hídrica, esto ha permitido obtener grandes avances en el ámbito ingenieril al momento de realizar los estudios previos a la construcción de obras civiles. En concordancia con ello, se ha llevado a cabo el uso de diversos softwares y extensiones, como lo son los modelos HEC RAS y HEC HMS, los mismos que presentan gran acogida por la comunidad académica dentro de las ramas de meteorología, hidrología, hidráulica, entre otras que se vinculan con el manejo de los recursos hídricos (Pascual, 2016). De igual manera los sistemas de información geográfica han servido de apoyo, gracias a sus múltiples posibilidades de almacenar, gestionar y analizar la información espacial, como lo es la herramienta computacional ArcMap para la delimitación y distribución de las variables hidro morfológicas de las cuencas (Salazar, 2018).

Se considera al recurso hídrico, comúnmente con un impacto positivo ya que posee varios usos tales como: domestico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Por otro lado, también existe la posibilidad de que se vuelva una amenaza ya que también ocasiona varios fenómenos naturales, por ejemplo, las inundaciones que pueden causar daños en la infraestructura, uso del suelo, etc. (Pascual, 2016).

La ingeniería civil se ha desarrollado y enfocado en facilitar el estilo de vida de las personas, así como también protegiendo su integridad al momento de evitar sucesos de riesgo que pueden ser causados por eventos fortuitos propios de la naturaleza. En la actualidad el uso de softwares, en cuanto a la representación de relieves ha logrado simplificar de una gran manera la obtención de información, pues los modelos digitales del terreno se encuentran disponibles en la web para una fácil simulación de la actividad de la cuenca hidrográfica (Salazar, 2018). La hidrología de una zona se define por su vegetación, su geología, su clima y topografía, también se ve afectada por las actividades antrópicas que cambian el medio y alteran su actividad natural y el equilibrio hidrológico. Si bien el volumen total de agua entrante es el mismo en toda la extensión de la superficie de la cuenca hidrográfica, la distribución puede llegar a cambiar la cantidad de agua en su salida, siendo mayor o menor. En cuanto al componente hidráulico presente en los afluentes de estudio, se obtiene mediante la longitud del cauce, los bordes de las secciones, número de Manning entre otros, que cambian la modelación del flujo permanente (Giménez, 1998).

Un modelamiento hidrológico e hidráulico, tiene un alcance sumamente amplio, por lo que puede ser utilizado para el estudio de varios fenómenos: navegación, ordenamiento hidrológico, calidad de aguas, riesgos en la cuenca, proyectos de aprovechamiento y preservación de recursos naturales. Este trabajo se centrará, por una parte, en los riesgos que pueden suscitarse en la superficie de la cuenca tales como vulnerabilidad de inundaciones y eventos extremos de caudal. Por otro lado, también se dará paso a conocer el comportamiento del río en su cauce mayor, así como también los hidrogramas de crecida de la cuenca (Pascual, 2016).

Antecedentes:

La ciudad de Cuenca está rodeada por 4 ríos, entre ellos el Río Machángara, teniendo una cuenca de gran extensión con un porcentaje de riesgo alto en cuanto a inundaciones o posibles daños a estructuras civiles a lo largo de su cauce, sobre todo en la temporada de invierno en la región sierra (Chávez, 2011).

La gran extensión de la cuenca del Río Machángara, provoca que el volumen de agua a evacuar aumente considerablemente en zonas bajas de la cuenca, causando un colapso por la cantidad de carga, terminando en desbordamiento del cauce, perjudicando a los residentes aledaños a las orillas de Río Machángara.

Con el paso de los años, se han desarrollado nuevas tecnologías más acertadas con el entorno y permitiendo dar soluciones precisas a los problemas que se presentan en la comunidad, lo cual favorece a la delimitación de la superficie a estudiar, en este caso la cuenca del río Machángara, en la cual, se tomará en cuenta para la modelación hidrológica el punto de interés en la zona baja de la cuenca hidrográfica ya que los valores obtenidos de caudal en este punto, servirán para los datos de entrada del modelo hidrodinámico permitiendo simular con mayor precisión las condiciones del tramo del río Machángara, dando continuidad al análisis del comportamiento de la cuenca.

Del mismo modo, se han desarrollado investigaciones previas por ciertos autores, dentro de la zona de interés, por lo que existe información relevante acerca de las características de la cuenca hidrográfica de este estudio. Es así, el caso de Ortega (2012), quien ha analizado las condiciones preexistentes de la superficie de interés, representándolas de forma gráfica, a través de mapas que describen varios factores asociados a la morfología del terreno.

Por otro lado, se ha revisado bibliografía base, sobre modelaciones hidrológicas e hidráulicas con condiciones similares en cuanto a las características del terreno, así como también de la disponibilidad de los datos. Debido a esto, se cita al autor Sánchez (2017), el mismo que simula las condiciones de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena, además de un tramo del mismo, por lo que se aplican metodologías similares, basadas en ecuaciones demostradas por la comunidad científica del medio.

Los estudios previos dentro de esta cuenca se basan principalmente en la obtención de parámetros tales como: tipo de suelo, cobertura vegetal, pendientes, datos hidrológicos, valores meteorológicos; lo cual favorece a la validación de los datos de entrada de las modelaciones. De igual manera existen ciertos análisis por parte de la empresa ETAPA, dentro de la zona de estudio debido a la disposición de varias estaciones hidrológicas, por lo que se identifican y validan los parámetros iniciales para la representación simplificada del comportamiento de la cuenca del Río Machángara.

De igual manera, se considera la influencia de los embalses presentes en la superficie de la cuenca alta del Machángara dentro del modelamiento, debido a la generación de flujos constantes; siendo estos la presa de Chanlud ubicada a 45 kilómetros al noroccidente de la ciudad de Cuenca a 3500 metros sobre el nivel del mar y, del mismo modo la presa de Labrado que se encuentra a 40 kilómetros al noroccidente de la ciudad de Cuenca, a 3400 metros sobre el nivel del mar.

Justificación:

La cuenca del Machángara, es una superficie de estudio de gran relevancia debido a que abastece a una gran cantidad de población rural a partir de sus principales afluentes; además, la misma ha tenido un crecimiento en su actividad durante el desarrollo de la región. En la actualidad está sujeta a un crecimiento urbano acelerado en una parte de la cuenca y en otro sector un crecimiento poblacional rural, también, en varios puntos se ha notado alteraciones en el medio por la deforestación, modificando el paisaje y varios procesos hidrológicos puesto que el uso del suelo es cambiante (Chávez, 2011).

Normalmente, en esta zona al estar sujeta a procesos de urbanización acelerados, no se realizan los estudios previos adecuados a pesar de que se tienen registros de inundaciones y desbordamientos de ríos, en donde es óptimo un modelamiento

hidrodinámico, tomando en cuenta los datos determinantes del terreno, de modo que se evalúe el comportamiento de los principales afluentes y, de los procesos hidrológicos del sitio, previniendo posibles riesgos, del mismo modo la influencia de los embalses ubicados en la cuenca alta del Machángara sobre la simulación de los procesos hidrológicos.

Debido a la necesidad de conocer y predecir el comportamiento de las redes hídricas que se encuentran cercanas a viviendas y estructuras en general, frente a fenómenos de condiciones extremas; se han elaborado modelamientos que estén sujetos a la predicción de un hecho catastrófico, en este caso, una inundación producida por una crecida que, a su vez, se encuentra definida por los parámetros y características propias de cada cuenca hidrográfica, destacándose la relevancia de su estudio, con el fin de prevenir desastres y, actuar oportunamente ante ellos.

Es también importante el estudio de esta cuenca de gran extensión, debido a que es un procedimiento base para otros diseños aplicados en este sitio, de igual manera con la ayuda de mapas de zonas de riesgo de inundación, se lograría predecir posibles efectos en las construcciones existentes o, a su vez, conocer las variables involucradas más significativas al momento de edificar o designar un uso distinto al suelo (MECCA, 2008).

Por lo tanto, el producto final que se pretende obtener del estudio, son los lugares de riesgo distribuidos en la superficie de la cuenca del río Machángara, sujetos a inundaciones por desbordamiento de ríos, considerando la topografía y varios parámetros tanto hidrológicos como hidráulicos. También es relevante la obtención de hidrogramas de crecida, dependientes de los registros de precipitación y escorrentía de la cuenca hidrográfica.

Los resultados de la modelación deberán ser calibrados y validados de tal manera que satisfaga adecuadamente las condiciones reales, puesto que un modelo trabaja con una representación simplificada de lo que se pretende simular (López S., 2018). Los beneficios que puede aportar la investigación son dirigidos netamente a las áreas relacionadas con el estudio del suelo y los recursos hídricos, involucrados directamente en la calidad de vida de los seres humanos con un desarrollo sostenible y sustentable a corto, mediano y largo plazo.

Objetivos:

General:

Analizar el comportamiento de la cuenca del río Machángara mediante un modelo hidrológico e hidrodinámico para la obtención de hidrogramas de crecida y la generación de mapas de inundación y zonas de riesgo, respectivamente.

Específicos:

- Realizar una revisión y procesamiento de la información hidrológica, meteorológica y geográfica disponible para el modelamiento, con el fin de recolectar los datos de entrada necesarios para las respectivas simulaciones.
- Definir la cuenca del río Machángara mediante el MDT (Modelo Digital de Elevaciones) generado, para delimitar la zona de estudio y la superficie de interés, a través de procesos empleados por un Sistema de Información Geográfica
- Delimitar el uso del suelo al que está sujeto las zonas principales de la cuenca de estudio, con la finalidad de caracterizar el potencial de escorrentía de la superficie.
- Evaluar los parámetros hidrológicos e hidráulicos registrados por las estaciones hidro-meteorológicas con el fin de incluirlos en los cálculos del producto final.
- Obtener los valores de caudal y calados máximos y mínimos del río Machángara para conocer zonas vulnerables a inundación mediante la elaboración de mapas de amenaza de inundación.
- Calibrar y validar los modelos implementados mediante una comparación con valores registrados en las estaciones hidro-meteorológicas, disponibles en la superficie de estudio de la cuenca hidrológica, con el fin de cumplir con la veracidad de la simulación.
- Elaborar mapas que representen gráficamente las zonas con mayor riesgo de inundación y desbordamiento del Río Machángara en el tramo estudiado.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Antecedentes Hidrológicos

1.1.1 Hidrología:

Según El Consejo Federal de Ciencia y Tecnología de Estados Unidos (1962), la hidrología es la ciencia natural que estudia el agua y se enfoca al ciclo hidrológico global y a todos los procesos que se involucran en dicho proceso.

También la hidrología según Dingman (1994), es la geo-ciencia que describe y predice:

- Variaciones del espacio y tiempo del recurso hídrico en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global.
- Movimiento del agua por encima y por debajo de la superficie terrestre, incluyendo los procedimientos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar a lo largo de su trayectoria.

Dentro de la ingeniería destinada al manejo de los procesos hídricos, es una ciencia la cual abarca un campo amplio de investigación que engloban los diversos estudios del agua en el ciclo hidrológico, siendo esto en atmosfera, suelo y superficie (Garcia, 2014).

1.1.2 Ciclo Hidrológico

Según la definición de Gálvez (2011), “El ciclo hidrológico, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua entre la Biosfera, Atmosfera, Litosfera, Hidrosfera, lo que se denomina “Sistema Climático”. En este concepto, la tierra almacena cuerpos de agua siendo estos: subterráneos, en la atmosfera, océanos, lagos, suelos, glaciares, entre otros, estos depósitos de agua mantienen un movimiento del agua de un lado a otro a través de los procesos de evaporación, lluvia, condensación, escorrentía, sedimentación, infiltración, transpiración, flujos de agua, etc. Es así que a este fenómeno de la naturaleza se lo conoce como el ciclo hidrológico (Pín, 2018).

El ciclo hidrológico es representado como una estructura cuyos componentes internos actúan entre sí o con otros componentes externos. A dichos componentes, se los denomina variables hidrológicas, de esta manera el ciclo se lo considera global. Sin embargo, podemos subdividir en tres sub-sistemas: (Villa, 2006).

1.1.3 Procesos del ciclo hidrológico

Infiltración: Es el proceso mediante el cual, el agua se moviliza desde la superficie del terreno hacia las capas más profundas, esto depende de la morfología y composición del terreno.

La infiltración se puede dar de dos maneras, tanto saturada como no saturada, en donde ambas formas son diferentes, el uno depende directamente de la ley de Darcy y el otro de las propiedades físico-químicas que se dan entre el agua y el material (Bateman, 2007).

Una buena porción del agua infiltrada, no desciende hasta la zona saturada del subsuelo o de agua subterránea, sino que se retiene en la parte no saturada del suelo, de donde regresa a la atmosfera por evaporación o transpiración, en el caso de las plantas (Merida, 2020).

Evaporación: Es el proceso por el cual, el agua líquida se convierte en estado gaseoso, puede ocurrir solamente cuando el agua está disponible, es decir, en cuerpos de agua, vegetación o en el terreno superficial. Este proceso ocupa grandes cantidades de energía, por ejemplo, se puede decir que para lograr evaporar un gramo de agua a 100 grados Celsius requiere de 540 calorías de energía de calor (Ordoñez, 2011).

Transpiración: Es el resultado de la respiración de las plantas o el flujo del agua por medio de las raíces hacia las hojas y, a su vez, hacia la atmosfera (Bateman, 2007). En otras palabras, es la evaporación a través de las hojas (Ordoñez, 2011).

Escorrentía Superficial: Es la parte de la lluvia que no se infiltra ni es evaporada, por lo que fluye por la superficie y va de la mano con los procesos descritos con anterioridad por lo que se debe tener cuidado en la selección de un modelo hidrológico ya que debe ser adecuado para cada caso (Ordoñez, 2011).

Escorrentía Sub-superficial: Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no llega al almacenamiento subterráneo o acuíferos, por lo que se debe considerar como una parte de la escorrentía (Ordoñez, 2011).

Precipitación: Es cualquier forma de agua que cae del cielo o inicia en la atmosfera como lluvia, nieve o granizo. La precipitación es formada por las nubes y, al alcanzar un punto de saturación las gotas de agua se forman y caen a la tierra por gravedad (Merida, 2020). Las lluvias son provocadas por un cambio en la temperatura o presión y constituye la

única entrada principal al sistema hidrológico (Ordoñez, 2011). Se reconocen distintos tipos de precipitación las cuales se detallan a continuación:

1.1.4 Cuenca Hidrográfica

Se define a la cuenca hidrográfica como un área natural en donde el agua que proviene de la precipitación forma un curso principal de agua. Es también la unidad fisiográfica constituida por el grupo de los sistemas de flujos de agua que se definen por el relieve del terreno (Rodríguez, 2006).

Los límites de la cuenca se los delimita naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río (Rodríguez, 2006). Las cuencas hidrográficas encierran los recursos naturales más básicos para la supervivencia del ser humano como el agua, flora, fauna, suelo, etc., por lo que son fundamentales para la vida ya que aportan grandes beneficios en las actividades del hombre (Pín, 2018).

Las cuencas hidrográficas permiten comprender de forma espacial el ciclo hidrológico, de igual modo, ayuda a la cuantificación y cualificación de los impactos producidos por las actividades humanas a lo largo de las redes hidrográficas presentes en el territorio, en donde estas pueden traer consecuencias positivas y negativas en la calidad y cantidad del recurso hídrico (Cotler, 2013). En función de la dinámica hidrológica se pueden identificar tres zonas funcionales distintas al interior de una cuenca y estas pueden ser:

Zona de Captación o cuenca alta: Son espacios continuos a la divisoria de aguas en la porción más alta de la cuenca, constituida por sistemas montañosos y lomas. En estas áreas, se forman los primeros escurrimientos luego de que los suelos se encuentren saturados en su capacidad (Cotler, 2013).

Zona de Almacenamiento o cuenca media: Es una zona de cambio entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales confluyen con los de la cuenca media aportando distintos caudales cuyos sedimentos, minerales y materia orgánica dependerán de la tipología de las actividades realizadas en cada sub-cuenca (Cotler, 2013).

Zona de Descarga o cuenca baja: En este sitio el río principal desemboca en el océano o en un lago y se caracteriza por contener importantes ecosistemas, como humedales y costeros. En este espacio se acumulan todos los impactos de la cuenca (Cotler, 2013).

1.2 Modelación Hidrológica

Según Bocel Chiroy (2016) afirma que, la modelación hidrológica es una descripción matemática de la respuesta de una cuenca frente a eventos de precipitación, con la finalidad de representar entradas y salidas que logren predecir fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Es una herramienta útil en temas de gestión y manejo de cuencas, puesto que su aplicación es posible en cuencas de cualquier extensión (Alvarado, 2020).

Un modelo hidrológico tiene como fin la representación o simulación de los distintos procesos que se involucran en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una cuenca hidrográfica, en donde se busca conocer los valores de nivel de agua, velocidad, caudal, régimen de flujo a partir de la resolución de métodos numéricos de las ecuaciones de Saint Venant, Reynolds o de Navier (Sánchez L. , 2017).

Se han utilizado los modelos hidrológicos en la determinación de las condiciones de frontera o flujo de los tributarios para un modelo hidrodinámico 1D, 2D para la resolución de problemas de control de inundaciones.

La evaluación del área de inundación requiere la unión de un modelo hidrológico que pueda calcular los flujos laterales y un modelo hidráulico que determine los niveles de agua a lo largo del tramo del río (Sánchez L. , 2017).

De otra manera, un modelo es una representación simplificada del mundo real, que permite manejar una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias, de esta forma un modelo hidrológico termina siendo una representación más sencilla de los procesos que se dan dentro de la cuenca y que transforman precipitación en escorrentía. Es así que la precipitación incidente es la entrada al sistema, el caudal es la salida, que a su vez ha compartido interacciones con los distintos planos dentro de los límites de la cuenca hidrográfica. La evaporación y el flujo sub-superficial también son consideradas salidas o pérdidas (Pascual A. , 2016).

1.2.1 Calibración y Validación del modelo hidrológico:

La calibración consiste en un proceso intuitivo de prueba y error, en donde se ajustan ciertos valores de parámetros de modo que el hidrograma final se acerque mucho más a la realidad y de la manera más fiel posible. Por este medio se pueden obtener el conjunto de datos representados en el modelo que reflejan con mayor exactitud el comportamiento de la cuenca (Pascual A. , 2016).

Por otro lado, la validación del método, se pretende certificar la confianza, por lo que consiste en un conjunto de simulaciones sucesivas utilizando los parámetros establecidos en la calibración con datos reales de precipitación, caudal, etc; con periodos distintos utilizados en la calibración. Cuando el análisis presente una igualdad entre los valores arrojados por el modelo y los datos reales, se considera validado y listo para ser utilizado (Pascual A. , 2016).

1.2.2 Modelo HEC-HMS

Hec-Hms es un programa de simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca, sus siglas en inglés son “Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System”. Este software fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, diseñado para estimar los hidrogramas de salida de la cuenca de análisis a partir de condiciones de lluvia extremas (Varona, 2018)

Para la aplicación de los cálculos, es necesario ingresar valores de entrada que parten de los hidrogramas de precipitación que, por medio de una serie de modelos, se obtiene el exceso de lluvia o precipitación neta, diferenciando las pérdidas por infiltración, evaporación, retención, etc. Estos excesos de precipitación resultantes son seguidos por los hidrogramas unitarios a la salida de la cuenca o sub-cuenca (Varona, 2018).

El programa permite la creación de modelos agregados, así como también distribuidos, calculando en el primer caso un promedio espacial de pérdidas como de precipitación a lo largo de las sub-cuencas. Por otro lado, en el caso de los modelos distribuidos, se refiere a la lluvia en una malla o conjunto de celdas que componen las sub-cuencas, en donde cada celda calcula por separado los excesos y pérdidas (Varona, 2018).

El software posee procedimientos necesarios para la continua simulación del ciclo hidrológico donde se evidencia: la evapotranspiración, derretimiento de nieve y el humedecimiento del suelo. Se puede recurrir también a herramientas más avanzadas que son capaces de captar la escorrentía y proveen la estimación de parámetros (Arias, 2015).

Hec-Hms es uno de los programas más utilizados en la modelación de cuencas, una de sus grandes ventajas es la facilidad de uso puesto que incluye una interfaz gráfica que permite al usuario introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológicos por medio de módulos integrados, y obtener las respuestas graficas de sencilla comprensión (Arias, 2015) .

En general el modelo de Hec-Hms, se enfoca en los componentes necesarios para predecir la escorrentía directa, producto de una precipitación, omitiendo algunos parámetros de difícil predicción en el sistema como el flujo de agua en la superficie. Sin embargo, existen métodos dentro del programa destinados al cálculo de infiltración que simplifican estos parámetros (Umaña, 2014).

1.2.3 Métodos Hidrológicos utilizados por Hec-Hms

Tabla 1: Métodos Hidrológicos más utilizados en Hec-Hms

Fuente: Arias 2015.

PÉRDIDAS	Transformación lluvia neta en escurrimiento	Flujo Base	Tránsito avenida por el cauce
Método Exponencial	Onda Cinemática	Recesión restringida	Modelo Lag
Número de curva CN SCS	HU SCS	Constante Mensual	Plus Modificado
Consideración de la humedad del suelo (SMA)	HU Snyder	Depósito Lineal	Muskingum
DC por celdas	HU especificado por el usuario		Muskingum-Cunge
CN SCS por celdas	Hidrograma en S del usuario		Onda Cinemática
SMA por celdas	Hidrograma Unitario HU de Clark		

Según Joo (2013), el programa puede ser categorizado como un modelo conceptual agrupado, puesto que representa el proceso de escorrentía de la cuenca, a través de un conjunto de pérdidas agrupadas, el cual se combina con un hidrograma

unitario principalmente. De este modo al ser un método conceptual, implica la reducción de variables solicitadas, a lo que información de entradas se refiere, esto en comparación con otros modelos físicos (Umaña, 2014).

1.2.4 Ecuaciones empleadas por Hec-Hms

Para el alcance de este estudio, se han utilizado ciertos métodos hidrológicos específicos, en relación con el comportamiento de la cuenca hidrográfica y la disponibilidad de información, de manera que se logre representar las condiciones reales mediante una simulación acertada.

De este modo, para el cálculo de la precipitación neta, se ha empleado el método SCS, para lo cual es necesario conocer obtener una abstracción inicial y el número de curva, en donde se emplean las siguientes formulaciones: (Nanía, 2007)

$$Po = 0.2 * \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad [1.1]$$

Donde:

Po es la Abstracción inicial.

CN Número de curva (Coeficiente de escorrentía).

De igual manera, para el cálculo de la precipitación efectiva media sobre cada subcuenca, se ha desarrollado al emplear la metodología de los polígonos de Thiessen, lo cual, la precipitación se ve distribuida de acuerdo al peso de cada estación pluviométrica (Lopez J. , 2012).

$$Psb(i) = \frac{\sum Pem(i,j)w(j)}{\sum w(j)} \quad [1.2]$$

Donde:

$Psb(i, j)$ Precipitación media uniforme sobre una subcuenca en el intervalo i, j .

$Pem(i, j)$ Precipitación registrada en el intervalo i y estación j .

$w(j)$ Área de influencia de cada estación j en la subcuenca.

De este modo, el programa computacional obtiene el valor del caudal, separando la escorrentía de la lluvia neta, para lo cual se ha utilizado nuevamente el método del hidrograma unitario de SCS, el mismo que emplea las siguientes ecuaciones: (Lopez J. , 2012)

$$Qp = \frac{2.08A}{Tp} \quad [1.3]$$

$$Tp = \frac{Ty}{2} + T1 \quad [1.4]$$

$$T1 = \frac{L^{0.8}(2.540-22.86CN)^{0.7}}{14.104CN^{0.7}I^{0.5}} \quad [1.5]$$

Donde:

Qp Caudal punta (m³/s) por centímetro de lluvia efectiva.

A : Superficie de la cuenca (km²).

Tp : Tiempo al máximo en horas.

Ty : Duración del pulso de lluvia.

$T1$: Tiempo de desfase de la cuenca.

L : Longitud hidráulica en metros.

I : Pendiente media de la cuenca.

Continuamente, para el tránsito del caudal obtenido a lo largo de las avenidas, se ha seleccionado el método de Muskingum, por ser la técnica más utilizada para manejar relaciones variables de descargas y almacenamientos. La ecuación fundamental del método es: (Lopez J. , 2012)

$$Q_{j+1} = C1 I_{j+1} + C2I_j + C3I_j \quad [1.6]$$

Donde:

I_j : Caudal entrante en un tramo en el instante j .

Q_j : Caudal saliente del mismo tramo en el instante j .

$C1, C2, C3$: Constantes dependientes de los parámetros k y x .

1.2.5 Extensión Hec-GeoHMS

Hec-GeoHMS, es una extensión para ArcView que ha sido desarrollada como un conjunto de herramientas hidrológicas geoespaciales destinado a ingenieros e hidrólogos con un limitado manejo de los sistemas de información geográfico (SIG). El programa facilita la visualización de la información espacial, incluir las características de la cuenca,

cálculos y análisis espaciales, delimitación de cuencas y ríos, construir entradas para modelos hidrológicos y apoyo en preparación de informes-mapas (Nanía, 2007).

Esta extensión es utilizada en el procesamiento de los datos de la cuenca, luego de una preparación y compilación inicial de los datos del terreno. Estos parámetros necesarios para el trabajo con el programa, son los modelos digitales de elevaciones (DEM), localización digital de cauces y estaciones de aforo; una vez que la información ha sido consolidada, Hec-GeoHMS procesa el terreno y la información espacial para generar un conjunto de entradas hidrológicas, que proporcionaran al usuario un modelo inicial para Hec-Hms. Se puede estimar las variables hidrológicas partiendo de las características de la cuenca y cauces, precipitaciones y datos de caudales (Nanía, 2007).

1.2.5 Aplicaciones de Hec-Hms

Con este modelo se puede simular la respuesta que presentara la cuenca de un río en su escurrimiento superficial a causa de una precipitación, a través de una representación como sistema integral de componentes hidrológicos e hidráulicos (Varona, 2018).

La representación de un componente, solicita un grupo de variables que especifiquen las peculiaridades particulares del componente y las similitudes matemáticas que representan el proceso físico. Como resultado del proceso de modelación, es el cálculo de hidrogramas de flujo en sitios específicos de la cuenca del río (Arias, 2015).

Los modelos son de gran importancia por su uso en el diseño de infraestructuras que implican el conocimiento de los picos y volumen de las crecidas, como los son: puentes, alcantarillas, represas y obras de control de torrentes e inundaciones.

Posteriormente los resultados de hidrogramas, pueden ser incluidos directamente como partida de información en Hec-Ras para estudios de: (Varona, 2018)

- Disponibilidad de agua.
- Drenaje urbano.
- Predicción de flujo.
- Reducción de daños de avenidas.
- Operación de sistemas.
- Obras de control de inundaciones.

1.3 Modelación Hidráulica

1.3.1 Hidráulica de Canales Abiertos

Según Chow (1994) enumera dos tipos de flujos de agua en un conducto, pudiendo ser flujo en canal abierto, o flujo en tubería, principalmente se diferencian en un aspecto significativo, el flujo en canal abierto mantiene la mayor parte del tiempo una superficie libre la cual se encuentra sometida a la presión atmosférica. El canal sobre el cual el agua transita puede ser artificial o natural.

Los canales naturales son los que el agua ha ido abriendo con su paso, son los ríos, quebradas, entre otros. En cuanto a los canales artificiales son los que han sido construidos por el ser humano, con características para funciones específicas, como canales para riego, para navegación, etc. (Chow, 1994).

1.3.2 Tipos de Flujo

Para el análisis de canales abiertos se debe considerar los tipos de flujos que pueden existir, cuando se toma como criterio el cambio en la profundidad del canal, se habla de un flujo permanente o no permanente, si la profundidad del canal abierto varía con el tiempo es no permanente, al contrario del flujo permanente que su profundidad no varía con el tiempo. (Chow, 1994)

El flujo en un canal abierto es variado, porque parte del flujo entra o sale del sistema a lo largo de toda su trayectoria, este tipo de flujo, conocido como flujo espacialmente variado o discontinuo.

Cuando se toma como criterio el espacio, existen dos tipos de flujo, uniforme y variado. Un flujo es uniforme siempre y cuando la profundidad es la misma en cada sección del canal. Un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo. (Chow, 1994)

La siguiente lista permite observar los tipos de flujo que se puede encontrar en canales abiertos.

- Flujo permanente
- Flujo uniforme
- Flujo variado

- Flujo gradualmente variado
- Flujo rápidamente variado
- Flujo no permanente
- Flujo uniforme no permanente
- Flujo no permanente
- Flujo gradualmente variado no permanente
- Flujo rápidamente variado no permanente

1.3.3 Estado de flujo

El comportamiento del flujo en canales abiertos se debe por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. Esta relación del efecto laminar con la inercia permite clasificar al flujo en laminar, turbulento o transicional. En el primer caso las partículas de agua se dan en trayectorias suaves, definidas o líneas de corriente, y para el flujo turbulento, las partículas se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves, pero en conjunto todavía representan el movimiento de la corriente hacia adelante. Entre estos dos estados de flujo laminar y flujo turbulento se forma un estado transicional. (Chow, 1994)

El número de Reynolds permite representar el efecto de la viscosidad en relación con la inercia:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad [1.7]$$

Donde V es la velocidad del flujo, L es la longitud característica, la cual es considerada igual al radio hidráulico R de un conducto, ν es la viscosidad dinámica del agua. Si se tiene un número de Reynolds pequeño quiere decir que se trata de un flujo laminar, y un número grande si el flujo es Turbulento. (Chow, 1994)

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación dada por el número de Froude que tiene la siguiente expresión.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad [1.8]$$

Donde V es la velocidad media del flujo, y g es la aceleración de la gravedad y L es la longitud característica en pies.

El número de Froude se usa cuando el estado del flujo se desea clasificar en función de la acción que ejerce sobre él la gravedad. En base a este número es posible distinguir el flujo en tres estados: el flujo crítico, el subcrítico y el supercrítico.

- $F < 1$, *flujo subcrítico*
- $F > 1$, *flujo supercrítico*
- $F = 1$, *flujo crítico*.

En un estado subcrítico el flujo tiene una velocidad baja y se describe como tranquilo y de corriente lenta, para el flujo supercrítico la corriente tiene alta velocidad y se describe usualmente como rápido y torrencial.

1.3.4 Morfología Fluvial

La morfología fluvial es la ciencia que estudia la estructura de los ríos, como se sabe en el planeta tierra los ríos tienen características comunes que provienen de la corriente del agua, pero se distinguen por sus particularidades del lugar donde se encuentran, sus características los hace únicos y cada río debe tener un estudio dependiendo de las características topográficas, climatológicas, y de la cuenca que drenan, como vegetación, usos del suelo, asentamientos humanos entre otras. (Diez, 2009).

La geomorfología fluvial es una materia muy extensa y de gran utilidad para estudios hidrológicos e hidráulicos, por lo que se reunirá información que sea de ayuda para el presente estudio.

1.3.5 Topografía en las cuencas Hídricas.

Las cuencas hídricas son superficies extensas, que presentan características topográficas propias del lugar geográfico en el que se encuentran. La topografía del relieve permite al flujo de agua a tener un mayor o menor tiempo de descarga de la cuenca. (Worschitz, 2018)

La topografía en las cuencas hídricas permite establecer límites o divisiones geográficas de las cuencas, conocidas como divisoria de aguas, estos límites teóricos son líneas imaginarias que unen los máximos puntos de altura entre dos cadenas montañosas inmediatas. En conclusión, la topografía permite conocer la superficie de la cuenca donde la precipitación cae sobre ella y tiende a ser drenada hacia el punto de interés, por uno o varios cauces de agua conectados hacia el afluente principal. (Worschitz, 2018)

1.3.6 Secciones transversales

Para el análisis hidráulico se debe obtener a partir de la topografía ingresada en los programas ArcGIS y HEC RAS, las secciones transversales, las cuales permiten obtener los calados y niveles máximos del río, para el análisis de inundaciones. Las secciones transversales del río en estudio se obtendrán según la información obtenida en la cartografía base del estudio.

1.3.7 Condiciones de Contorno.

Para definir un modelo en HEC RAS se debe ingresar las condiciones de borde, los datos que se obtuvieron del estudio hidrológico, estas condiciones iniciales definen la manera de actuar del modelo en sus límites, ya sea aguas arriba, así como aguas abajo, si el modelo trabaja en un régimen permanente las condiciones de contorno serán nivel de agua, curva de descarga, calado normal y crítico. (Aguilar, 2017).

Estos parámetros definirán el modelo en sus límites tanto inferior como superior, como se ha indicado las condiciones serán: Nivel de Agua, Calado Crítico, Calado Normal, Curva de Descarga

1.3.8 Información Requerida para un modelo hidrodinámico.

La información necesaria para un modelo hidráulico se puede contemplar en dos partes, para un mejor funcionamiento del programa, obteniendo así datos reales del análisis,

La clasificación de la información comienza con los datos geométricos:

- Planta de los ríos, son introducidos a través de sus coordenadas originales.
- Las secciones transversales, como se había presentado anteriormente, se ingresa tanto su distancia, como su cota sobre el nivel del mar

- Se debe proporcionar al modelo la distancia entre las secciones transversales, estableciendo así la ubicación de cada una. (Zeas, 2001)
- Al modelo hidrodinámico se ingresa los coeficientes de pérdida tales como; rugosidad y contracción-expansión. (Zeas, 2001)

Una vez que se han ingresado los parámetros geométricos del modelo, se continúa con la información recurrente al flujo entre las condiciones que se ingresan se tiene:

- Del estudio hidrológico se obtienen los caudales para diferentes periodos de retorno. (Zeas, 2001)
- Tirante inicial del tramo en análisis.
- Se ingresa el régimen en el cual actúa el flujo, pudiendo ser sub-crítico o supercrítico. (Zeas, 2001)

Con estas condiciones se alimentará al modelo para un buen análisis hidrodinámico.

1.3.9 Implementación del Modelo 1-D

Hoy en día, con la ayuda de los modelos digitales de elevación, se puede representar la superficie que se pretende estudiar, de esta manera el acoplamiento de modelos hidráulicos con los sistemas de información geográfica, logran obtener datos que permiten conocer la extensión de una inundación, o los niveles del agua en las secciones transversales de un cauce, para así tener mapas de riesgos de inundación y poder informar a la población las zonas vulnerables. Este tipo de análisis hidrodinámicos se los puede lograr con modelos unidimensionales. (Castro L. T., 2011).

Los modelos hidrodinámicos de una dimensión están basados en las ecuaciones de Saint Venant, que estudia las leyes de conservación de masa y momento, para dar como resultado la superficie libre del agua para flujos estacionarios y no estacionarios en canales abiertos. (Castro L. T., 2011)

En los últimos años se ha venido usando un programa que analiza el flujo en una dimensión, el uso del programa HEC-RAS, usado principalmente para obtener mapas de inundación, permite trabajar con flujos mixtos, subcrítico, supercrítico, presentando además herramientas para implementar estructuras hidráulicas.

Las ecuaciones hidrodinámicas de Saint Venant en 1-D que resuelve el HEC-RAS, son sistemas de ecuaciones en derivadas parciales formado por la ecuación de la continuidad y la conservación de la cantidad de movimiento, considera todas las fuerzas que actúan en el flujo de la corriente. Las ecuaciones que resuelve el programa son las siguientes. (Aguilar, 2017).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad [1.9]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA * \frac{\partial h}{\partial x} + n^2 * \frac{gQ|Q|}{AR^{\frac{4}{3}}} \quad [1.10]$$

Donde:

- Q es el caudal (m³/s)
- α es el coeficiente de distribución vertical de la velocidad
- A es el área de la sección transversal (m²)
- g es la aceleración de la gravedad (m²/s)
- x es la distancia aguas abajo en la dirección del flujo (m)
- h es la profundidad del flujo por encima del nivel de referencia (m)
- t es el tiempo en segundos
- n es el coeficiente de Manning (s/m^{1/3})
- q es la entrada de flujo lateral (m²/s)
- R es el radio hidráulico (m)

En cuanto a la turbulencia que se produce dentro del flujo, el programa lo analiza con ayuda de ecuaciones que se desarrollan a continuación, si bien se sabe que la turbulencia es un fenómeno complejo de movimiento caótico del flujo, que comprende una extensa gama de escalas de longitud. Para un modelo numérico discreto resulta de gran dificultad resolver de forma factible estas escalas de longitud cuando son demasiado pequeñas, por lo que el flujo turbulento se modela como un proceso de difusión en

gradiente. Según este punto de vista, la tasa de difusión se programa como el coeficiente de viscosidad de turbulencia v_t . (Ejército(US), 2016)

El coeficiente de viscosidad de remolinos o turbulencia se puede parametrizar de la siguiente forma.

$$v_t = Dhu_* \quad [1.11]$$

Donde:

- D es una constante empírica adimensional
- u_* es la velocidad de corte que se calcula de la siguiente manera

$$u_* = \sqrt{gRS} = \frac{\sqrt{g}}{C} |V| = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} |V| \quad [1.12]$$

Donde:

- R es el radio hidráulico (m)
- S es la pendiente de energía (m/m)
- g es la aceleración de la gravedad (m2/s)
- $|V|$ es la magnitud del vector velocidad
- C coeficiente de Chézy

El coeficiente D es un valor empírico que se modifica con la geometría de la superficie del fondo. En la siguiente tabla se describen algunos valores de D . (Ejército(US), 2016)

Tabla 2: Viscosidad de turbulencia coeficientes de mezcla trasversal

Fuente: Manual de Referencia Hidráulica. (Ejército(US), 2016)

D	Geometría y Superficie
0.11 a 0.26	Canal Recto, superficie lisa
0.30 a 0.77	Irregularidades superficiales moderadas
2.0 a 5.0	Superficies ásperas.

1.4 Aplicación HEC-RAS. (River Analysis Sistem)

Para el análisis y la modelación hidráulica se ha seleccionado el programa HEC-RAS, software creado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica. El programa se ha diseñado para el estudio de manejos de lechos crecientes y de seguridad de inundaciones. El modelo se basa en la sistematización de flujo gradualmente variado, mediante la solución de la ecuación de energía en una sola dimensión, el modelo también contempla la pérdida de energía gracias a la fricción de fondo a lo largo del cauce, así también como pérdidas producto de la expansión o contracción del lecho del río. Si se pretende analizar saltos hidráulicos, flujos en puentes, entre otros casos de flujo rápidamente variado, el programa los resuelve mediante la ecuación de momento del flujo. (Porras, 2013).

Para el presente estudio de zonas de inundación, el uso del modelado unidimensional ayuda de una manera adecuada, en cuanto a la obtención de las características del flujo, como los niveles para los caudales de diseño y los parámetros hidráulicos. (Porras, 2013)

El HEC-RAS solicita el ingreso de la geometría de las secciones transversales, a partir de los cuales como se había indicado, obtiene las características hidráulicas del flujo, para el correcto análisis del modelo se debe detallar las secciones transversales y definir de una manera correcta los tramos de estudio y una correcta dispersión de secciones para la transición esperada del gradiente de energía en condición de crecientes. (Porras, 2013).

La resistencia al flujo se modela gracias al coeficiente n de Manning, este coeficiente puede variar a lo ancho de la sección transversal y a lo largo del tramo examinado, al igual que se debe ingresar las condiciones de borde o de frontera, como el nivel de agua, curva de descarga, o la profundidad crítica y normal, tanto para aguas arriba y aguas abajo el programa podrá empezar a desarrollar. (Porras, 2013).

El objetivo del uso del HEC-RAS es tener una base de información del río en estudio, obtener mapas de inundación con caudales de crecida con periodos de retorno de 5, 25, 50 años, y así identificar lugares vulnerables y con niveles de amenaza al desbordamiento del río, disminuyendo así posibles pérdidas económicas y humanas. (Aguilar, 2017).

1.4.1 Hipótesis planteadas en el programa

Las hipótesis que el programa plantea se encuentran de forma implícita en las expresiones analíticas: (Zeas, 2001)

- El flujo es estable
- El flujo es gradualmente variado
- El flujo es unidimensional
- Las pendientes que el cauce presenta están entre el 1 al 10%

1.4.2 Base Teórica para el Cálculo de Perfiles

Como se había presentado, el programa realiza iteraciones de la ecuación de Bernoulli determinando así niveles de agua, teniendo presente las pérdidas a lo largo cauce producido por la fricción de fondo y las obras hidráulicas que se presentan a lo largo de lecho. (Zeas, 2001).

Las ecuaciones de energía de Bernoulli y pérdida de energía son resueltas por operaciones iterativas, calculando los niveles de la superficie del agua en las secciones transversales, a continuación, las ecuaciones de energía de Bernoulli. (Zeas, 2001)

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 \quad [1.13]$$

Donde:

Y = calado del agua en la sección transversal

Z = elevación del canal principal

v = velocidad promedio en la sección

α = coeficiente de velocidad en los extremos del tramo

g = aceleración de la gravedad

h_2 = pérdidas de energía, (Zeas, 2001)

El diagrama que se muestra en la figura siguiente, explica de una mejor manera los términos de la ecuación:

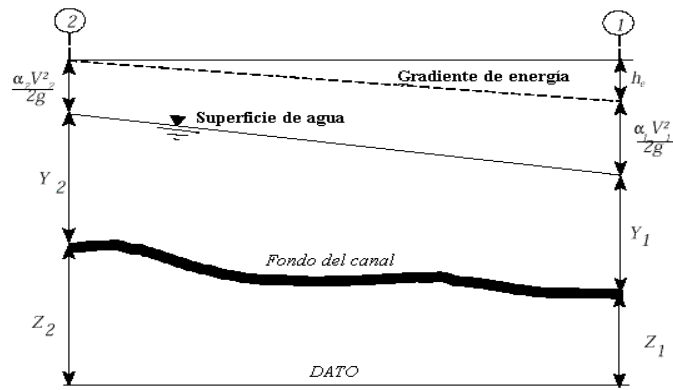


Ilustración 1 Representación de los términos de la ecuación de la energía Fuente: (Zeas, 2001)

La siguiente expresión hace referencia a la pérdida de energía entre dos secciones, producido por la fricción de fondo, la expansión y la contracción.

$$h_e = L * \bar{S}_f + C * \left[\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right] \quad [1.14]$$

Donde:

h_e = pérdida de la carga de energía

L = longitud del tramo

S_f = pendiente de fricción

C = coeficiente de pérdida por expansión o contracción. (Zeas, 2001).

1.4.3 Asignación de rugosidades al terreno

El programa permite colocar un coeficiente de rugosidad que puede ser variable en el lecho principal y en los bancos de inundación tanto para el lado izquierdo y el lado derecho. En base al mapa del uso del suelo se debe colocar el coeficiente de rugosidad para los bancos de inundación y obtener los más cercanos a la realidad para el cálculo, y para el cauce principal, debido al gran número de secciones transversales, se puede colocar un solo valor del coeficiente “n”.

1.4.4 Resultados en el HEC-RAS

Los resultados que obtiene el software, o las salidas gráficas son los niveles de agua que presenta cada sección transversal, donde se puede revisar detalladamente los niveles que presenta a lo largo del perfil longitudinal los niveles o el calado de la superficie del cauce, se puede obtener también las vistas en perspectiva de los niveles de agua. (Zeas, 2001)

En cuanto a datos tabulados la información que el programa presenta son: Caudal, velocidad, pendiente del cauce, pendiente de la línea de energía, profundidad normal, profundidad crítica, altura del espejo de agua, número de Froude, etc.

1.4.5 Simulación Dinámica de Inundaciones

Los riesgos asociados a los sistemas fluviales, como las inundaciones en áreas pobladas, se deben primero entender porque estos fenómenos se originan. Una explicación simple y rápida podría ser que son producto de eventos naturales que siempre han existido, provocando daños económicos, y pérdidas humanas, pero también podrían existir causas sociales, y ambientales. (Worschitz, 2018)

Los impactos que provoca la urbanización acelerada en ciertas ciudades sobre el ciclo del agua tales como: la impermeabilización del suelo, construcción de obstáculos en el cauce natural del río, la contaminación de los medios receptores, entre otros tienen una influencia directa en los fenómenos de inundación. (Worschitz, 2018)

Las inundaciones son de alto riesgo y de tipo repetitivo, pues si en algún momento existió un desbordamiento del río, existe una alta probabilidad de que este evento pueda repetirse, es por esta razón que para un estudio veraz se debe comenzar con un mapa de histórico de inundaciones provocadas por el río en análisis. Cuando se han reconocido las zonas que han sido afectadas por un desbordamiento, deben constar medidas para mitigar o evitar sus impactos, entre algunas posibles medidas que se podrían realizar están: las presas para regular avenidas, malecones para evitar la erosión de las márgenes, entre otras medidas, pero no siempre han sido de ayuda, en ciertas ocasiones estas actividades han sido perjudiciales para ciertos sectores. (Worschitz, 2018)

Como enuncian algunos autores, la solución radica en dejar el cauce natural al río, que su curso siga de manera normal, respetando las zonas que inundación y centrarse en el ordenamiento territorial de la ciudad, así se podría evitar que las personas construyan

en zonas aledañas al río con grandes posibilidades de inundación, así los impactos socio-económicos ya no fueran de gran escala sino se tendría desbordamientos controlados. (Worschitz, 2018).

1.4.6 Llanuras de Inundación

Las llanuras de inundación pueden ser mapeadas, los linderos permiten identificar las zonas de mayor riesgo de ocurrencia, y se puede evaluar el nivel de peligro según el periodo de retorno que se pretenda plantear, 5 años, 25 años, 50 años, 100 años o más. (USAID, 1993).

Si bien los datos hidrológicos obtenidos a partir de modelos, son de valiosa ayuda para el análisis hidrodinámico y la probabilidad de eventos de inundación, según la USAID (1993) estas evaluaciones son difíciles si no se tiene aforos por lo menos de 20 años, y en la mayoría de países es de gran dificultad encontrar estos datos o simplemente no existen.

Según estudios las llanuras de inundación son variables, no son estables, pues al estar compuestas de sedimentos no consolidados, son de rápida erosión el momento de crecidas de caudal, y se puede depositar nueva materia como lodos, limos o arena. El ancho de la llanura de inundación depende principalmente del caudal, la velocidad del río si puede erosionar el material de fondo, la pendiente del canal. Las zonas de desborde de un río no se encuentran en las partes altas de la cuenca debido a que en estas zonas las pendientes son altas, las paredes del canal son roca sin cobertura al igual que no contienen mayor caudal. (USAID, 1993).

1.4.7 Frecuencia de inundaciones

Se considera la inundación anual como el evento más importante cada año, “la inundación de 10 años, por ejemplo, es la descarga que excederá un determinado volumen que tiene una probabilidad del 10% de ocurrir cada año” (USAID, 1993).

Se han planteado varias formas de explicación de este fenómeno, es decir hay ocasiones que existe un número elevado de eventos de inundación, seguido de varios años de inactividad de inundaciones. Actividades como la agricultura de forma intensa, varían

drásticamente las condiciones de descarga incrementando así el caudal del río durante los ciclos normales de precipitación elevando el riesgo de inundación.

1.5 Sistemas de Información Geográfica aplicados al manejo hídrico

1.5.1 Generalidades SIG

Los sistemas de información geográfica, se pueden considerar como un grupo ordenado de hardware, software, datos y técnicas conjuntamente eficientes en la captura, almacenamiento, actualización, manipulación y análisis de información referenciada geográficamente.

El término SIG, hace referencia a un sistema de información espacial automatizado y referenciado internamente, con la finalidad de gestionar y analizar los datos espaciales y elaboración de cartografía (Triviño, 2001).

La modalidad de los datos en un sistema de información geográfico puede ser tipo raster o vector. Las bases de datos raster, están constituidas por celdas que almacenan un valor discreto a modo de atributo, por otro lado, en el modelo vectorial las formas se definen por pares de coordenadas que configuran puntos en el espacio, líneas o límites de polígonos (Triviño, 2001).

Un sistema de información geográfico está enfocado principalmente al manejo de datos georreferenciados con respecto a coordenadas espaciales o geográficas, es decir, un elemento ubicado en el espacio por medio de un sistema de coordenadas, el mismo que es definido a través de atributos que permiten conocer su relación con respecto a otros elementos (Contreras, 2018). El aporte de estas herramientas al campo científico ha sido muy extenso debido a que la información espacial puede ser manejada de forma automática o manual y su aplicación se ajusta a los intereses de los distintos especialistas, en este caso haciendo referencia a los recursos naturales y el manejo hídrico. De esta manera los SIG son los equipos y programas informáticos utilizados en el desarrollo, procesamiento, almacenamiento y recuperación de datos espacialmente distribuidos, actuando como gestores gráficos, interactivos y flexibles en la modelación de las redes de drenaje (Contreras, 2018).

Actualmente el valor de los SIG se basa en las modelizaciones hidrológicas debido a la aceptación general de esta herramienta por su productividad y sus importantes

aportaciones a las dificultades que se presentan en las modelizaciones. También, los SIG pueden actuar a modo de plataforma para la experimentación de nuevas ideas y conceptos en forma de prototipos. De igual manera, facilita la interpretación y análisis de los datos obtenidos debido a lo intuitivo de la representación de los datos en forma de capas de información (Triviño, 2001).

1.5.2 Componentes de un SIG

Programas o softwares: Cada uno de estos programas facilitan la realización de un grupo de ordenes ordenadas lógicamente que ejecutan la solución de operaciones aplicadas a dicho sistema de información. Las funciones principales que realiza un SIG son: (Mejia, 2011)

- Introducción, transformación y verificación de los datos: Captura y transforma la información en formato digital obtenidos de diferentes fuentes: mapas, imágenes satelitales, fotografías, datos de campo, resultados de laboratorio, etc.
- Almacenamiento y manejo de las bases de datos: Organiza la información interna de los elementos para analizarla espacialmente (Mejia, 2011).
- Procesamiento y análisis de la información: Se encuentran las funciones y operaciones más relevantes que desempeña un SIG lo cual da la solución a las operaciones del usuario (Mejia, 2011).
- Salida y representación de resultados: Hace idea a las distintas maneras en que pueden ser representados los resultados del análisis, sean así en: mapas, tablas, imágenes, etc.
- Funciones de interacción con el usuario: Hace referencia a los menús y ventanas con los que interactúa el usuario, esto ayuda a un aprendizaje continuo y eficiente (Mejia, 2011).

1.5.3 Aplicaciones de los SIG en las Modelizaciones Hidrológicas

La mayoría de las aplicaciones de estas herramientas dentro de los modelos hidrológicos se refieren a evaluaciones de riesgos naturales y estudios de localización. Dentro de las evaluaciones de riesgo, se manejan operadores aritméticos complejos con el fin de generar índices sobre toda la cuenca hidrográfica, o a su vez, una sección determinada. Por otra parte, los estudios de localización presentan un conocimiento previo de las condiciones para la implantación y los operadores booleanos se han

mostrado eficaces para un sondeo rápido de las áreas apropiadas y desfavorables para la ubicación de una actividad específica (Triviño, 2001).

Dentro de las modelizaciones hidrológicas, los sistemas de información geográfica son utilizados principalmente en la obtención de parámetros hidrológicos iniciales que brinden un sentido lógico a los procesos involucrados en el modelo. Para esto, se emplean metodologías de cálculo ya existentes fuera de los SIG y que han sido adecuados o incluidos dentro de los programas computacionales, tal es el caso de la herramienta “HEC-GeoHMS” que se incluye para ArcGis en la delimitación y obtención de parámetros hidrológicos de una cuenca hidrográfica (Triviño, 2001).

En relación a estudios previamente realizados en el campo de la modelización hidrológica, se puede mencionar a White (1988) que ha utilizado estas herramientas para combinar el grado de permeabilidad del suelo con las cantidades de lluvia recogidas, encontrando los valores de escorrentía. Por otro lado, Steube y Johnston (1990) los han manejado para la delimitación de cuencas y en la estimación de la cantidad total de agua que podría drenar un área determinada. Estos estudios justifican las ventajas de la aplicación de estos sistemas para la modelización de la distribución de los valores hidrológicos (Triviño, 2001).

En la actualidad, se ha prestado más atención a los SIG dentro del manejo hídrico ya que contemplan los componentes espaciales y temporales de los datos, desarrollando a su vez metodologías y procesos de programación de control de riesgos por medio de las simulaciones que comprenden los siguientes elementos básicos: (Triviño, 2001)

- Ecuaciones para la interpretación de procesos hidrológicos.
- Mapas para la delimitación del área de estudio.
- Bases de datos con tablas que caracterizan la región estudiada.

Capítulo 2. Parámetros Hidro-Morfológicos de la cuenca del Machángara

En esta sección se encuentran las variables previas, necesarias para una modelación hidrológica y, posteriormente un modelo hidrodinámico, siendo éstas de tipo: hidrológico, meteorológico, geológico y geográfico. De igual manera se pretende resumir las condiciones existentes en las zonas de interés, así como su ubicación espacial,

logrando obtener los datos de entrada para un análisis y evaluación del comportamiento de la cuenca baja del Río Machángara.

Es importante aclarar que algunos de los parámetros deberán ser asumidos o basados en estudios pasados debido a la falta de información de la zona, puesto que los procedimientos se deben a mediciones realizadas por estaciones repartidas a lo largo de la cuenca hidrográfica, las mismas que son escasas.

2.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra establecida en la provincia del Azuay y una pequeña parte del Cañar, la cuenca del río Machángara tiene una gran importancia que reside en su diversidad y su aprovechamiento ya sea en la generación de energía, producción de alimentos, y además de proporcionar el 60% del abastecimiento de agua potable para las zonas rurales de Cuenca, provocando un crecimiento acelerado a su alrededor, siendo un problema al medio ambiente por su deforestación, cambios en el paisaje entre otros (Chavez, 2011).

El Río Machángara inicia en el Parque Nacional Cajas y riega a la ciudad hasta formar parte del Río Cuenca, la cuenca del Machángara se encuentra al nororiente de la capital del Azuay, con un área aproximada a los 325 kilómetros cuadrados. Las parroquias rurales azuayas que tienen participación en la cuenca son: Checa, Chiquintad, Sinicay, Ricaurte, Octavio Cordero, Sayausí y Sidcay, en cuanto a las parroquias de la provincia del cañar se mencionan a Nazón, Gualleturo, Jerusalén, San Antonio y Deleg (Chavez, 2011).

Haciendo referencia a su topografía, toda la superficie es irregular, correspondiente a la sierra ecuatoriana, el río Machángara, también presenta afluentes importantes como lo es el río Chulco, río Checa y el río Paluncay. En la parte alta de la cuenca, el nivel freático se encuentra superficialmente expuesto, debido a la morfología del área asociada con la formación geológica y también al balance hídrico positivo dado por precipitación que excede a la evaporación. Por otro lado, en la parte media y baja de la cuenca, se obtienen balances negativos, por lo que la evaporación excede a la precipitación. En este caso, el comportamiento de la humedad relativa en la zona de interés, crece con la altitud y las condiciones climáticas son cambiantes y variables (Chavez, 2011).

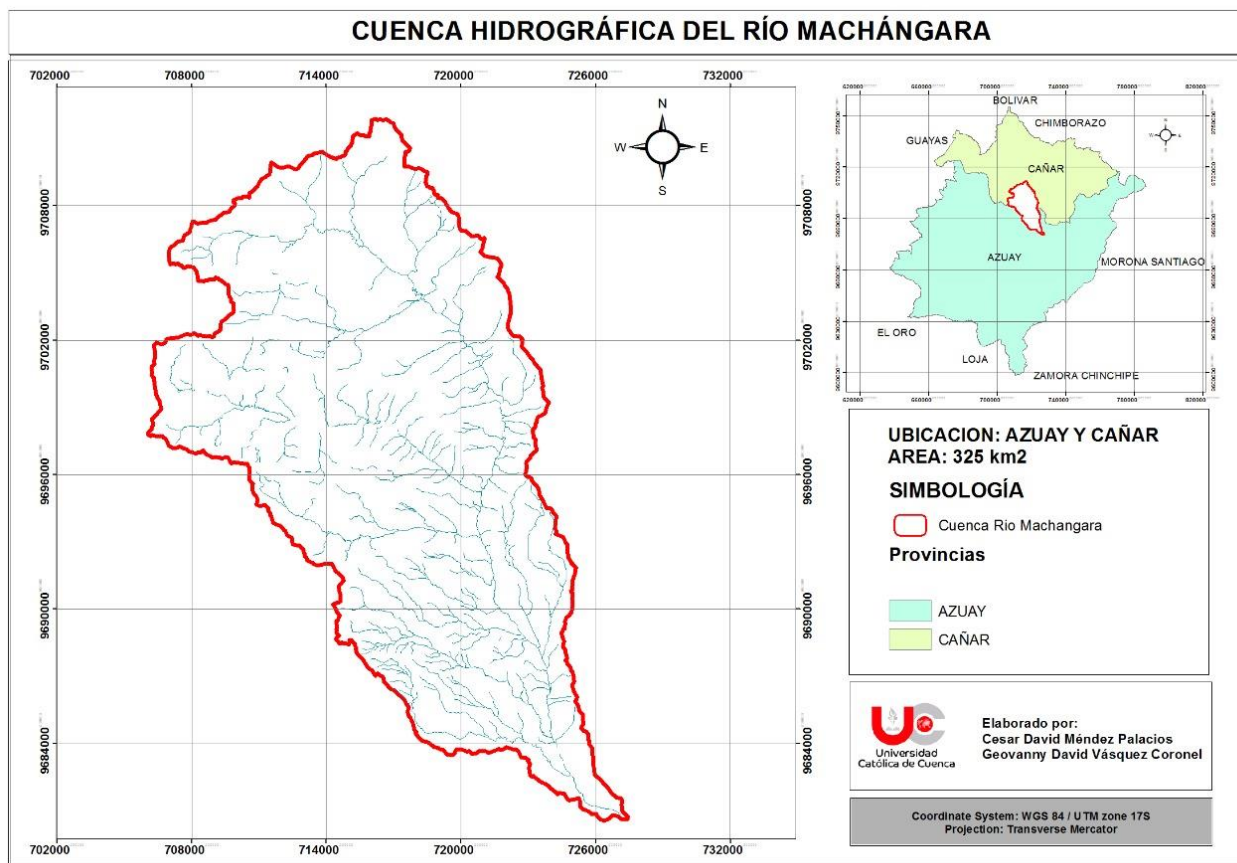


Ilustración 2: Ubicación de la Cuenca del Río Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 21.

2.2 Hidrografía de la cuenca del Río Machángara

Inicialmente el Río Machángara tiene una trayectoria oeste-este en la parte alta de la cuenca, posteriormente cambia su dirección noroeste-sureste en la parte media y baja de la cuenca, hasta que se reúne con el Río Tomebamba a una cota de 2400 msnm. A lo largo del flujo del río, se presentan varios afluentes, uno de los principales es el río Chulco que nace en el cerro Empedrado a una cota de 4080 msnm y que confluye con el río Machángara aguas debajo de la descarga central Saucay a una cota de 2980 msnm. Otros afluentes importantes son: río Huagrahuma, río Checa, río Paluncay, río Piñacocho, Blanco, Chacayacu y Saymirín (Chavez, 2011).

Un aspecto importante sobre la hidrografía de una cuenca, es la longitud de los ríos afluentes, los mismos que son tomados de las investigaciones de Ortega (2012) por medio de la siguiente tabla:

Tabla 3: Ríos del Machángara

NOMBRE DE LOS RÍOS DEL MACHÁNGARA	LONGITUD (M)
RÍO BLANCO	3324.11
RÍO BUIHUASCANA	5495.65
RÍO CHACAYACU	13472.70
RÍO CHAMANA	2431.40
RÍO CHECA	9265.46
RÍO CHULCO	7612.53
RÍO CORRALES	4365.96
RÍO GAHUIÑA	6122.02
RÍO HUAGRAHUMA	2996.64
RÍO JATUNHUAYCU	4529.34
RÍO MACHÁNGARA	39314.34
RÍO NARANJILLO	3609.31
RÍO PALUNCAY	3871.20
RÍO PATAMARCA	13468.01
RÍO PIÑACocha	7841.77

TABLA 3 CONTINUACIÓN

NOMBRE DE LOS RÍOS DEL MACHÁNGARA	Longitud (m)
RÍO QUINTUL	9221.07
RÍO SAYMIRÍN	4095.79
RÍO SININCAY	14052.22
LONGITUD TOTAL	159820.86

Como se observa en la Tabla 3, existe gran cantidad de corrientes importantes que circulan por la superficie de la cuenca de estudio, esto permite aproximar la subdivisión en microcuencas por medio de la jerarquización de cada uno de los ríos y su potencial drenaje, en donde se pueden destacar: el Río Machángara con 39314.34 metros, el Río Sinincay con 14052.22 metros y el Río Chacayacu con 13472.70 metros.

Es así que se pueden considerar, al menos, tres microcuencas relevantes para el análisis hidrológico que, a su vez, constituirán la sub-cuenca del Machángara.

2.3 Geología de la cuenca del Río Machángara

El territorio esta principalmente constituido por restos morreicos, debido a pasadas acumulaciones fluvio-glaciares como drumlines, rocas aborregadas estrías. Por otra parte, en las zonas compuestas por valles principalmente se encuentra arcilla y arena distribuida en bultos sueltos, lo cual, en época de fuertes precipitaciones, produce deslizamientos principalmente en las partes media y baja de la cuenca (Chavez, 2011).

Según las definiciones de la agroecología del Ecuador, la distribución de los suelos del austro, se puede representar por medio de los factores pedogeneticos, es decir, los factores formadores de los suelos a través de procesos como la eluviación, en donde la parte alta de la cuenca hidrográfica se presenta suelos Histosols, los mismos que se forman en zonas húmedas con drenaje malo y con temperaturas bajas, lo cual no permite la descomposición de la materia orgánica a un ritmo normal, por lo que se utilizan estos suelos para la agricultura. Por otro lado, los suelos Andosols se forman por material volcánico que se han depositado durante el cuaternario, son suelos bien drenados y poco

sensibles a la erosión de origen hídrico, pero la erosión eólica puede ser un problema (Chavez, 2011).

Según las investigaciones realizadas por Ortega (2012) y, los mapas geológicos identificados en la sub-cuenca del Río Machángara, este territorio se encuentra mayormente constituido por la formación Tarqui, la misma que pertenece a la era del cuaternario, periodo del Pleistoceno; dicha formación geológica se encuentra formada por toba, riolita, andesita, etc. A continuación se listan los depósitos y formaciones identificadas en la cuenca del Machángara con sus respectivas áreas en hectáreas: (Ortega, 2012)

Tabla 4: Geología cuenca Río Machángara.

GEOLOGÍA (NOMBRES)	ÁREA (HA)
DEPOSITO ALUVIAL	438.97
DEPOSITO COLUVIAL	272.87
TILITA	3096.10
FORMACIÓN CELÍCA	3793.52
FORMACIÓN AZOGUES	0.64
FORMACIÓN MANGÁN	34.98
FORMACIÓN SANTA ROSA	1238.67
FORMACIÓN TARQUI	22321.36
FORMACIÓN TURI	159.83
VOLCÁNICOS DE LLACAO	11.94
TERRAZAS	1170.34
TRAVERTINO	48.54
TOTAL AREA (HA)	32587.76

Como se había mencionado, en su mayoría, se destaca la Formación de Tarqui dentro de la zona de interés, con 22321.36 hectáreas, lo cual hace referencia a rocas sedimentarias, comprendiendo tobas acidas caolinizadas, meteorizadas y blancas-rojas. Así también, tienen relevancia las Tilitas, con 3096.10 hectáreas, provenientes de glaciares, junto con la Formación Célica, cuya extensión es de 3793.52 hectáreas, correspondientes a rocas volcánicas, basálticas y piroclastos.

De esta manera, se evidencia la presencia, en su mayoría, de material sedimentario consolidado de varios orígenes y periodos en la historia.

2.4 Cobertura del suelo

En base a los estudios realizados por la Universidad del Azuay para la cuenca hidrográfica de Paute, se han tomado los valores relacionados con la sub-cuenca del Machángara para la elaboración de un mapa de cobertura del suelo, de modo que se conozca las categorías y el área respectiva de cada una de ellas.

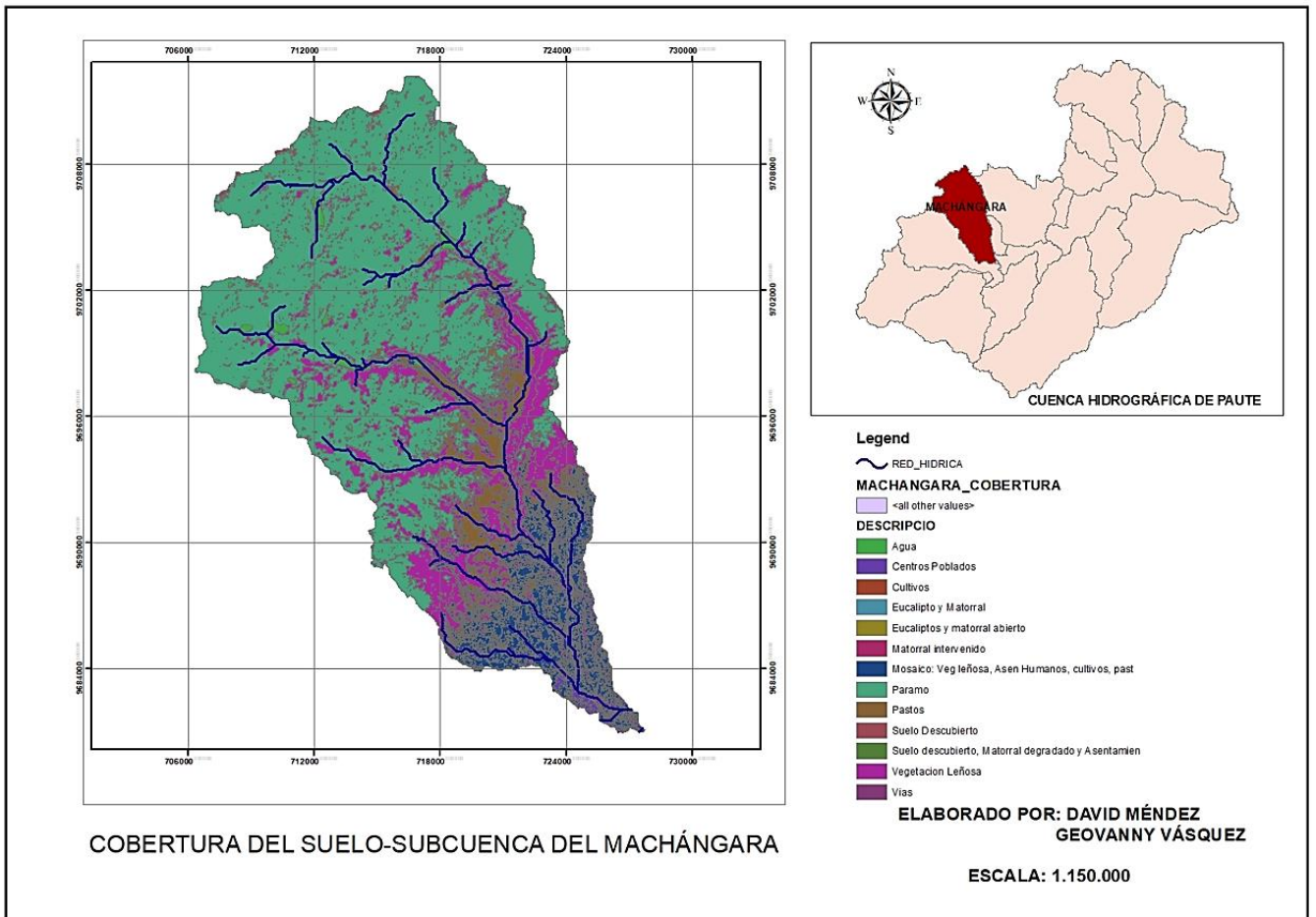


Ilustración 3: Mapa de la Cobertura del suelo.

Fuente: Universidad del Azuay.

Elaborado por: Autores.

Anexo 16.

Por medio de los procesos y herramientas propias de los sistemas de información geográfica, se obtiene el mapa de la ilustración 4, en donde se observa únicamente la cobertura del suelo perteneciente a la sub-cuenca del Machángara, misma que, según lo calculado, se registra una gran cantidad de vegetación de pá666ramo en la superficie alta. Sin embargo, en la extensión media y baja se puede denotar matorrales en conjunto con centros poblados, lo cual guarda concordancia con la ubicación urbana de parte de la población del Azuay.

Así también, se muestra una tabla que enlista los tipos de cobertura de suelo en la sub-cuenca del Río Machángara, con sus respectivas superficies tomadas del resumen del proceso de mapeo:

Tabla 5: Cobertura del Suelo.

Fuente: Universidad del Azuay.6

Elaborado por: Autores.

Descripción	Área (Ha)
Agua	334.89
Centros poblados	376.84
Cultivos	2.20
Eucalipto y matorral	0.58
Eucaliptos y matorral abierto	0.75
Matorral intervenido	0.4
Mosaico: vegetación leñosa, cultivos	10257.83
Asentamientos humanos	
Paramo	18467.04
Pastos	2463.88

Suelo descubierto	181.08
Vías	481.66
Área total	32567.15

Como se pudo evidenciar en la tabla 3, existe mayor área de páramo en la cuenca del Machángara con 18467.04 hectáreas, así también se puede notar una porción grande de cuerpos de agua de 334.89 hectáreas, esto puede ser debido a las lagunas que existen aguas arriba. De igual manera se presencia, gran cantidad de vegetación y cultivos cercano a los asentamientos humanos, lo cual predice un uso de suelo agrícola. Se obtiene un total de área de 32567.15 hectáreas, lo cual se relaciona con un aproximado del área de la sub-cuenca de estudio.

Estos resultados permiten, más adelante, la diferenciación de los números de curva distribuidos en la cuenca ya que guardan relación con los grupos hidrológicos que posee el terreno y su posterior capacidad de retención de líquido.

2.5 Uso del Suelo

Cuando se hace mención al “uso del suelo”, se refiere a la actuación de los seres humanos dentro de los procesos naturales, entendiéndose a esto como los asentamientos humanos, zonas agrícolas, áreas de protección, entre otras.

De este modo el uso del suelo representa un cambio en los paisajes, ecosistemas y el medio ambiente, tanto positivos como negativos.

En la cuenca hidrográfica del Machángara, como se pudo observar en la cobertura del suelo, existe mayormente áreas de paramo. Sin embargo, en años pasados, predominaba estos espacios y, actualmente se han observado cambios significativos debido a la expansión urbana. En las partes altas de la cuenca se distingue un aprovechamiento de la vegetación puesto que ha existido un pequeño incremento en áreas ocupadas por bosques de eucalipto, así también de centros poblados y rápida expansión agropecuaria.

En la zona media, el avance agrícola es la actividad principal, donde se encuentran cultivos junto a establecimientos de potreros, que han desplazado la vegetación nativa, obteniéndose así un mosaico dominado por tierras para cultivo.

En la zona baja de la cuenca se distingue principalmente el casco urbano, así como el suelo sin vegetación, en donde ocurren procesos erosivos importantes. Se encuentran pequeñas parcelas de cultivos menores y zonas de vegetación a los márgenes de los ríos.

La taxonomía de los diferentes suelos ubicados a lo largo de la extensión de la cuenca del Machángara y sus respectivas características, pueden mostrar un posible uso del suelo.

A continuación, se listan los tipos de suelos con sus características y uso probable:

Tabla 6: Tabla de tipología del suelo.

Fuente: Ortega (2012).

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS	USO PROBABLE
HISTIC HYDRANDEPT pseudo-limoso, isothermic	Es principalmente un suelo negro y esponjoso capaz de retener abundantes líquidos.	Bosques húmedos.
VERTIC ARGIUODOLL arcillo-arenoso sobre arcilloso –isothermic.	Suelo arcilloso y arenoso de 30 a 50cm de profundidad.	Cultivos de maíz.
PARALITHIC CHROMUSTERT, isothermic.	Suelo arcilloso más o menos profundo de 40 a 60 cm de espesor.	Cultivos de trigo , maíz, arroz, algodón, pastos, caña.
RHODUDALF arcilloso, montmorillonitic mezcla , isothermic.	Suelo arcilloso rojizo oscuro con alto contenido de cationes. Ph menor a 6.	Cultivos de maíz.
PARALITHIC VERTIC USTROPEPT, isothermic.	Suelo arcilloso negro oscuro profundo, a más de 1 metro.	Cultivos de maíz, pastos, algodón, arroz.

LITHIC, HISTIC HYDRANDEPT pseudo limoso isomesic	Suelo sobre rocas a menos de 50 cm, suelo negro, limoso y esponjoso.	Pastos con bajos rendimientos.
--	--	-----------------------------------

Se observa la presencia de una variedad de tipos de suelos distribuidos a lo largo de la superficie de la cuenca hidrográfica del Machángara, los cuales guardan relación con un comportamiento arcilloso, por lo que se puede denotar un uso probable de suelo, en su mayoría, para cultivos y pastos.

Debido a la falta de información acerca del uso del suelo en el sitio de interés, se ha recurrido a la observación y posterior diferenciación de un uso probable, basándose en las distinciones elaboradas por Ortega (2012).

2.5.1 Mapa de suelos

Es necesario conocer la distribución de la taxonomía del suelo, debido a que está en función de la capacidad de retención de líquidos. Estos valores permiten obtener otros parámetros hidrológicos que aportan a las modelaciones, ya que una idealización depende de sus entradas, pérdidas y salidas.

Como se observó en el punto anterior, en la tabla 4 se enuncia la taxonomía distribuida en la cuenca del Machángara, de igual manera, los datos fueron tomados de las investigaciones de la Universidad del Azuay en la cuenca del río Paute para la elaboración del mapa de suelos:

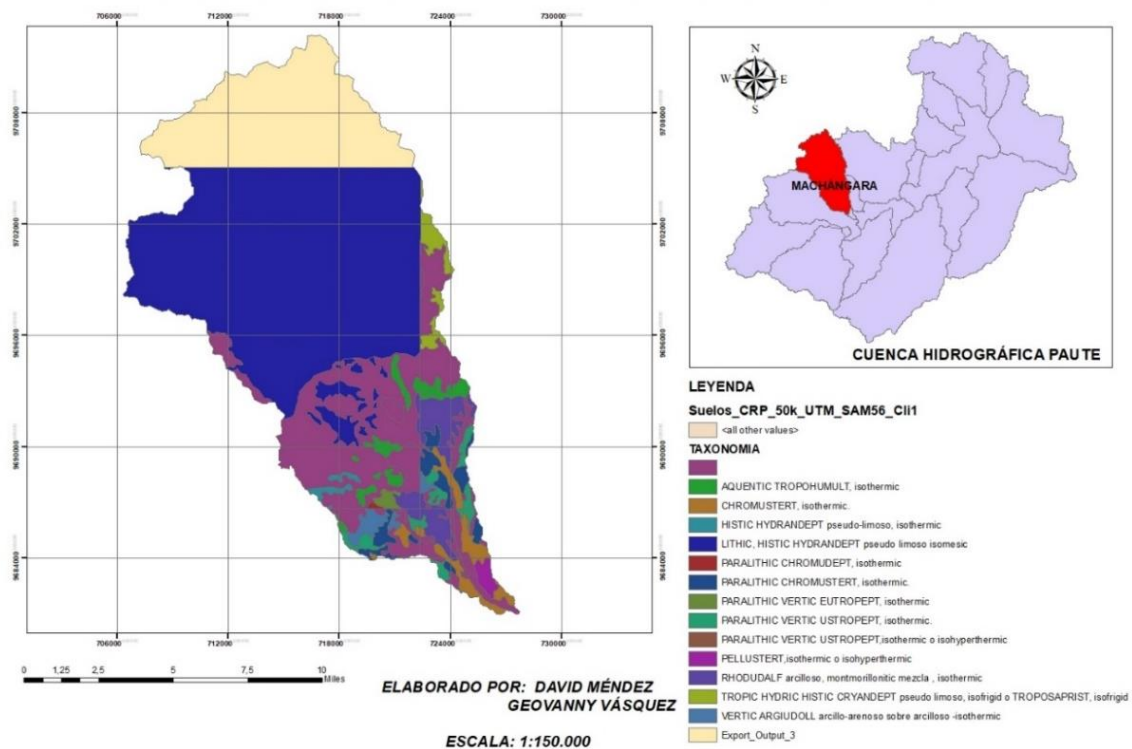


Ilustración 4: Mapa Taxonomía del suelo en la Cuenca Hidrográfica Machángara.

Fuente: Universidad del Azuay.

Elaborado por: Autores.

Anexo 20.

De acuerdo con la representación del mapa correspondiente a la ilustración 5, se observa una mayor extensión de un suelo “Lithic, Histic Hidrandept”, lo cual en relación con la tabla 4, pertenecen a los suelos negros, esponjosos, capaces de retener líquido, influyendo de esta manera sobre la cuenca alta en su comportamiento hidrológico a través del coeficiente de escorrentía.

2.6 Delimitación de la cuenca del Machángara en Hec-GeoHms

Para la obtención de los parámetros fisiográficos de la cuenca del Machángara, es necesario la delimitación de la superficie de estudio, de modo que se puedan manipular varios parámetros de entrada, como lo es el área, perímetro, ríos, punto de salida, etc.

La metodología más eficaz para una correcta delimitación, es el uso de los sistemas de información geográfico que, en este caso se ha utilizado el software ArcGis,

el mismo que permite el uso de la herramienta Hec-GeoHms que, a través de un modelo digital de elevaciones como entrada, permite obtener la cuenca correctamente delimitada. Cada uno de estos procesos permite la corrección de la información de entrada, la definición de flujos y su respectiva acumulación, de igual modo su segmentación con el área de interés. Además, la subdivisión en microcuencas pertenecientes a la zona de estudio, así como también las pendientes involucradas.

De este modo se obtiene la delimitación de la cuenca del Machángara, en este caso, con un punto de salida determinado después la junta entre río Sinincay con el río Machángara (724917.545200; 9682744.727).

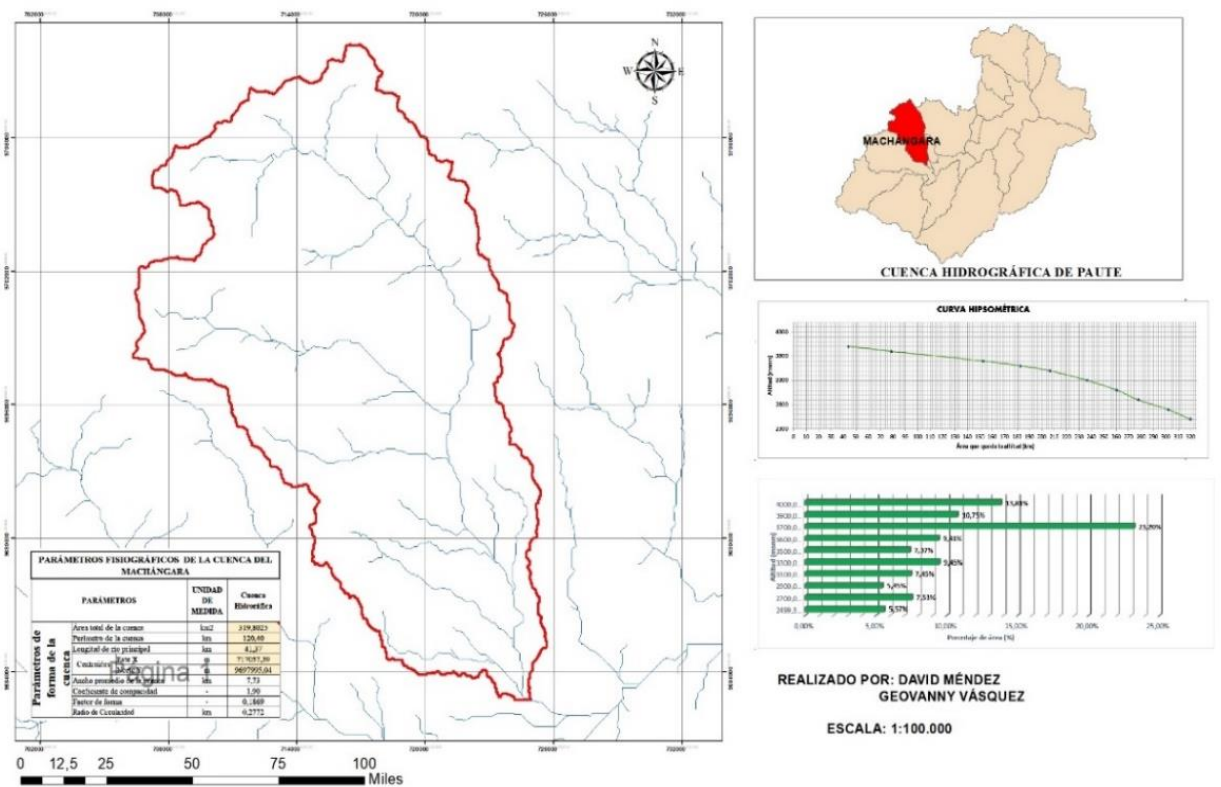


Ilustración 5: Delimitación de la cuenca del Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 22.

Como se ilustra en la imagen 6, se reconocen los flujos que atraviesan la superficie de la cuenca hidrográfica, así también el borde de aguas en conjunto con los parámetros fisiográficos más relevantes, que se describen continuamente en el estudio, tales como el polígono de frecuencias y la curva hipsométrica.

2.7 Parámetros fisiográficos e hidrográficos de la cuenca del Machángara.

Son parámetros de gran relevancia utilizados en el análisis del comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica, ya que existe una relación entre los elementos fisiográficos y el régimen hidrológico; esto permite extrapolar parámetros hidrológicos en puntos de interés, en donde no se dispongan datos.

De acuerdo con la sección 2.6 de este estudio, por medio del SIG ArcGis, se ha delimitado la cuenca del Río Machángara, en donde se han aplicado las formulaciones respectivas para la obtención de los resultados fisiográficos listados a continuación:

- Área total de la cuenca: 319.63 km².

Tabla 7: Tabla de unidades hidrográficas y rangos

Fuente: DSMC-DGASI (1983).

Unidad hidrográfica	Área (km ²)	N de Orden del río
Microcuenca (pequeña)	10-100	1°, 2° ó 3°
Sub-cuenca (mediana)	100-700	4° ó 5.°
Cuenca (grande)	700-6000	6° ó más

En la ilustración 7 se muestra la clasificación de las unidades hidrográficas, dando como resultado una sub-cuenca de tamaño mediano con un número de orden de río 4 o 5, de acuerdo con DSMC-DGASI (1983).

- Perímetro de la cuenca: 94.29 km.
- Longitud del río principal: 33.62 km.
- Centroides de la cuenca: (717057,39; 9697995,04).
- Ancho promedio de la cuenca: 9.507 km.

Se calculó con la ecuación 10: $Ap = \frac{A}{L}$; Donde: A es el área de la cuenca y L la longitud del río principal.

- Coeficiente de compacidad: 1.49

Se calculó con la igualdad $Kc = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}$; Donde A es el área de la cuenca y P el perímetro.

Tabla 8: Tabla de formas de una cuenca hidrográfica en función de su coeficiente de compacidad.

Rango	Forma
1,00- 1,25	Redonda a oval redonda (compacta)
1,25 -1,50	Oval oblonga a rectangular oblonga
1,50- 1,75	Oval blonga a rectangular oblonga.
> 1,75	Casi rectangular (alargada)

En conformidad con la tabla 7 y los datos necesarios para la obtención del coeficiente de compacidad, la forma de la cuenca es oval redonda a oval oblonga.

- Factor de forma: 0.28

Se obtuvo este parámetro por medio de la ecuación 12: $Ff = \frac{A}{L^2}$; Donde A es el área de la cuenca y L, la longitud del río principal.

Tabla 9: Rangos aproximados del factor de forma.

Fuente: Pérez (1979).

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la Cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desague

De acuerdo con la tabla 9 de Pérez (1979) en función del factor de forma, la sub-cuenca del Machángara es alargada.

- Radio de Circularidad: 0.452

Este valor se calcula por medio de la siguiente ecuación 13: $Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$; Donde A es el área de la cuenca y P el perímetro.

Este valor representa el grado de simetría que posee la cuenca al compararlo con la medida del radio del círculo asociado.

En consecuencia, se muestra una tabla resumen de los parámetros fisiográficos de la cuenca del Machángara, los mismos que han sido comparados y validados con los estudios realizados por la empresa ETAPA:

Tabla 10: Tabla resumen de los parámetros fisiográficos de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.

PARÁMETROS FISIGRÁFICOS DE LA CUENCA DEL MACHÁNGARA			
PARÁMETROS		UNIDAD DE MEDIDA	Cuenca Hidrográfica
Parámetros de forma de la cuenca	Área total de la cuenca	km ²	319.6300
	Perímetro de la cuenca	km	94.29
	Longitud de río principal	km	33.62
	Centroides	Este X	717057.39
		Norte Y	9697995.04
	Ancho promedio de la cuenca	km	9.51
	Coficiente de compacidad	-	1.49
	Factor de forma	-	0.2828
	Radio de Circularidad	km	0.4518

Cada uno de los parámetros encontrados por medio de los procesos y herramientas del Sistema de Información Geográfica, se listan en la tabla de la ilustración 10, los mismos que se ven involucrados dentro del análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca ya que describen su extensión, distribución y simetría. Sin embargo, es necesaria una caracterización a nivel de micro-cuencas, de modo que se pueda conocer el comportamiento de cada uno de los sectores, de igual forma, por la distribución de las estaciones pluviométricas, se ha considerado esta subdivisión.

2.8 Parámetros de Altitud de la cuenca del Machángara

A partir de una reclasificación del modelo digital de elevación de la cuenca de estudio, en base a las distintas altitudes distribuidas en la superficie, se obtiene lo siguiente, en donde se muestran las altitudes mínimas y máximas, así como también el porcentaje de área que ocupan:

Tabla 11: Tabla de reclasificación de altitudes de la cuenca del Machángara. Elaborado por: Autores.

COUNT	AREA	MIN	MAX	RANG	MEAN	STD	SUM
7131	17827500	2499.322	2699.99	200.67	2628.95	51.24	18747077.52
9628	24070000	2700.047	2899.97	199.92	2792.38	57.98	26885044.74
6970	17425000	2900.072	3099.99	199.92	3006.72	58.34	20956891.18
9535	23837500	3100.094	3299.98	199.89	3207.91	57.87	30587471.44
12093	30232500	3300.011	3499.97	199.96	3406.89	57.81	41199606.27
9432	23580000	3500	3600	99.99	3556.16	29.95	33541789.2
12036	30090000	3600.041	3699.99	99.95	3653.94	27.63	43978880.64
29677	74192500	3700.004	3899.99	199.99	3803.5	57.84	112876627.6
13747	34367500	3900	4000	99.99	3949.92	29.39	54299561.89
17672	44180000	4000	4398.91	398.9	4096.86	72.18	72399711.04

De la misma manera, se obtiene un cuadro de áreas entre curvas de nivel para el cálculo de las curvas características de una cuenca:

Tabla 12: Cuadro de áreas entre curvas de nivel.

Elaborado por: Autores.

N °	COTA (msnm)			Área (km ²)					Ci*Ai
	Mínima	Máxima	Promedio "Ci"	Área Parcial "Ai"	Área Acumulada (km ²)	Área que queda sobre la superficie (km ²)	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.	
1	2499.32 227	2699.99 805	2599.7	17.8275	17.83	319.80	5.57%	100.0	46345. 44
2	2700.04 785	2899.97 705	2800.0	24.07	41.90	301.98	7.53%	94.4	67396. 30
3	2900.07 275	3099.99 805	3000.0	17.425	59.32	277.91	5.45%	86.9	52275. 62
4	3100.09 473	3299.98 56	3200.0	23.8375	83.16	260.48	7.45%	81.5	76280. 96
5	3300.01 123	3499.97 656	3400.0	30.2325	113.3 9	236.64	9.45%	74.0	10279 0.32
	Mínima	Máxima	Promedio "Ci"	Área Parcial "Ai"	Área Acumulada (km²)	Área que queda sobre la superficie (km²)	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.	83709. 10
6	3600.04 175	3699.99 902	3650.0	30.09	167.0 6	182.83	9.41%	57.2	10982 9.11
7	3700.00 488	3899.99 927	3800.0	74.1925	241.2 6	152.74	23.20 %	47.8	28193 1.65
8	3900.00 024	4000	3950.0	34.3675	275.6 2	78.55	10.75 %	24.6	13575 1.63
10	4000.00 415	4398.91 26	4199.5	44.18	319.8 0	44.18	13.81 %	13.8	18553 2.07
				319.802			100%		11418
				5					42.20
	ALTITUD MEDIA DE LA CUENCA								3570.4
									6

En las tablas 10 y 11, se hace referencia a la relación que guarda la cota con el área para, posteriormente, encontrar la curva hipsométrica y el polígono de frecuencia de altitudes. De igual manera permite conocer la altitud media que posee la cuenca del Machángara, siendo de 3570.46 metros sobre el nivel del mar, lo cual es un valor elevado, correspondiente con la sierra ecuatoriana.

2.8.1 Curva Hipsométrica de cuenca del Machángara

Como ya se mencionó en el capítulo 1, esta curva representa en el eje de las ordenadas, las elevaciones en metros sobre el nivel del mar y en el eje de las abscisas, el porcentaje del área de la cuenca que se establece por encima de la elevación indicada, por lo que logra caracterizar, de algún modo, el relieve de la cuenca hidrográfica.

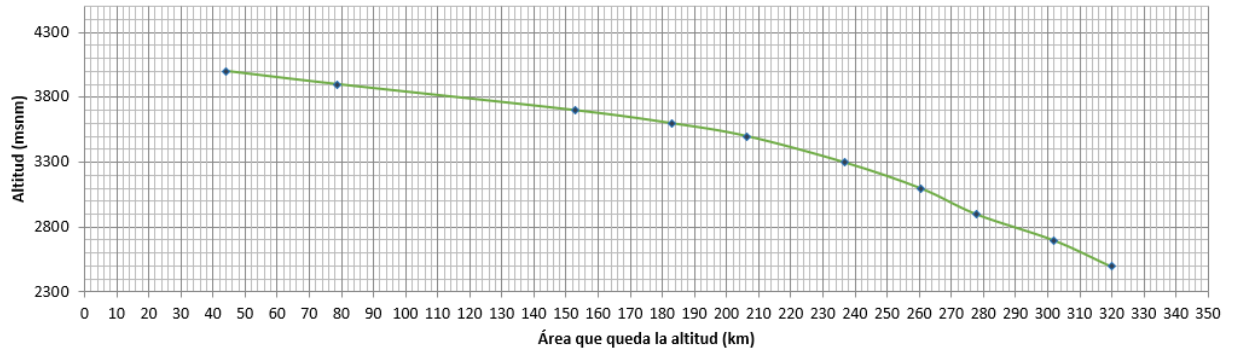


Ilustración 6: Curva Hipsométrica de la cuenca del Machángara.

Elaborado por: Autores,

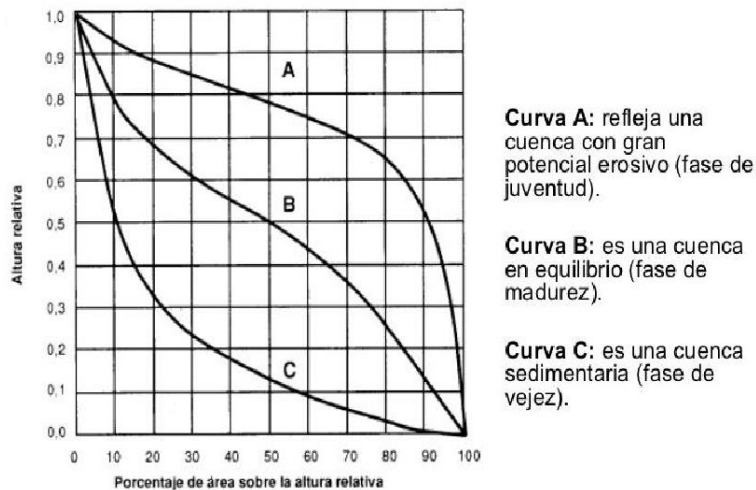


Ilustración 7: Tipología de las curvas hipsométricas

De acuerdo con la tipología de las curvas, se puede deducir que la curva hipsométrica, correspondiente a la cuenca del Machángara, es una “Curva A”, siendo esta una cuenca con gran potencial erosivo, en fase de juventud, debido a su similitud gráfica.

2.8.2 Polígono de Frecuencia de Altitudes

Este polígono representa en el eje de las ordenadas, el porcentaje parcial del área de una cuenca en estudio y en el eje de las abscisas, las altitudes en metros sobre el nivel del mar comprendidas dentro de ese porcentaje. Este polígono, es un complemento de la curva hipsométrica ya que permite conocer las altitudes más frecuentes en una cuenca a través del porcentaje más alto del diagrama.

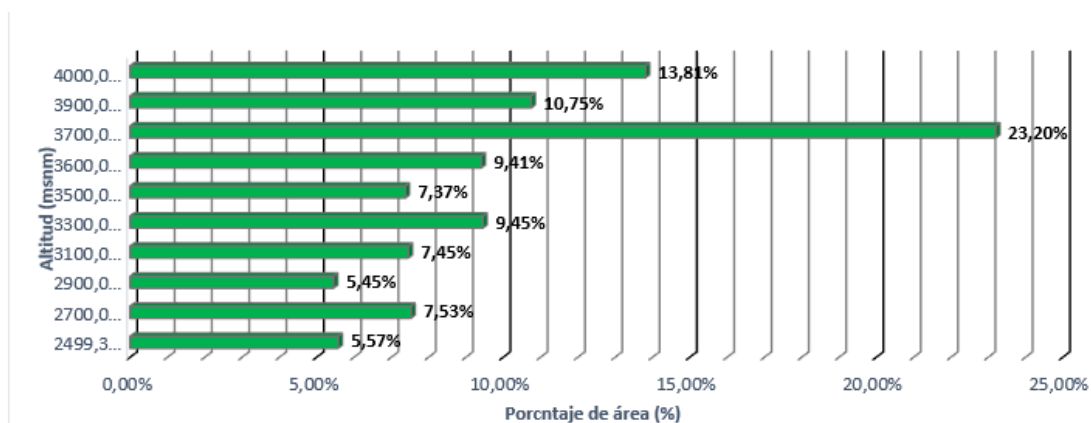


Ilustración 8: Polígono de frecuencia de altitudes Cuenca del Machángara.

Elaborado por: Autores.

En el diagrama, se puede evidenciar que el mayor porcentaje de área, se encuentra en una altitud de 3700 msnm, siendo este de 23.20%. Lo cual tiene relación con la altura media encontrada en la ilustración 12.

2.9 Cálculo de Pendiente de la cuenca del Machángara

Como ya se conoce, el término “pendiente” hace referencia a la inclinación del terreno, por lo que, a mayor inclinación, mayor es la pendiente. La pendiente es calculada a través de la tangente de la superficie y, a su vez, la tangente se obtiene con la razón entre el cambio vertical en altitud y la distancia horizontal.

Dentro del análisis para la modelación hidrológica, la pendiente facilita conocer las zonas donde se producen rápidos cambios de presión, revelando la localización de frentes meteorológicos.

Con la aplicación de los SIG, en este caso ArcGis, se ha obtenido la pendiente media de la cuenca hidrográfica del Machángara, siendo esta de 32,718019%, revelando un terreno moderadamente escarpado propio de la sierra. Este parámetro, condiciona el tránsito de

avenidas dentro de la simulación hidrológica, ya que dentro del alcance de este estudio se utilizará el método de Muskingum, el cual se detallará más adelante.

2.10 Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca del Machángara

Es de gran relevancia conocer los parámetros de la red hidrográfica de la cuenca de estudio tales como: orden de los ríos, frecuencia de densidad de los ríos, cotas del cauce principal, altura media del río principal y tiempo de concentración. De igual manera, se obtendrá cada una de estas variables por medio de las herramientas de ArcGis y su respectiva tabulación:

Tipo de corriente: Se toma comúnmente como base, la permanencia de flujo en el cauce del río, siendo para este caso, un río perénne debido a que la red hidrográfica de la cuenca del Machángara contiene agua permanente todo el año.

Número de orden de los ríos: Dentro del sistema de información geográfico, se ha realizado el proceso para la obtención del orden de los ríos con el método de STRAHLER, el cual utiliza un proceso de selección, conservándose el de orden mayor respectivamente.

Frecuencia de densidad de los ríos: Este parámetro corresponde al número de ríos por unidad de superficie de la cuenca. Por lo tanto, su ecuación es la siguiente: $Dr = \frac{Nro\ rios}{A}$; Donde Nro. ríos es el número de ríos y A el área total de la cuenca hidrográfica (km²). De este modo que se obtiene una frecuencia de densidad de 0.147

Densidad de drenaje: Este concepto corresponde al cociente entre la sumatoria del largo total de los cursos de agua. La ecuación para su cálculo es: $Dd = \frac{LT}{A}$. Por lo tanto, la densidad de drenaje de la cuenca de estudio se obtuvo de 0.388, clasificándose como una capacidad de drenaje bajo.

Cotas del cauce principal: De igual manera, por medio de las herramientas del SIG se obtienen las cotas máximas y mínimas del cauce principal, siendo estas 3870.55 msnm y 2963.66 msnm respectivamente.

Pendiente del cauce principal: Para conocer la pendiente del río principal, se efectúa la siguiente ecuación: $Sm = \frac{(HM-Hm)}{1000*L}$; Donde HM y Hm hacen referencia a la altura

máxima y altura mínima respectivamente y, L es la longitud del río principal. Dada esta expresión se obtiene una pendiente de 0.027.

Tiempo de concentración: Finalmente se obtiene este parámetro de gran relevancia dentro de un análisis hidrológico ya que hace referencia al tiempo que tarda el agua en su recorrido entre dos puntos determinados, en este caso son: el extremo superior de la cuenca y el punto donde se mide el flujo.

Para este cálculo se ha realizado la ecuación de Kiprich: $T_c = 0.0195 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$. Donde L es la longitud del cauce principal y S la pendiente media del curso principal. De este modo se obtiene un tiempo de concentración de 2.59 horas.

A continuación, se muestra la tabla de resumen de cada uno de los parámetros correspondientes a la red hidrográfica de la cuenca del Machángara:

Tabla 13: Parámetros red hidrográfica Cuenca Machángara.

Elaborado por: Autores.

PARÁMETROS RED HIDROGRÁFICA CUENCA MACHÁNGARA			
PARÁMETROS			Cuenca Hidrográfica
Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca	Tipo de corriente		PERENNE
Frecuencia de densidad de los ríos (D_r)	ríos/km ²		0.1470
Altitud máxima (H_{max})	msnm	3870.55	
Altitud mínima (H_{min})	msnm	2963.66	
Pendiente media del río principal (S_m)	m/m		0.027
Altura media del río principal (H)	msnm		3417.105
Tiempo de concentración (T_c)	horas		2.5900

La tabla numero 11 guarda los valores de los parámetros de la red hidrográfica del Machángara, es decir de sus ríos, en donde se calculan varios datos de gran importancia dentro del comportamiento de la cuenca, como lo es el tiempo de concentración que condiciona varios procedimientos de la modelación hidrológica ya que hace referencia al tiempo necesario para que el caudal saliente se estabilice al ocurrir una precipitación constante, presentándose así, los caudales máximos.

Como se puede observar, un tiempo de concentración de 2.59 horas, es un valor adecuado para una cuenca de dimensiones medias como es el caso de la cuenca del Machángara, ya que este valor tendrá que transcurrir para que se sature la superficie y se genere una escorrentía directa.

De igual manera, los datos obtenidos por los respectivos procesos del software, han sido cotejados y validados con los estudios de la empresa ETAPA.

2.11 Clasificación de la cuenca del Río Machángara a nivel de microcuenclas.

Del mismo modo, con la ayuda de las herramientas de Arc-Gis y la extensión Hec-GeoHMS, se ha clasificado la cuenca del Machángara a nivel de tres microcuenclas, que han sido comparadas con estudios anteriores.

El criterio de clasificación, fue basado en la importancia de drenaje, considerándose la parte alta de la cuenca del Machángara, la microcuencla del río Chulco y la parte baja de la cuenca del Machángara.

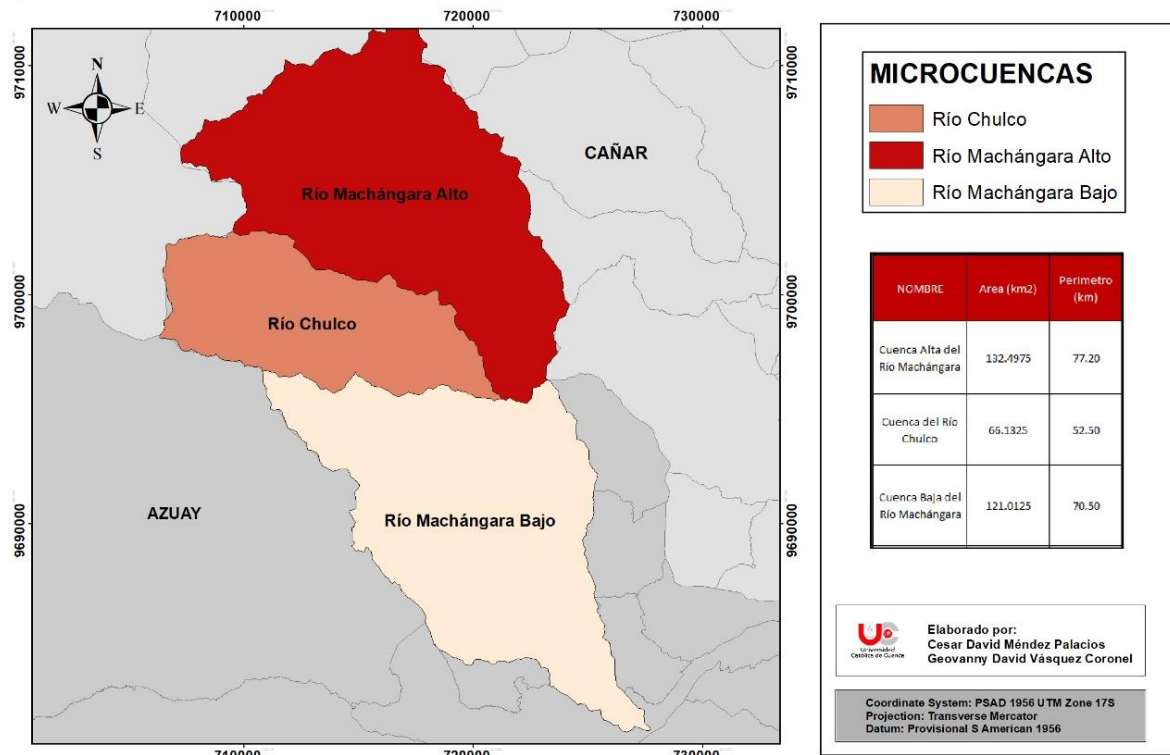


Ilustración 9: Cuenca hidrográfrica del río Machángara a nivel de microcuenclas.

Elaborado por: Autores.

Anexo 23.

El mapa correspondiente a la cuenca hidrográfica del río Machángara a nivel de microcuencas de la ilustración 17, ha sido resultado de la diferenciación jerárquica de la red hidrográfica, lo cual fue realizado en el apartado 2.2.

De esta manera, se visualizan tres micro-cuencas, las mismas que ocupan las siguientes superficies:

- Microcuenca del Río Machángara Alto, posee una superficie de 132.19 km² y un perímetro de 77.20 km.
- Microcuenca del Río Chulco, ubicado en la cuenca media del Machángara, se distingue un área correspondiente a 65.13 km², con un perímetro de 52.50 km.
- Microcuenca del Río Machángara Bajo, posee una superficie de 121.01 km², con un perímetro de 70.50 km.

2.12 Parámetros Fisiográficos y de red Hídrica de las microcuencas.

Se obtuvieron cada uno de los parámetros fisiográficos y de red hídrica correspondientes a cada microcuenca, de modo que los resultados de la modelación hidrológica sean más acertados, con la validación de las estaciones distribuidas en las zonas altas, media y baja de la cuenca.

A continuación, se detallan cada uno de los parámetros a través de las siguientes tablas:

Tabla 14: Datos Fisiográficos de las microcuencas del río Machángara.

Elaborado por: Autores.

DATOS FISIOGRAFICOS DE LAS MICROCUENCAS DEL RIO MACHANGARA						
NOMBRE	Area (km²)	Perímetro (km)	Longitud de rio principal (km)	Cota Máxima de la Cuenca	Cota Mínima de la Cuenca	Altura Media de la Cuenca
Cuenca Alta del Río Machángara	132.4975	77.20	20.24	4398.91	2964.67	3681.79
Cuenca del Río Chulco	66.1325	52.50	16.23	4366.44	2964.17	3665.31
Cuenca Baja del Río Machángara	121.0125	70.50	24.97	4120.00	2515.28	3317.64

Cuenca del Río Machángara P.I.	319.6300	94.29	33.62	4398.91	2515.28	3457.10
---------------------------------------	----------	-------	-------	---------	---------	---------

*Tabla 15: Datos Fisiográficos de las microcuencas del río Machángara Segunda Parte.
Elaborado por: Autores*

DATOS FISIOGRAFICOS DE LAS MICROCUENCAS DEL RIO MACHANGARA						
NOMBRE	Centroide (x)	Centroide (y)	Ancho promedio de la cuenca (km)	Coefficiente de compactad	Factor de Forma	Radio de Circularidad (km)
Cuenca Alta del Río Machángara	716666.316875	9704389.300483	6.546	1.89	0.32	0.279
Cuenca del Río Chulco	712997.742153	9698954.300583	4.075	1.82	0.25	0.302
Cuenca Baja del Río Machángara	719694.144725	9690489.704792	4.846	1.81	0.19	0.306
Cuenca del Río Machángara P.I.	717057.390000	9697995.040000	9.507	1.49	0.28	0.452

Tabla 16: Parámetros red hidrográfica de las microcuencas del Machángara.

Elaborado por: Autores.

PARÁMETROS RED HIDROGRÁFICA MICROCUENCAS DEL MACHÁNGARA									
Nombre	Cota Máx	Cota Mín	Pendi ente media (Sm)	Alt ura me dia (H)	Tiemp o Conc (horas)	Nro. Ríos	Densida d Ríos	Long T.	Densida d Dren
Cuenca alta del río Machángara	3801.3	2963.2	0.041	3382.3	1.57	15	0.11320	39.41	0.297
Cuenca del río chulco	3870.5	2963.6	0.056	3417.1	1.17	9	0.13609	21.47	0.325
Cuenca baja del río Machángara	4000.8	2515.2	0.059	3258.0	1.77	23	0.19006	63.16	0.522
Cuenca Machángara	3870.5	2963.6	0.027	3417.1	2.59	47	0.14704	124.04	0.388

De acuerdo con las tablas de las tablas 13, 14 y 15, se ha calculado cada uno de los parámetros diferenciados a nivel de las microcuencas delimitadas en el apartado anterior, con lo que tiene mayor importancia el tiempo de concentración de cada una de ellas, siendo para la cuenca alta del Machángara 1.57 horas. Del mismo modo, para la cuenca del río Chulco, se distingue un tiempo de 1.17 horas y, finalmente la cuenca baja del río Machángara dispone de 1.77 horas, en cuanto a su tiempo de concentración.

Cada uno de estos valores, guarda estrecha relación con los registros de la empresa ETAPA, así también otros parámetros de interés como sus superficies y perímetros, descritos en la sección 2.11 del presente estudio.

2.13 Obtención de número de curva por el método SCS.

Dentro del procedimiento para obtener el número de curva (CN), es necesario tener presentes ciertos datos de entrada como la cobertura vegetal, el tipo de suelo y el modelo digital de elevaciones que dispone la superficie de la cuenca de estudio, los mismo que fueron obtenidos en el capítulo 2.

De igual modo se debe manejar una clasificación que relacione la descripción de los suelos, con el grupo hidrológico de los mismos para asignar estos valores a su área determinada.

Con la ayuda de la intersección de los valores del tipo de suelo y cobertura vegetal, se puede clasificar cada espacio dentro de los siguientes grupos, siendo:

1. Agua.
2. Medio Residencial.
3. Área Forestal.
4. Agricultura.

Se dispone de una tabla de doble entrada, en donde se relaciona el uso de suelo, número de curva y cada categoría anteriormente mencionada. A continuación, se detalla el arreglo utilizado:

Tabla 17: Tabla Uso de suelo VS CN

Fuente: Agua y SIG (2021).

Tabla: Uso Del Suelo Vs Cn					
Valor	Descripción	A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Medio Residencial	57	72	81	86
3	Área Forestal	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87

A partir del cotejo de la tabla con la información intersecada, podemos obtener varios números de curva de acuerdo con cada superficie, de esta manera se han elaborado mapas CN para cada microcuenca, los cuales se muestran a continuación:

2.13.1 Mapa de numero de curva de la sub-cuenca alta del Río Machángara.

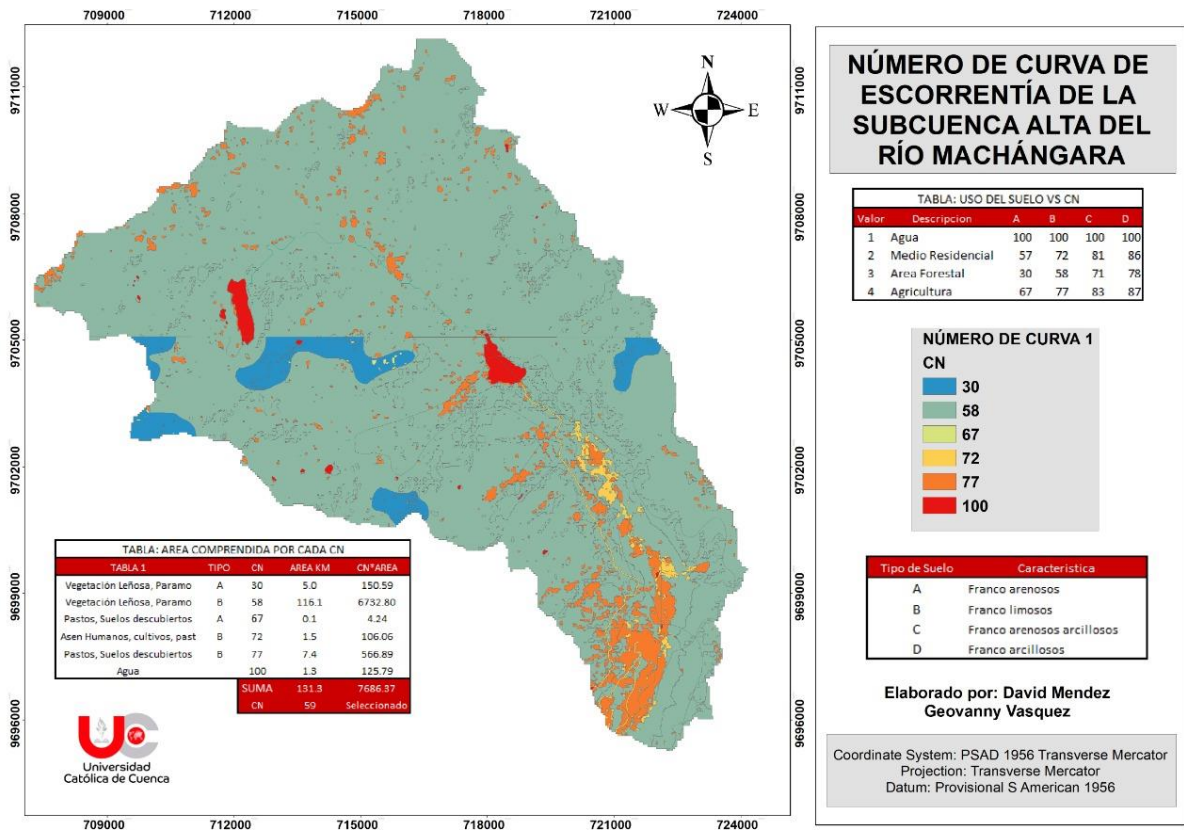


Ilustración 10: Mapa de numero de curva de la sub-cuenca alta del Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 2.

Se puede evidenciar, de acuerdo con la ilustración 21, el mapa correspondiente al número de curva de la sub-cuenca de la parte alta del Machángara, en donde se denota, con mayor frecuencia, números de curva entre 58 y 72. Esto se debe a la presencia fuerte de vegetación en esta superficie, la misma que retiene el líquido proveniente de las precipitaciones, retrasando la escorrentía directa.

2.13.2 Mapa de número de curva de la subcuenca del Río Chulco (Subcuenca Media).

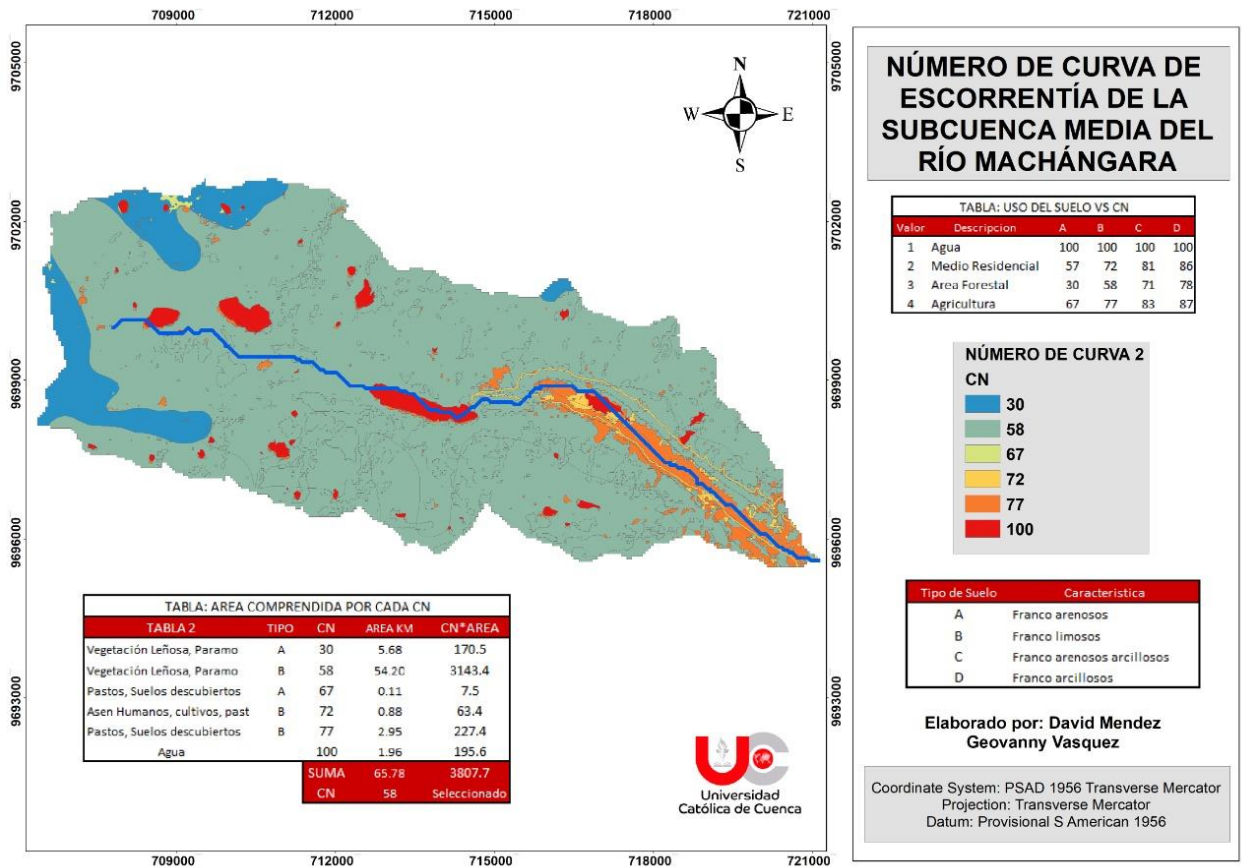


Ilustración 11: Mapa número de curva de la sub-cuenca media del Río Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 3.

En relación con el mapa de la ilustración 22, también se registra mayor área con números de curva entre 58 y 72. Sin embargo, se ha extendido notablemente superficies con valores de 77, ya que nos acercamos a la parte baja de la cuenca, en donde se ubica el casco urbano y suelos descubiertos.

2.13.3 Mapa de número de curva de la subcuenca baja del Río Machángara.

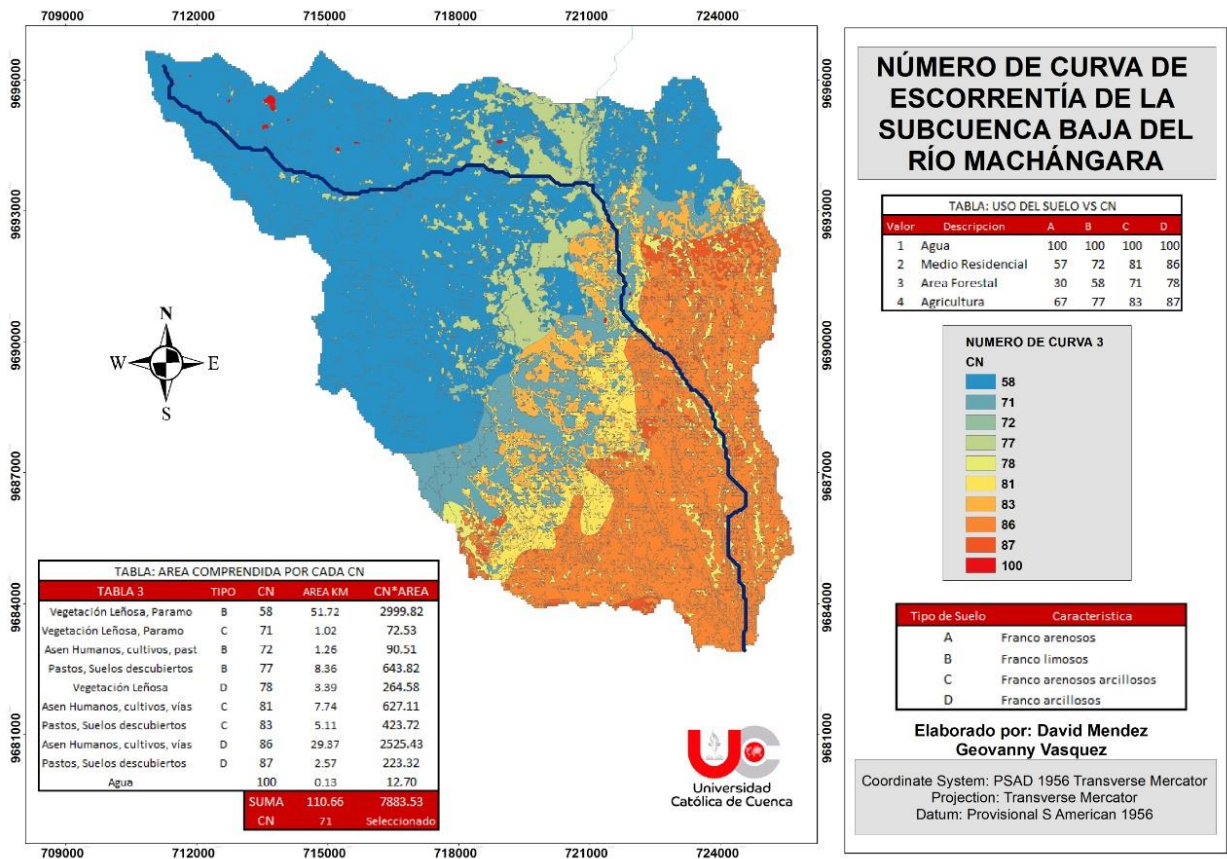


Ilustración 12: Mapa número de curva de la sub-cuenca baja del Río Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 1.

Finalmente, en la parte baja de la cuenca del Machángara, el número de curva se intensifica considerablemente, puesto que se tienen valores fuertes entre 77 y 87. Esto se ve condicionado por la presencia de los centros poblados de la zona, ya que los espacios verdes que retenían el líquido, han sido reemplazados por la urbanización que involucra la pavimentación y viviendas.

Al obtener varios valores de numero de curva, al momento de realizar las simulaciones en el software Hec-Hms, se debe trabajar con un CN ponderado, el mismo que se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$CN_{prom} = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i} \quad [2.1]$$

Donde:

CNi: Numero de curva de cada área de la sub-cuenca.

Ai: Área dentro de cada sub-cuenca.

De este modo, los CN promedio para cada sub-cuenca se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 18: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Alta del Machángara.

Elaborado por: Autores.

TABLA: AREA COMPRENDIDA POR CADA CN			
TABLA 1	CN	AREA KM	CN*AREA
Sub-Cuenca 1	30	5.0	150.59
Sub-Cuenca 1	58	116.1	6732.80
Sub-Cuenca 1	67	0.1	4.24
Sub-Cuenca 1	72	1.5	106.06
Sub-Cuenca 1	77	7.4	566.89
Sub-Cuenca 1	100	1.3	125.79
	SUMA	131.3	7686.37
	CN	59	Seleccionado

Tabla 19: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Media del Machángara.

Elaborado por: Autores.

TABLA: AREA COMPRENDIDA POR CADA CN			
TABLA 2	CN	AREA KM	CN*AREA
Sub-Cuenca 2	30	5.68	170.5
Sub-Cuenca 2	58	54.20	3143.4
Sub-Cuenca 2	67	0.11	7.5
Sub-Cuenca 2	72	0.88	63.4
Sub-Cuenca 2	77	2.95	227.4
Sub-Cuenca 2	100	1.96	195.6
	SUMA	65.78	3807.7
	CN	58	Seleccionado

Tabla 20: CN en condiciones normales para Sub-cuenca Baja del Machángara.

Elaborado por: Autores.

TABLA: AREA COMPRENDIDA POR CADA CN			
TABLA 3	CN	AREA KM	CN*AREA
Sub-Cuenca 3	58	51.72	2999.82
Sub-Cuenca 3	71	1.02	72.53
Sub-Cuenca 3	72	1.26	90.51
Sub-Cuenca 3	77	8.36	643.82
Sub-Cuenca 3	78	3.39	264.58
Sub-Cuenca 3	81	7.74	627.11
Sub-Cuenca 3	83	5.11	423.72
Sub-Cuenca 3	86	29.37	2525.43
Sub-Cuenca 3	87	2.57	223.32
Sub-Cuenca 3	100	0.13	12.70
	SUMA	110.66	7883.53
	CN	71	Seleccionado

A través de la formulación correspondiente para un CN promedio, se han obtenido los valores descritos en las tablas, las cuales muestran los resultados de:

- La sub-cuenca alta posee un valor de numero de curva promedio de 59.
- La sub-cuenca media, correspondiente a la sub-cuenca del río Chulco, adquiere un numero de curva promedio de 58.
- La sub-cuenca baja, por otro lado, registra un CN promedio de 71.

2.14 Condiciones antecedentes de humedad

Los números de curva encontrados anteriormente, aplican para un estado CN (II) que implican condiciones normales de la cuenca. Para nuestro estudio, se deben considerar condiciones húmedas puesto que la cuenca hidrográfica del Machángara registra valores diarios de precipitación que provocan una escorrentía directa. Para el cálculo del número de curva en condiciones húmedas, se ha utilizado la siguiente ecuación:

Ecuación 19:

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10+0.13CN(II)} \quad [2.2]$$

Las sub-cuencas quedan definidas con el número de curva en condiciones húmedas de:

Tabla 21: Números de curva en condiciones húmedas.

Elaborado por: Autores.

TABLA: NÚMERO DE CURVA CN(III)		
Sub-cuenca	CN(II)	CN(III)
Sub-cuenca alta	59	76.79683
Sub-cuenca media	58	76.05473
Sub-cuenca baja	71	84.9194

Como se observa en la tabla 20, los números de curva que forman parte de la simulación del comportamiento hidrológico, en primera instancia, son aquellos que representan las condiciones húmedas de la cuenca, siendo estos:

- Para la sub-cuenca alta, se tomará un CN de 76.8.
- En la sub-cuenca media, correspondiente a la sub-cuenca del río Chulco, será un CN de 76.
- Para la superficie de la sub-cuenca baja del Machángara, se considera un CN de 85.

2.15 Polígonos de Thiessen

Para conocer la importancia que cada estación pluviométrica ocupa en la cuenca hidrográfica del Machángara, es necesario calcular el área de aporte de cada una de ellas dentro de los límites de la cuenca, para ello, algunas herramientas dentro del programa ArcGIS facilitan su cálculo a través de buffers de una nube de puntos para establecer zonas de influencia.

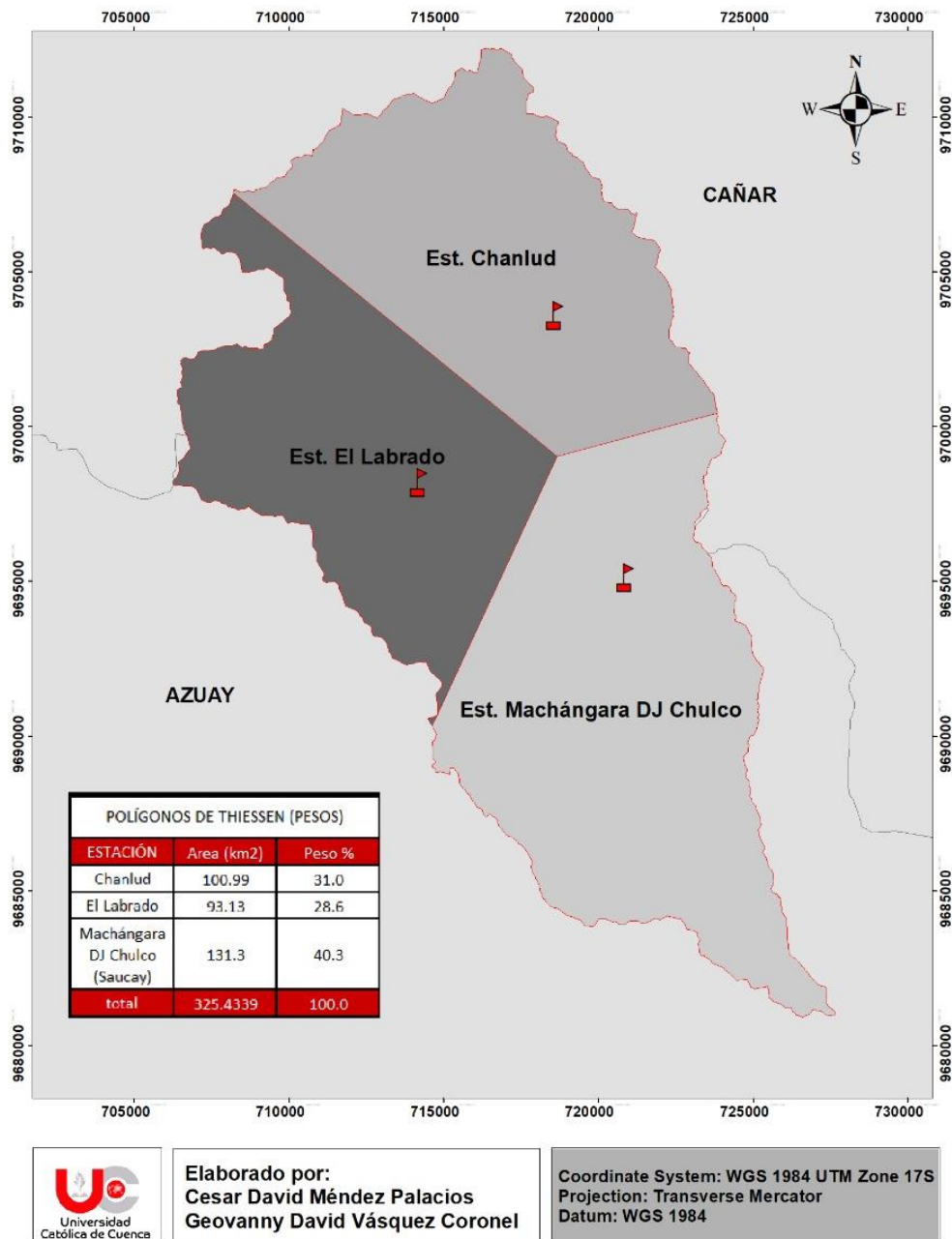


Ilustración 13: Polígonos de Thiessen.

Elaborado por: Autores.

Anexo 24.

Posteriormente, al conocer las áreas de cada polígono respectivamente, se procede a obtener los porcentajes de influencia basados en la totalidad del área de la cuenca hidrográfica, calculando así, el “peso” de cada estación. De este modo, la estación de Chanlud tiene una influencia del 31%, Labrados un 28.6% y Chulco un 40.3%.

Estos valores son ingresados al modelo meteorológico de la cuenca, ya que se refiere a la importancia de cada estación al suscitarse el evento de precipitación.

2.16 Embalses de la sub-cuenca del Machángara

Dentro de la sub-cuenca de estudio, se registran dos represas de importancia que afectan considerablemente el flujo base que transita por las avenidas más relevantes de la cuenca hidrográfica, dando un retraso y disminución del caudal punta, dicho fenómeno se lo conoce como “laminación de las avenidas”.

De esta manera, cuando una avenida entra a un embalse, este responde de acuerdo a sus dimensiones y estructuras de salida, dando una respuesta en forma de onda de salida. El embalse trabaja como un amortiguador que cambia la condición de entrada en una salida que mayormente es suave.

2.16.1 Embalse de Chanlud

Esta represa se encuentra ubicada en la cuenca alta del río Machángara a una altura de 3500 metros sobre el nivel del mar. Su construcción tuvo inicio en el año de 1994 y terminó en agosto de 1996, poniéndose en marcha de manera inmediata.

Dicha estructura es de tipo arco de gravedad de hormigón armado, con una altura de 51 metros y una capacidad de almacenamiento de 17 Hm³. (ELEC AUSTRO, 2019)

Algunos de los beneficios que presenta, es la distribución de agua para la planta de potabilización de Tixán, además, una fracción es utilizada para riego. Por otro lado, desde el punto de vista hidráulico, disminuye los riesgos de inundación en la cuenca baja del Machángara. (ELEC AUSTRO, 2019)

De acuerdo con la información proporcionada por la empresa de Elec-Austro en sus registros, se puede denotar un caudal de salida medio de la represa de 2 m³/s, en

donde, más adelante, será implementado dentro del modelo hidrológico en el análisis de flujo base por el método de constante mensual.

2.16.2 Embalse de Labrado

La represa de Labrado, llamada Daniel Toral Vélez, está ubicada, de igual manera, en la superficie alta de la cuenca del Machángara, a una altura de 3400 metros sobre el nivel del mar.

Esta construcción empezó en noviembre del año 1969 y fue terminada en abril de 1972, por lo que es ligeramente más antigua que la represa de Chanlud antes mencionada. La represa funciona como muro de gravedad, consta de hormigón ciclópeo con un dique conformado por enrocado recubierto de arcilla compactada que posee una longitud de 117 metros. Por otro lado, está constituido por otro tramo construido con tierra compactada con enrocado para protección aguas arriba con un desarrollo de 251.65 metros. La altura de la represa es de 13 metros, con una capacidad de 6.2 Hm³. (ELEC AUSTRO, 2019)

Los beneficios que presenta esta estructura son similares con la estación Chanlud, de igual manera el análisis de laminación de flujo en las avenidas, a través del cálculo de un promedio de caudal de salida, revela un gasto de 2 m³/s. De esta manera, dentro del análisis de flujo base, se suma este valor mediante el método de constante mensual en la modelación hidrológica de la cuenca del Machángara.

Capítulo 3. Modelación Hidrológica del Machángara

3.1 Determinación de hietogramas e hidrogramas para la modelación hidrológica

Dentro de la modelación hidrológica, es de gran importancia los datos de entrada, en este caso, las lluvias de diseño que se utilizaran para la transformación de precipitación en escorrentía, de igual manera permiten validar los resultados que arroja la simulación.

Estos datos de precipitación, así como de caudal, se obtienen de registros anuales receptados por estaciones meteorológicas y pluviométricas que se encuentran distribuidas estratégicamente en las cuencas hidrográficas.

Para nuestro caso de estudio, se han tomado cuatro estaciones de interés, en base a su posición y disponibilidad de datos, siendo tres pluviométricas y una limnimétrica a lo largo de toda la superficie de la cuenca del Machángara.

A continuación, se muestra un mapa de las estaciones tomadas en cuenta para las modelaciones:

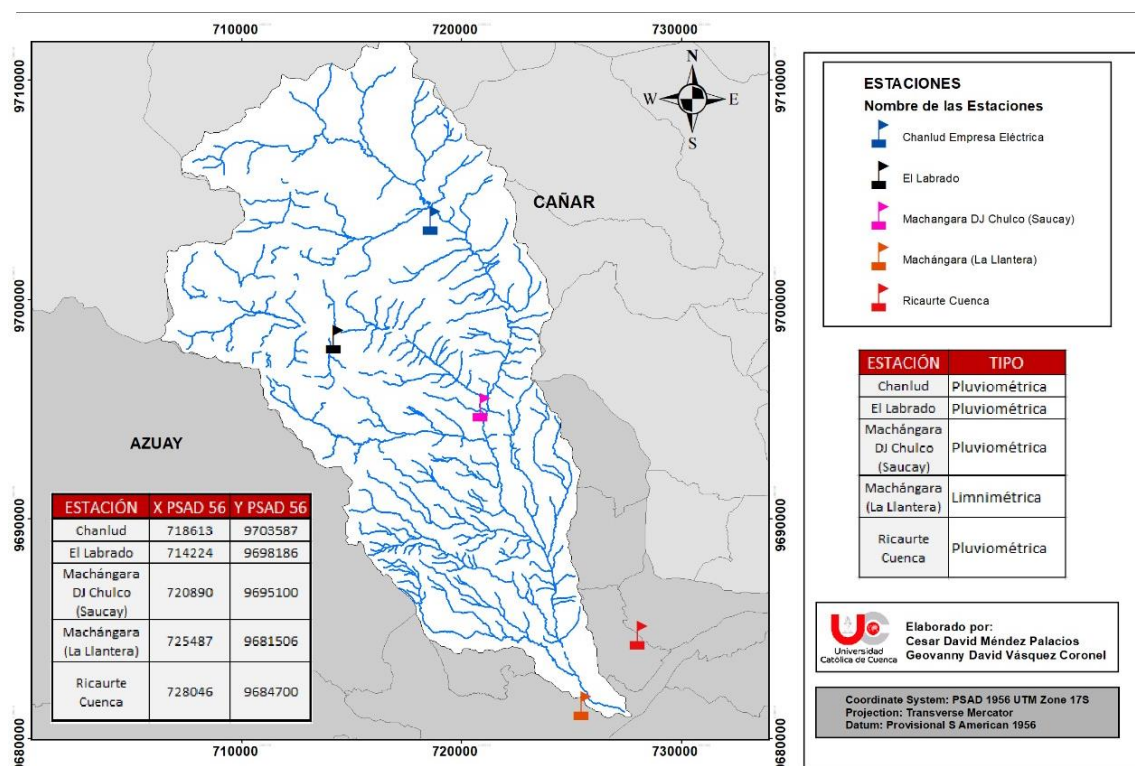


Ilustración 14: Estaciones hidrometeorológicas en la cuenca del Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo 17.

Los registros de caudal en el punto de interés de la cuenca, facilitara la calibración del modelo, permitiendo la comparación de lo calculado con lo observado.

Para seleccionar los hietogramas involucrados en la modelación, es necesario cotejar la información de las estaciones pluviométricas, de modo que existan datos de lluvia en la misma fecha en todas las estaciones involucradas.

En este caso, el hidrograma seleccionado para la calibración del modelo toma la fecha del 14 de septiembre del año 2016 hasta el 15 de septiembre del mismo año, el cual se muestra a continuación:

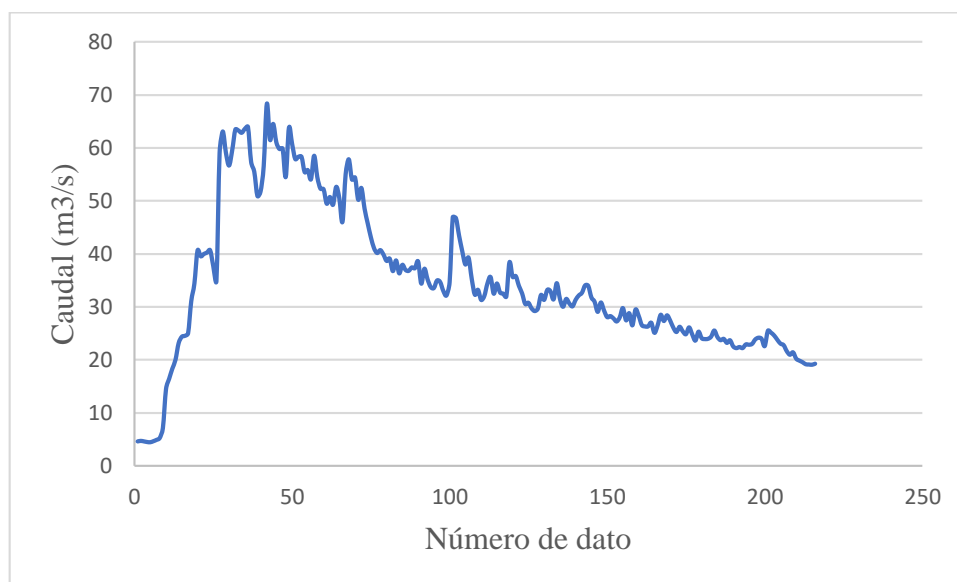


Ilustración 15: Hidrograma estación Llantera.

Elaborado por: Autores.

De acuerdo con la ilustración 15, se denota un caudal máximo de 70 m³/s aproximadamente, en donde se mantiene la intensidad hasta alcanzar un caudal de 50 m³/s, esto en cuanto a los valores registrados en la estación de la Llantera, ubicada en la parte baja de la cuenca del Machángara.

Por otro lado, el hietograma que ha generado el caudal descrito anteriormente, inicia unos días antes del pico, en este caso, siendo su inicio, el 11 septiembre del 2016 hasta el 16 de septiembre del 2016.

Estos datos se han tomado de cada una de las estaciones vistas anteriormente en la ilustración 14, las cuales han registrado los valores de precipitación en las fechas mencionadas, las mismas que se encuentran distribuidas en la parte alta, media y baja de la cuenca hidrográfica de estudio.

Los hietogramas tomados de cada estación mencionada, son los siguientes:

- Estación Chanlud:

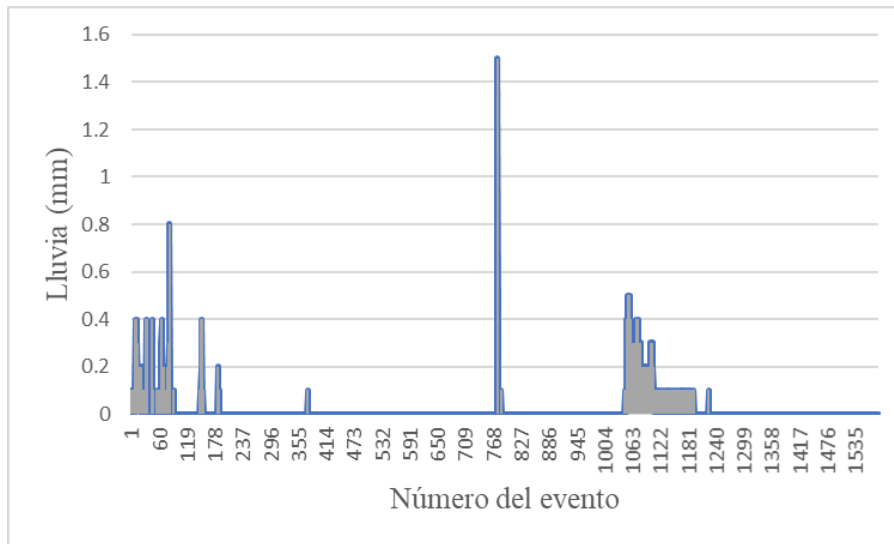


Ilustración 16: Hietograma Chanlud, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016.

Elaborado por: Autores.

En cuanto a los registros de la estación de Chanlud, se puede evidenciar un inicio de lluvia que alcanza un máximo de 0.8 mm. Luego, se mantiene sin eventos de precipitación hasta que repentinamente se suscitan 1.5 mm. Finalmente, el evento disminuye al tomar valores de 0.6 mm hasta convertirse en 0 mm, dentro de la fecha de análisis de la tormenta.

- Estación Chulco:

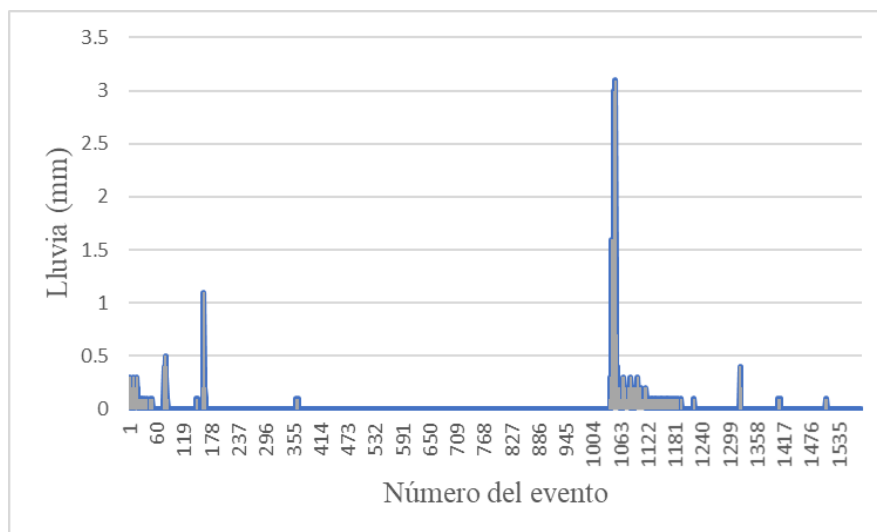


Ilustración 17: Hietograma Chulco, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016.

Elaborado por: Autores.

Mientras tanto en la estación Chulco, se registran pequeñas lloviznas en el inicio de la fecha de análisis, incrementándose súbitamente a 3 mm, casi a finales del tiempo de estudio y, reduciéndose desde 0.5 mm de precipitación hasta volverse 0 mm.

- Estación Labrados:

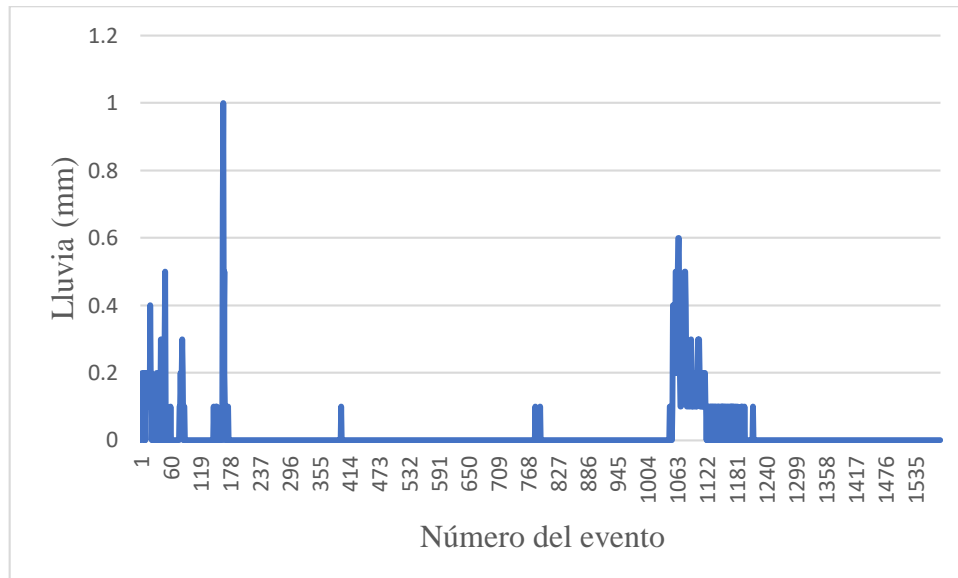


Ilustración 18: Hietograma Labrados, fecha del 11 al 16 de septiembre 2016.

Elaborado por: Autores.

Por otro lado, en la estación de Labrados, si se relacionan los eventos de lluvia de acuerdo con las demás estaciones, teniendo picos considerables de 1 mm, 0.6 mm y 0.5 mm, por lo que se encuentra una mejor distribución de las precipitaciones en esta sección de la cuenca hidrográfica.

3.2 Modelación Hidrológica Hec-Hms

La metodología adoptada para la generación del modelo hidrológico, se basa en el análisis de un evento crítico que ha generado un hidrograma de crecida significativo que, a su vez, ha tenido repercusiones en los cauces de salida de la cuenca hidrográfica, de modo que, posteriormente, se logre una calibración y validación basadas en la obtención del comportamiento de la cuenca frente a dicho evento crítico.

Vale recalcar que este método ha sido utilizado con anterioridad en el proyecto: “Relámpago, Hydrometeorology Component: Land Surface controls on heavy precipitation and flooding in the Carcarañá River Basin, Argentina. Source of Support: NSF. Director de la componente argentina de este proyecto: C.M. García.”; el mismo que se demuestra en el trabajo de López (2018) “Modelación Hidrológica e Hidráulica requeridas durante eventos extremos”.

Adicionalmente, el estudio de Mylenne (2018) correspondiente al tema “Modelo Hidrológico de la cuenca Catamayo-Chira hasta el ingreso al reservorio Poechos usando Hec-Hms”, utiliza el procedimiento descrito en el presente trabajo de titulación, correspondiente a una simulación por eventos críticos para su calibración y validación.

Continuamente, al ingresar cada uno de los parámetros encontrados a lo largo de cada proceso, siendo estos: fisiográficos, hidrológicos, geológicos, etc; queda definido el modelo hidrológico de la siguiente manera:

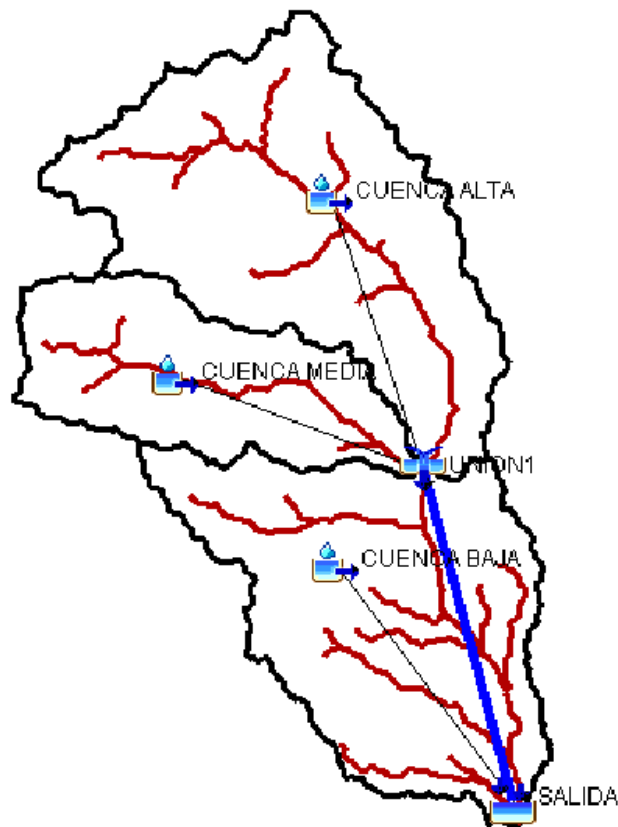


Ilustración 19: Modelo hidrológico de la cuenca del Machángara.

Elaborado por: Autores

En donde, se ha utilizado el método de pérdida SCS Curve Number para lo cual, se introducen los números de curva en condiciones húmedas de la cuenca hidrográfica. También, para la transformación de lluvia escurrentía se ocupará el método SCS Unit Hydrograph, cuyo condicionante es el tiempo de retraso, que no es más que $0.6 \cdot T_c$, donde T_c hace referencia al tiempo de concentración de cada microcuenca. Del mismo modo, para el flujo base se ha considerado el método de constante mensual, esto debido a los embalses presentes en la cuenca alta-media que generan laminación de flujo base, calculado anteriormente de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ en total entre las dos represas de Chanlud y Labrados.

Para tránsito de avenidas se ha utilizado el método de Muskingum, cuyas variables determinantes son X y K , las mismas que se encuentran en el apartado 1.2.4 de este estudio, en base a la pendiente de la cuenca. Cabe recalcar que, cada uno de estos métodos fueron seleccionados en base a la disponibilidad de los datos.

Ingresando cada uno de los valores calculados en los capítulos anteriores, se obtienen los siguientes resultados:

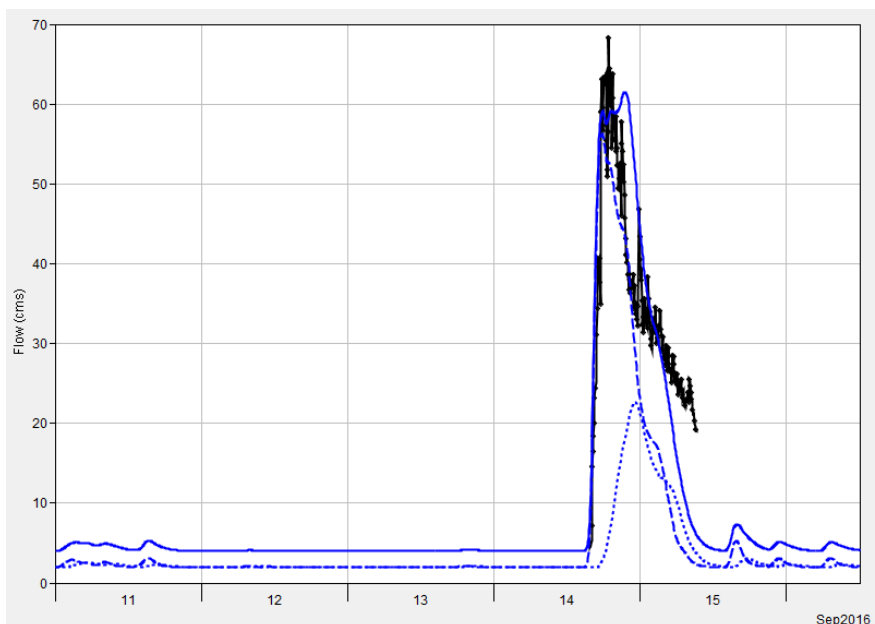


Ilustración 20: Gráfica resultado de la primera simulación HEC-HMS.

Elaborado por: Autores.

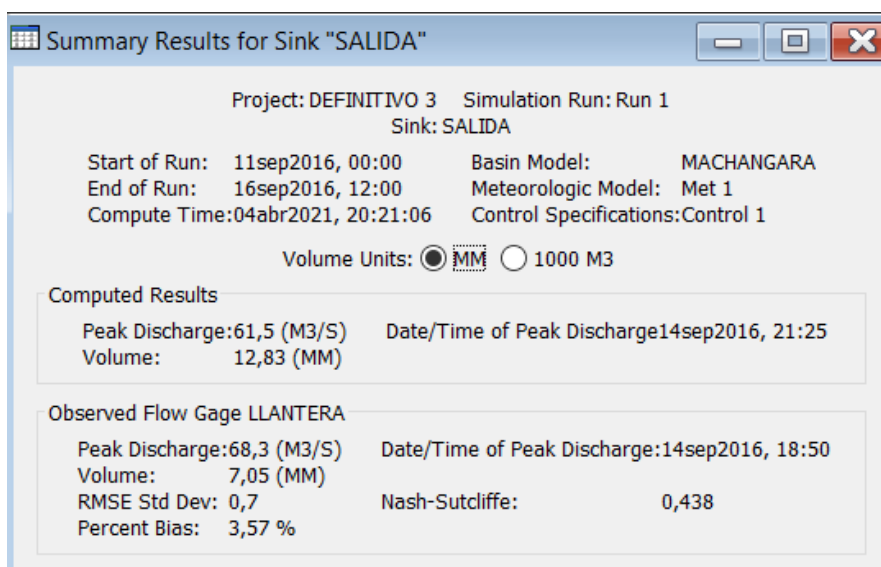


Ilustración 21: Resultado caudal pico, primera simulación HEC-HMS.

Elaborado por: Autores.

Como se observa, los resultados calculados de caudal de 61.5 m³/s, en comparación con los observados de 68.3 m³/s a la salida de la cuenca, no se tiene mayor diferencia, lo cual indica una correcta asimilación y cálculo de los parámetros de entrada y, también una selección adecuada de los métodos. Sin embargo, es necesario calibrar el

modelo para que la curva del hidrograma calculado, se ajuste de mejor manera a los valores observados en la estación de la Llantera, ubicada cerca del punto de interés.

3.3 Preparación de los datos para la calibración y validación de los datos

Como se mencionó anteriormente, el valor del caudal calculado inicial es de 61.5 m³/s, a diferencia del caudal observado de 68.3 m³/s, para la calibración del modelo, se ha visto la necesidad de realizar un proceso previo inicial de preparación de los valores de caudal obtenidos, variando los parámetros de número de curva, porcentaje de impermeabilidad y el tiempo de retraso de la cuenca, con el fin de acercar los valores de caudal pico calculados, con el comportamiento observado, permitiendo así, una aproximación de las variables de simulación, al proceder real de respuesta de la cuenca hidrográfica de estudio.

Para ello, se realizará una comparación entre los caudales obtenidos y los calculados, computando un porcentaje de error que no deberá ser mayor al 1%.

Tabla 22: Tabla comparativa de caudal observado y caudal calculado.

Elaborado por: Autores.

CN promedio	Lag time prom (min)	% imper	Caudal Calculado	Caudal observado	% de error
79	54	0	61.5	68.3	9.95607
79.5	54	1.33	65.9	68.3	3.5139
79.7	52.33	1.33	66.6	68.3	2.48901
79.8	52.33	1.33	67.6	68.3	1.0248

Con un valor promedio de número de curva de 79.8, un porcentaje de impermeabilización promedio de 1.33% y un tiempo de retraso promedio de 52.33 minutos, se ha logrado un error del 1%, por lo que, en cuestión caudal, el modelo se encuentra en condiciones aceptables para proceder a una calibración de ajuste y distribución de los datos, con el fin de manejar un funcionamiento idóneo del comportamiento de la simulación.

3.4 Calibración y validación de los datos

Continuamente y, en base al procedimiento anterior de preparación de los datos, se puede dar paso a una calibración y ajuste de bondad del sistema, mediante cálculos estadísticos que faciliten la visualización correcta de la distribución del conjunto de datos, objeto de comparación.

De acuerdo con los valores por serie de tiempo obtenidos de caudal calculado y caudal observado, así como de la aplicación de conceptos estadísticos, se puede obtener el error medio absoluto, el cual debe ser mayor o igual que cero, cumpliendo esta condición

Tabla 23: Error medio absoluto.

ERROR MEDIO ABSOLUTO	6.088767123
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i }{n}$	$0 \leq MAE$

De la misma manera, se procede al cálculo del error medio relativo cuadrado, en donde es preciso conocer la media aritmética o promedio de los datos y la aplicación de la formulación respectiva, cuya relación debe ser mayor o igual a cero

Tabla 24: Error medio relativo cuadrado.

ERROR MEDIO RELATIVO CUADRADO (RRMSE)	
Media Aritmética	34.7483871
Operación 1	9.177572425
Operación 2	0.26
RRMSE	0.26
$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} * \frac{1}{\bar{O}}$	
$0 \leq RRMSE$	

A continuación, en el cálculo del coeficiente de eficiencia, la relación que debe cumplir es que: el coeficiente debe ser mayor a – infinito y menor que uno:

Tabla 25: Coeficiente de eficiencia.

COEFICIENTE DE EFICIENCIA (EF2)	
$EF_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	
Operación 1	0.138835694
EF2	0.861164306
$-\infty < EF_2 \leq 1$	

Finalmente, para el coeficiente de correlación de los datos de caudal calculado y caudal observado, se debe cumplir una correlación positiva alta cercana a uno:

Tabla 26: Correlación de los datos.

Coeficiente de Correlación	
R	0.861978468
Correlación positiva alta	
R2	0.74301

Como se puede evidenciar, al obtener un R2 de 0.74, se puede comprobar el buen comportamiento del modelo hidrológico, respecto a lo observado, puesto que la tendencia de los datos calculados con los valores observados en la estación, son similares.

Para mayor veracidad de la distribución de los datos, se han introducido los valores calibrados al software de análisis estadístico “R”, en donde se han designado ciertas variables estadísticas que permiten conocer el comportamiento de los datos simulados, en función de parámetros observados, algunas de ellas son:

RSD: Ratio of Standard Desviations, este parámetro muestra la magnitud de variación de los datos y algunas de las veces es expresado como porcentaje, puede ser definido como el radio de la desviación estándar.

NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency, es capaz de determinar la magnitud relativa con la que, de lo sobrante de la varianza en comparación con los datos calculados, indica cuan lineal es la tendencia de la dispersión de los datos.

R y R2: Son parámetros que verifican cuan certera puede llegar a ser una predicción de datos, siendo estos datos los más relevantes del análisis estadístico de este proyecto, de modo que, si R y R2 son más cercanos a 1, se tiene una mejor predicción de los valores.

A continuación, se muestran los resultados de los procesos realizados por el programa computacional “R”:

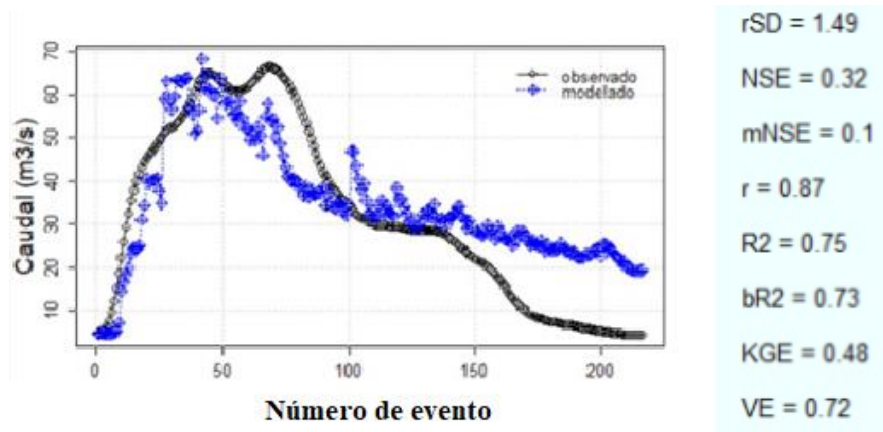


Ilustración 22: Parámetros estadísticos para validación del Modelo Hidrológico.

Elaborado por: Autores.

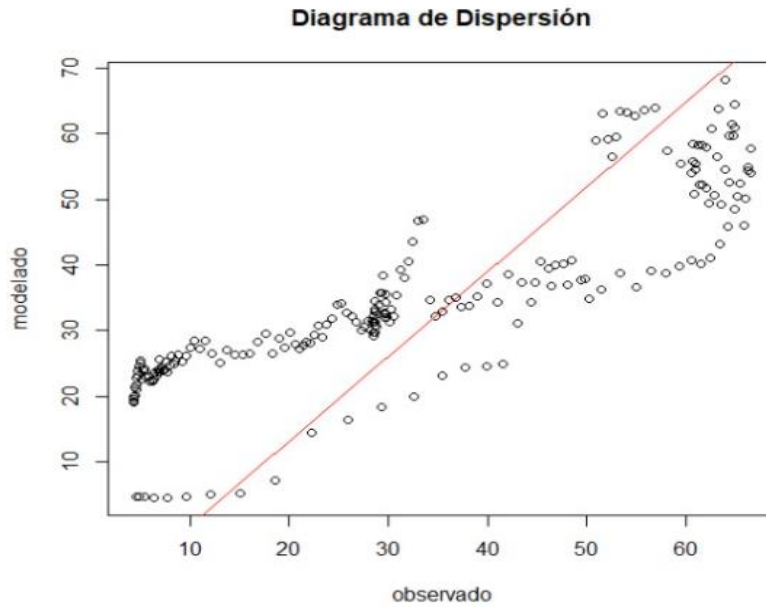


Ilustración 23: Grafica de dispersión de los valores calculados en función de los datos observados.

Elaborado por: Autores.

De acuerdo con lo detallado, se puede observar una distribución y tendencia de los datos suficientes para los fines de este proyecto, además de mediciones de predicción adecuadas para un análisis con periodos de retorno, ya que se calcula un R^2 de 0.75 y un R de 0.87. A pesar de haber obtenido un coeficiente de Nash relativamente bajo, correspondiente a 0.32, el modelo hidrológico de la cuenca del Machángara se da por válido, debido a que, el análisis se ha desarrollado para un evento de condiciones críticas, siendo estos parámetros obtenidos, aptos para esta investigación.

3.5 Tormentas de Diseño

Para el cálculo de las tormentas de diseño que serán ingresadas al modelo hidrológico validado, se ha utilizado los datos registrados anualmente por las estaciones pluviométricas, además del procedimiento para la obtención de las curvas de intensidad, duración y frecuencia que, a su vez, permiten el cálculo de los hietogramas de la lluvia de diseño.

3.5.1 Cálculo de eventos máximos anuales de precipitación

Se procede a obtener las precipitaciones máximas presentadas anualmente para cada una de las estaciones pluviométricas, en conformidad con la disponibilidad de los datos registrados.

Para la estación de Chulco, se han logrado obtener datos de lluvia desde el año 2002, hasta el 2018, con un número de datos de 17; del mismo modo para la estación de Labrados, se registran datos a partir del año 1970 hasta el 2018 dando un total de 48 valores y, finalmente para la estación de Chanlud se cuentan con datos desde 1998 hasta el 2018, siendo 21 datos de lluvia.

Tabla 27: Eventos máximos anuales, estación Chulco.

CHULCO			
Año	Precipitación	Año	Precipitación
2002	34	2011	32.6
2003	31.5	2012	33.2
2004	32	2013	28
2005	34.5	2014	33.9
2006	27	2015	29.8
2007	34.2	2016	31
2008	36.1	2017	30.8
2009	29.3	2018	29.8
2010	28		

En la estación Chulco, se han logrado obtener datos de precipitación máxima anual desde el año 2002, hasta el año 2018, sumando un total de 17 años, lo cual es suficiente para lograr estimar un caudal con un tiempo de retorno de hasta 100 años.

Tabla 28: Eventos máximos anuales, estación Labrados.

LABRADOS			
Año	Precipitación	Año	Precipitación
1970	23.6	1981	39
1971	26.4	1982	40.4
1972	29.1	1983	25.4
1973	24.5	1984	43.4
1975	36.7	1985	34.1
1976	28.4	1986	30.7
1977	30.3	1987	24.2
1978	21.4	1988	33.5
1979	29.4	1989	34.1
1980	23.7	1990	25.3

Año	Precipitación	Año	Precipitación	Año	Precipitación
1991	33.4	2001	42.2	2011	27.7
1992	22.7	2002	35.2	2012	35
1993	34.3	2003	21	2013	32.95
1994	32.4	2004	26	2014	28
1995	47.4	2005	42.1	2015	37
1996	44.6	2006	32.3	2016	28.5
1997	33.6	2007	29.2	2017	31.3
1998	43.2	2008	36.2	2018	37.6
1999	45.15	2009	37.6		
2000	41.5	2010	23		

En cuanto a la estación de Labrados, se ha logrado obtener mayor cantidad de datos de lluvia máxima anual, siendo desde el año de 1970, hasta el 2018, lo cual favorece a una distribución de datos más acertada ya que se posee un registro de 48 años. De este modo, se puede sin ningún problema, calcular un caudal con un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 29: Eventos máximos anuales, estación Chanlud.

CHANLUD			
Año	Precipitación	Año	Precipitación
1998	30.7	2009	26.3
1999	28.6	2010	32.1
2000	42.5	2011	31
2001	29.9	2012	33
2002	20.28	2013	29
2003	27.2	2014	33.5
2004	34.6	2015	33.5
2005	38.5	2016	29.5
2006	26	2017	43.1
2007	41	2018	31.7
2008	29.5		

Finalmente, en la estación Chanlud, se han obtenido datos a partir del año 1998, hasta el 2018, haciendo un total de 21 años, lo cual es de igual manera, favorable para los

objetivos de este trabajo ya que, así mismo, se podría ponderar un caudal de retorno de 100 años.

3.5.2 Distribución de Gumbel

Este concepto hace referencia a una distribución de valores extremos, formulada por Gumbel (1954), que obedece a una distribución logarítmica normal, para lo cual el valor extremo, se calcula por medio de las siguientes ecuaciones y tablas:

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) * \alpha + \mu \quad [3.1]$$

$$P = \frac{1}{T} \quad [3.2]$$

Tabla 30: Tabla de Gumbel.

Fuente: Ven te Chow (1994).

n° de Datos	y	σy
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5484	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.56	1.2065

Donde:

- X: Precipitación en el periodo de retorno (mm).

- $F(x)$: Es la diferencia de la unidad y la probabilidad de ocurrencia.
- Ecuación 22: $\alpha = \frac{sx}{\sigma y}$, siendo sx la desviación estándar de los datos y σy un parámetro obtenido de la tabla.
- Ecuación 23: $u = \chi - uy * \alpha$, siendo χ la media y μy un parámetro obtenido de la tabla.
- P: Probabilidad de ocurrencia.
- T: Periodo de retorno.

Así también, para el cálculo de la intensidad, correspondiente a cada periodo de retorno, se emplean las ecuaciones estipuladas por Estrella (2016) para cada estación:

Tabla 31: Ecuaciones de intensidad diaria para un periodo de retorno.

Fuente: Estrella (2016).

ESTACIÓN	DURACIÓN	ECUACIÓN
Chulco	5<30	$ITR=59,478*IdTR*t^{(-0,1597)}$
	10<120	$ITR=485,443*IdTR*t^{(-0,7796)}$
	120<1440	$ITR=1136,794*IdTR*t^{(-0,9692)}$
Labrados	5<30	$ITR=36,639*IdTR*t^{(-0,2840)}$
	10<120	$ITR=115,372*IdTR*t^{(-0,6174)}$
	120<1440	$ITR=194,610*IdTR*t^{(-0,7249)}$
Chanlud	5<30	$ITR=26,006*IdTR*t^{(-0,3303)}$
	10<120	$ITR=36,398*IdTR*t^{(-0,4537)}$
	120<1440	$ITR=78,541*IdTR*t^{(-0,6013)}$

Para el análisis de los datos correspondientes a las estaciones de la cuenca del Machángara, se obtienen los siguientes valores:

- **Estación Chulco**

Tabla 32: Parámetros de distribución Gumbel, estación Chulco.

DATOS	
MEDIA (X)	31.5117647
DESVEST (S)	2.62104043
N	17
ΘY	1.03748
UY	0.51712
α	2.52635273
u	30.2053372

Tabla 33: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Chulco.

PERIODO(T)	Estadísticos		Precipitación	
AÑOS	F(X)	P	X (mm)	IdTR(mm/h)
2	0.5	0.5	31.13	1.297
5	0.8	0.2	33.99	1.416
10	0.9	0.1	35.89	1.495
25	0.96	0.04	38.29	1.595
50	0.98	0.02	40.06	1.669
100	0.99	0.01	41.83	1.743
500	0.998	0.002	45.90	1.913

Tabla 34: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Chulco.

CURVAS IDF	DURACIÓN								
	TR	30	60	90	120	155	180	240	360
2	44.42	25.87	18.86	14.24	11.11	9.61	7.27	4.91	
5	48.50	28.25	20.60	15.55	12.13	10.50	7.94	5.36	
10	51.21	29.83	21.75	16.42	12.81	11.08	8.39	5.66	
25	54.63	31.82	23.20	17.51	13.67	11.82	8.95	6.04	
50	57.16	33.30	24.27	18.33	14.30	12.37	9.36	6.32	
100	59.68	34.76	25.34	19.13	14.93	12.92	9.77	6.60	
500	65.49	38.15	27.81	21.00	16.38	14.17	10.73	7.24	

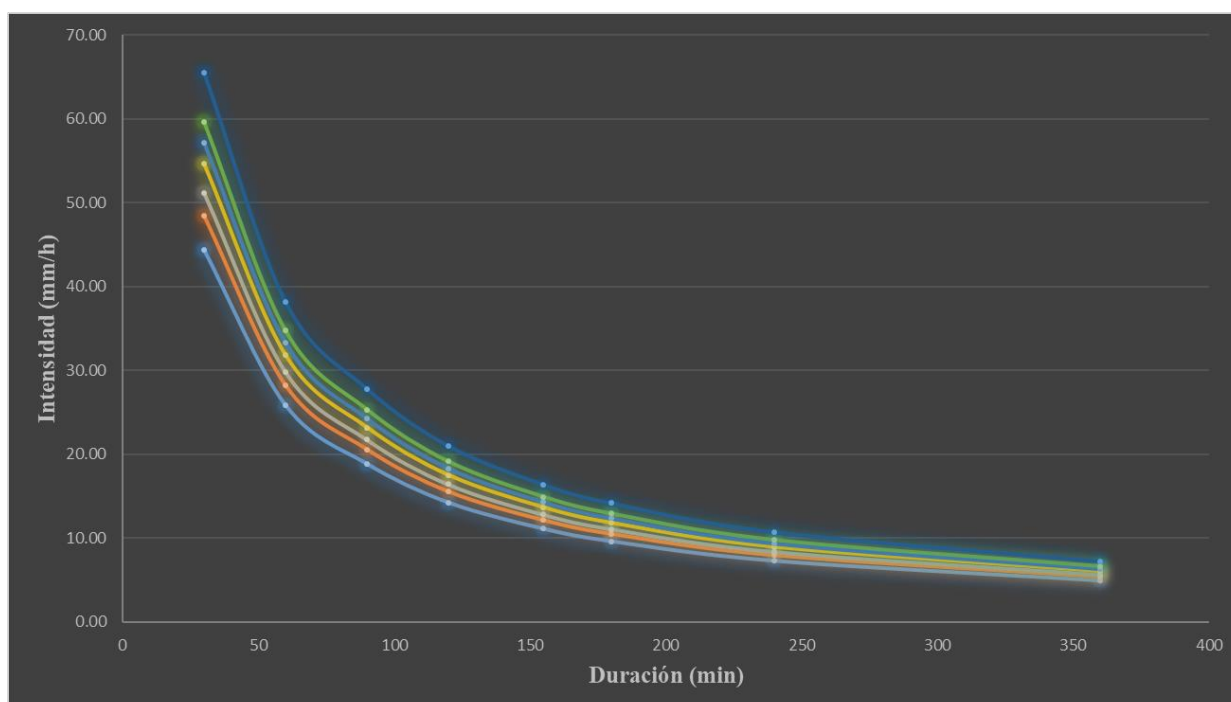


Ilustración 24: Curvas IDF, estación Chulco.

A través de los procesos calculados en las ilustraciones 45,46 y 47; se ha logrado obtener las curvas de intensidad duración y frecuencia para la estación Chulco, lo cual permite a su vez conocer el comportamiento de las lluvias, prediciendo patrones de conductas de precipitación con una determinada probabilidad de periodo de retorno, los mismos que se han designado en la obtención de las curvas IDF: 2, 5,10,25,50,100 y 500 años respectivamente con duraciones de 30, 60, 90,120, 155, 180, 240 y 360 minutos. De este modo, se ha obtenido las siguientes intensidades:

- ✓ Para un periodo de retorno de 25 años y duración de 155 minutos, se genera una intensidad de 13.67.
- ✓ Para un periodo de retorno de 50 años con duración de 155 minutos, se presenta una intensidad de 14.30.
- ✓ Para un periodo de retorno de 100 años y duración de 155 minutos, se origina una intensidad de 14.93.

- **Estación Labrados**

Tabla 35: Parámetros de distribución Gumbel, estación Labrados.

DATOS	
MEDIA (X)	32.49148936
DESVEST (S)	7.020299132
N	48
ΘY	1.15714
UY	0.54762
α	6.066940156
u	29.16911159

Tabla 36: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Labrados.

PERIODO(T)	Estadísticos		Precipitación	
	AÑOS	F(X)	P	X (mm)
2	0.5	0.5	31.39	1.308
5	0.8	0.2	38.27	1.595
10	0.9	0.1	42.82	1.784
25	0.96	0.04	48.57	2.024
50	0.98	0.02	52.84	2.202
100	0.99	0.01	57.08	2.378
500	0.998	0.002	66.87	2.786

Tabla 37: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Labrados.

TR	DURACIÓN							
	30	60	90	120	156	180	240	360
2	18.48	12.05	9.38	7.92	6.55	5.90	4.79	3.57
5	22.53	14.69	11.43	9.65	7.98	7.19	5.84	4.35
10	25.21	16.43	12.79	10.80	8.93	8.05	6.53	4.87
25	28.60	18.64	14.51	12.25	10.13	9.13	7.41	5.52
50	31.11	20.28	15.79	13.33	11.02	9.93	8.06	6.01
100	33.60	21.90	17.05	14.40	11.90	10.73	8.71	6.49
500	39.37	25.66	19.98	16.86	13.94	12.57	10.20	7.61

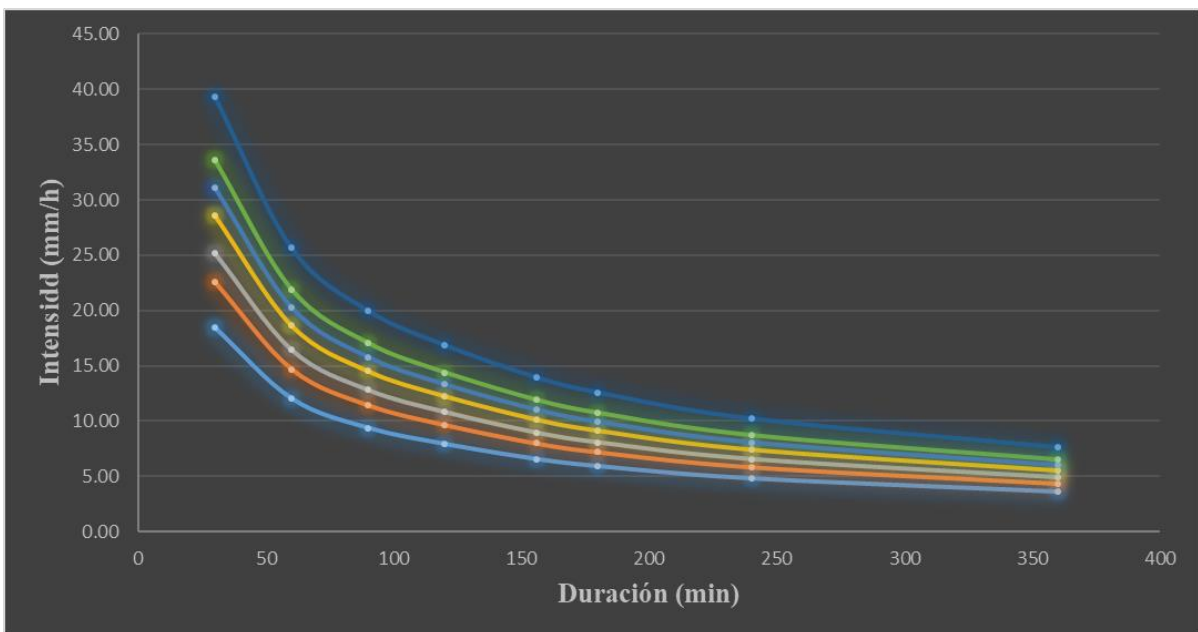


Ilustración 25: Curvas IDF, estación Labrados.

Al igual que en la estación anterior, para Labrados se ha realizado el mismo procedimiento, para lo cual se ha calculado lo siguiente:

- ✓ Para un periodo de retorno de 25 años y, así mismo una duración de 155 minutos, se calcula una intensidad de 10.13.
- ✓ Para un periodo de retorno de 50 años, con una duración de 155 minutos, se obtiene una intensidad de 11.02.
- ✓ Para un periodo de retorno de 100 años y duración de 155 minutos, se origina una intensidad de 11.90.

- **Estación Chanlud**

Tabla 38: Parámetros de distribución Gumbel, estación Chanlud.

DATOS	
MEDIA (X)	31.9752381
DESVEST (S)	5.648475563
N	21
ΘY	1.06852
UY	0.52506
α	5.286260962
u	29.19963391

Tabla 39: Precipitación e intensidad diaria para diferentes periodos de retorno, estación Chanlud.

PERIODO(T)	Estadísticos		Precipitación	
	AÑOS	F(X)	P	X (mm)
2	0.5	0.50	31.14	1.297
5	0.8	0.20	37.13	1.547
10	0.9	0.10	41.10	1.712
25	0.96	0.04	46.11	1.921
50	0.98	0.02	49.83	2.076
100	0.99	0.01	53.52	2.230
500	0.998	0.00	62.05	2.585

Tabla 40: Tabla de intensidad, duración y frecuencia, estación Chanlud.

TR	DURACIÓN							
	30	60	90	120	155	180	240	360
2	10.09	7.37	6.13	5.73	4.91	4.49	3.78	2.96
5	12.03	8.79	7.31	6.83	5.86	5.35	4.50	3.53
10	13.32	9.73	8.09	7.56	6.48	5.92	4.98	3.90
25	14.94	10.91	9.08	8.48	7.27	6.65	5.59	4.38
50	16.15	11.79	9.81	9.16	7.86	7.18	6.04	4.73
100	17.35	12.67	10.54	9.84	8.44	7.71	6.49	5.08
500	20.11	14.68	12.22	11.41	9.78	8.94	7.52	5.90

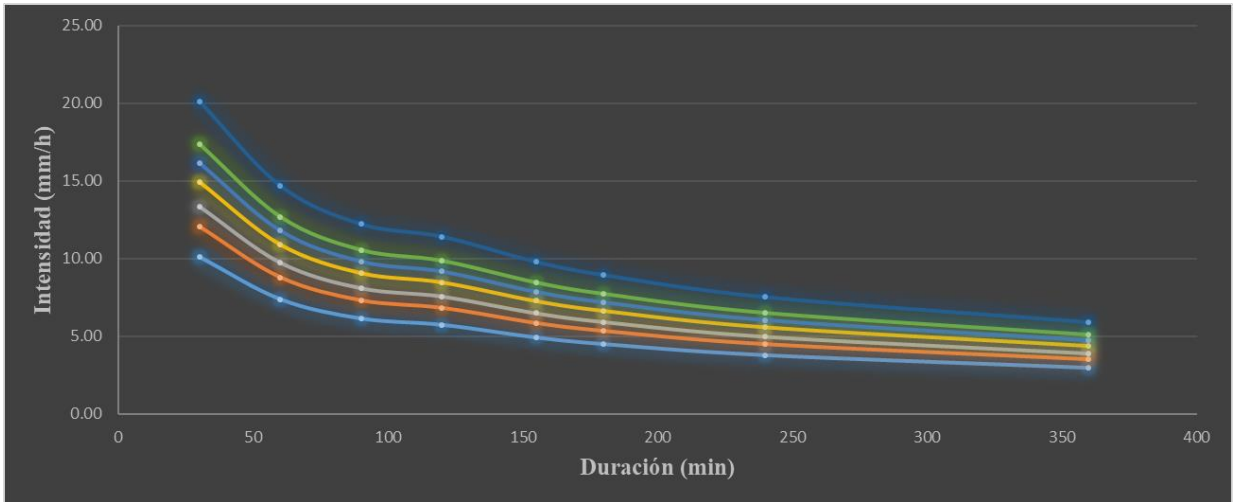


Ilustración 26: Curvas IDF, estación Chanlud.

Finalmente, para la estación de Chanlud, se ha descrito el mismo procedimiento que se utilizó para las estaciones anteriores, dando como resultado lo siguiente:

- ✓ Para un periodo de retorno de 25 años y duración de 155 minutos, se ha obtenido una intensidad de 7.27
- ✓ Para un periodo de retorno de 50 años con duración de 155 minutos, se ha originado una intensidad de 7.86.
- ✓ Para un periodo de retorno de 100 años y duración de 155 minutos, se ha calculado una intensidad de 8.44.

3.5.3 Tormentas de diseño para cada estación y periodo de retorno

Para la obtención de la lluvia de diseño, se ha empleado el método de los bloques alternos, que consiste en desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia, el cual especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración sobre una duración total.

De esta manera, quedan definidas las tormentas de diseño, con sus respectivos hietogramas para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años:

- Estación Chulco:

Tabla 41: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Chulco.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 25 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	65.7	10.95	10.95	0_10	0.62
20	58.8	19.60	8.65	10_20	0.70
30	54.6	27.31	7.71	20-30	0.82
40	43.7	29.10	1.79	30-40	0.98
50	36.7	30.57	1.47	40-50	1.25
60	31.8	31.82	1.25	50-60	1.79
70	28.2	32.92	1.10	60-70	8.65
80	25.4	33.90	0.98	70-80	10.95
90	23.2	34.80	0.89	80-90	7.71
100	21.4	35.61	0.82	90-100	1.47
110	19.8	36.37	0.76	100-110	1.10
120	18.5	37.07	0.70	110-120	0.89
130	17.4	37.73	0.66	120-130	0.76
140	16.4	38.35	0.62	130-140	0.66
150	15.6	38.94	0.59	140-150	0.59
155	15.2	39.23	0.28	150-55	0.28

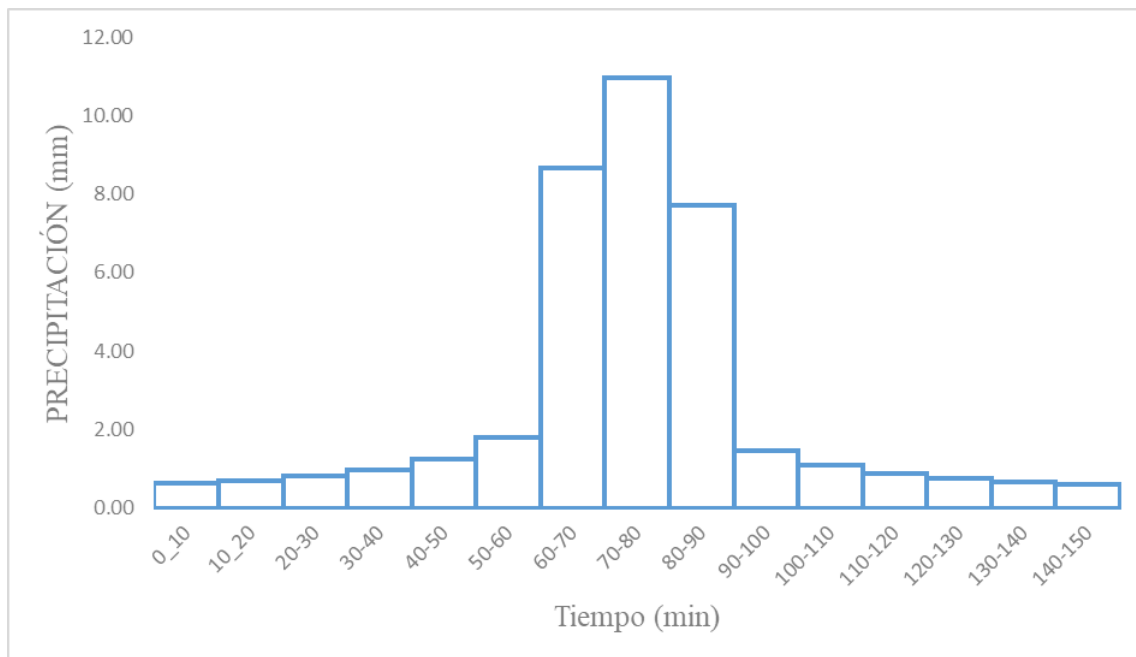


Ilustración 27: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 25 años.

Como se visualiza en la ilustración 56, para efectos de esta investigación, en un periodo de retorno de 25 años de la estación de Chulco, la duración de la lluvia es de 155 minutos, en base al tiempo de concentración de la cuenca, lo cual genera una lluvia de diseño de 39.23 mm, la misma que ha sido subdividida en intervalos de 10 minutos, como se evidencia en la ilustración 57, a través del método de los bloques alternos. De este modo, se obtiene el pico de la tormenta de 10.97 mm en la duración de 70-80 minutos.

Tabla 42: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Chulco.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	68.7	11.46	11.46	0_10	0.65
20	61.5	20.51	9.06	10_20	0.74
30	57.2	28.58	8.07	20-30	0.86
40	45.7	30.45	1.87	30-40	1.03
50	38.4	31.99	1.54	40-50	1.31
60	33.3	33.30	1.31	50-60	1.87
70	29.5	34.45	1.15	60-70	9.06
80	26.6	35.48	1.03	70-80	11.46
90	24.3	36.41	0.93	80-90	8.07
100	22.4	37.27	0.86	90-100	1.54
110	20.8	38.06	0.79	100-110	1.15
120	19.4	38.79	0.74	110-120	0.93
130	18.2	39.49	0.69	120-130	0.79
140	17.2	40.14	0.65	130-140	0.69
150	16.3	40.75	0.61	140-150	0.61
155	15.9	41.05	0.30	150-55	0.30

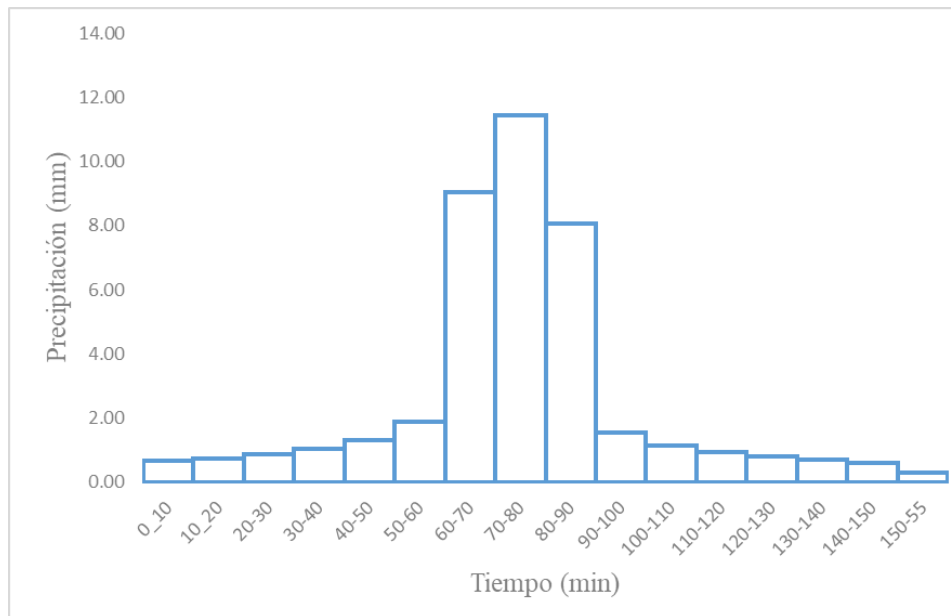


Ilustración 28: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 50 años.

De igual manera, para la misma estación Chulco, en un periodo de retorno de 50 años, se ha obtenido una precipitación de diseño de 41.05 mm, con lo cual, aplicando el método de bloques alternos, se ha subdividido la lluvia en intervalos de 10 minutos, registrándose un pico de 11.48 mm en el intervalo de 70-80 minutos.

Tabla 43: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Chulco.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 100 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	71.8	11.96	11.96	0_10	0.68
20	64.2	21.41	9.45	10_20	0.77
30	59.7	29.84	8.42	20_30	0.89
40	47.7	31.79	1.95	30_40	1.07
50	40.1	33.40	1.60	40_50	1.37
60	34.8	34.76	1.37	50_60	1.95
70	30.8	35.97	1.20	60_70	9.45
80	27.8	37.04	1.07	70_80	11.96
90	25.3	38.01	0.97	80_90	8.42
100	23.3	38.91	0.89	90_100	1.60
110	21.7	39.73	0.83	100_110	1.20
120	20.3	40.50	0.77	110_120	0.97
130	19.0	41.22	0.72	120_130	0.83
140	18.0	41.90	0.68	130_140	0.72
150	17.0	42.54	0.64	140_150	0.64
155	16.6	42.85	0.31	150_55	0.31

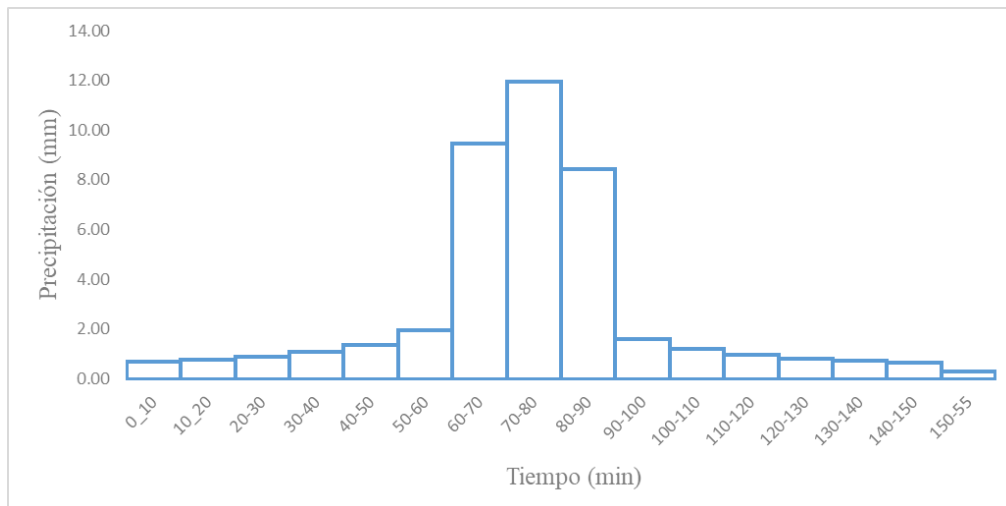


Ilustración 29: Hietograma de diseño, estación Chulco, periodo de retorno 100 años.

De acuerdo con la ilustración 58, para la estación Chulco en un periodo de retorno de 100 años, se ha calculado una tormenta de diseño de 42.85 mm, lo cual, al subdividir en intervalos de 10 minutos, de igual manera con el método de los bloques alternos, se obtiene un pico de 11.98 mm en el tiempo de 72-80 minutos, respectivamente.

La estación de Chulco, es de gran relevancia para el estudio ya que posee mayor peso, según su área de influencia, como se pudo observar en los polígonos de Thiessen, por lo que, al poseer valores de lluvia elevados, determinará el comportamiento hidrológico de la cuenca del Machángara.

- Estación Labrados:

Tabla 44: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Labrados.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 25 AÑOS					
Duración(min)	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	38.6	6.43	6.43	0_10	0.52
20	31.7	10.56	4.13	10_20	0.84
30	28.6	14.30	3.74	20-30	0.96
40	23.9	15.96	1.66	30-40	1.04
50	20.9	17.38	1.42	40-50	1.26
60	18.6	18.64	1.26	50-60	1.66
70	16.9	19.77	1.13	60-70	4.13
80	15.6	20.81	1.04	70-80	6.43
90	14.5	21.77	0.96	80-90	3.74
100	13.6	22.66	0.90	90-100	1.42
110	12.8	23.51	0.84	100-110	1.13
120	12.3	24.50	1.00	110-120	1.00
130	11.6	25.05	0.55	120-130	0.90
140	11.0	25.56	0.52	130-140	0.55
150	10.4	26.05	0.49	140-150	0.49
155	10.2	26.29	0.24	150-55	0.24

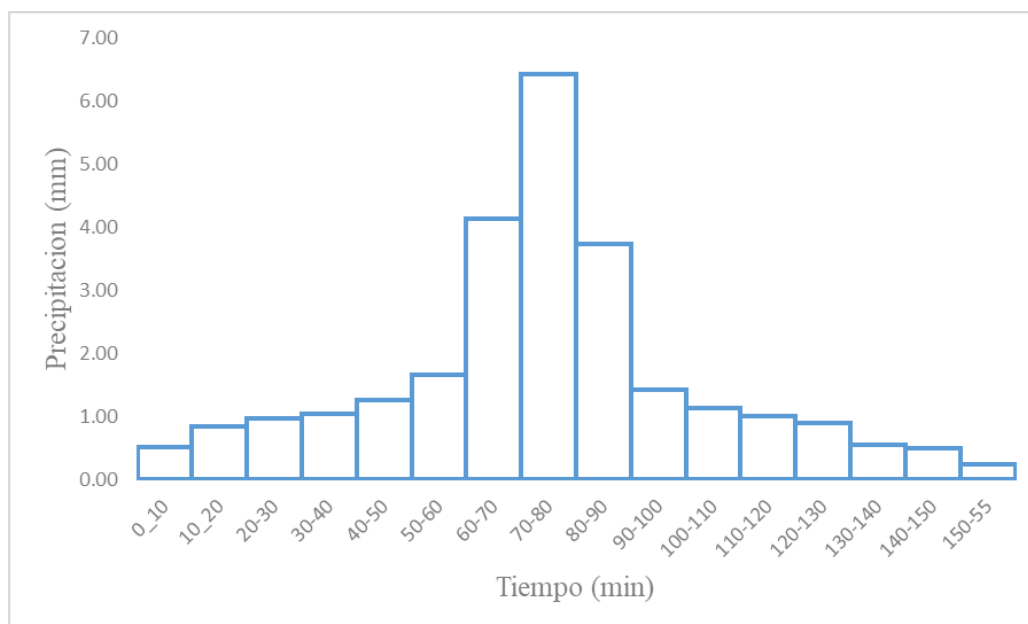


Ilustración 30: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 25 años.

En relación con la estación de Labrados, se ha mantenido el proceso para el cálculo de la tormenta de diseño y su posterior subdivisión en intervalos, por lo que se obtiene para un periodo de retorno de 25 años, de acuerdo con la ilustración 59, una lluvia de 26.29 mm. Esto genera, consecuentemente un pico intermedio de 6.44 mm, lo cual es relativamente bajo respecto a la estación Chulco, cuyos valores son más elevados.

Tabla 45: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Labrados. Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	41.9	6.99	6.99	0_10	0.59
20	34.5	11.48	4.49	10_20	0.92
30	31.1	15.55	4.07	20-30	1.04
40	26.0	17.36	1.81	30-40	1.13
50	22.7	18.91	1.55	40-50	1.37
60	20.3	20.28	1.37	50-60	1.81
70	18.4	21.51	1.23	60-70	4.49
80	17.0	22.64	1.13	70-80	6.99
90	15.8	23.68	1.04	80-90	4.07
100	14.8	24.66	0.97	90-100	1.55
110	13.9	25.57	0.92	100-110	1.23
120	13.3	26.65	1.08	110-120	1.08
130	12.6	27.25	0.59	120-130	0.97
140	11.9	27.81	0.56	130-140	0.56
150	11.3	28.34	0.53	140-150	0.53
155	11.1	28.60	0.26	150-55	0.26

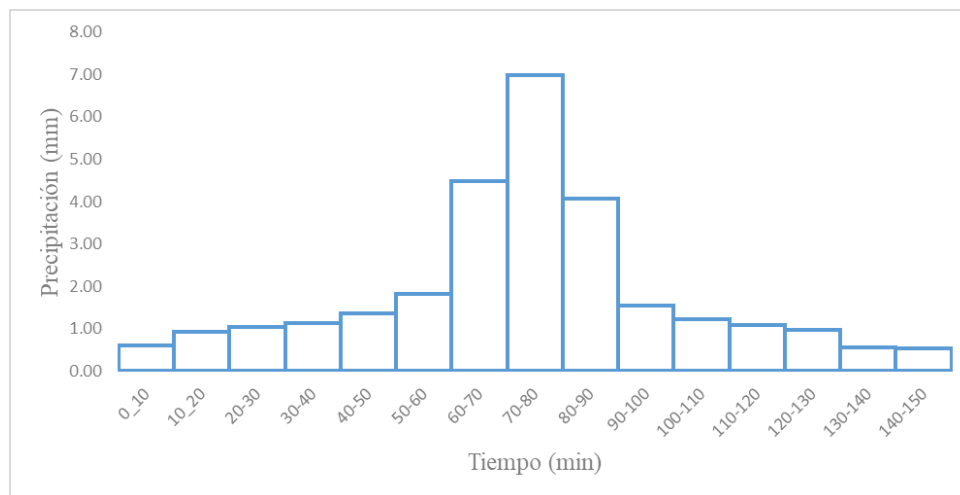


Ilustración 31: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 50 años.

De la misma manera, en la estación Labrados, para un periodo de retorno de 50 años, se obtiene una lluvia de diseño de 28.60 mm, la misma que al realizar la partición con el método de los bloques alternos, se produce el pico intermedio de 7.01 mm en el tiempo de 70-80 minutos.

Tabla 46: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Labrados.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 100 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	45.3	7.55	7.55	0_10	0.61
20	37.2	12.40	4.85	10_20	0.99
30	33.6	16.80	4.40	20-30	1.13
40	28.1	18.76	1.95	30-40	1.22
50	24.5	20.43	1.67	40-50	1.48
60	21.9	21.90	1.48	50-60	1.95
70	19.9	23.23	1.33	60-70	4.85
80	18.3	24.45	1.22	70-80	7.55
90	17.1	25.58	1.13	80-90	4.40
100	16.0	26.63	1.05	90-100	1.67
110	15.1	27.62	0.99	100-110	1.33
120	14.4	28.79	1.17	110-120	1.17
130	13.6	29.43	0.64	120-130	1.05
140	12.9	30.04	0.61	130-140	0.64
150	12.2	30.61	0.58	140-150	0.58
155	12.0	30.89	0.28	150-55	0.28

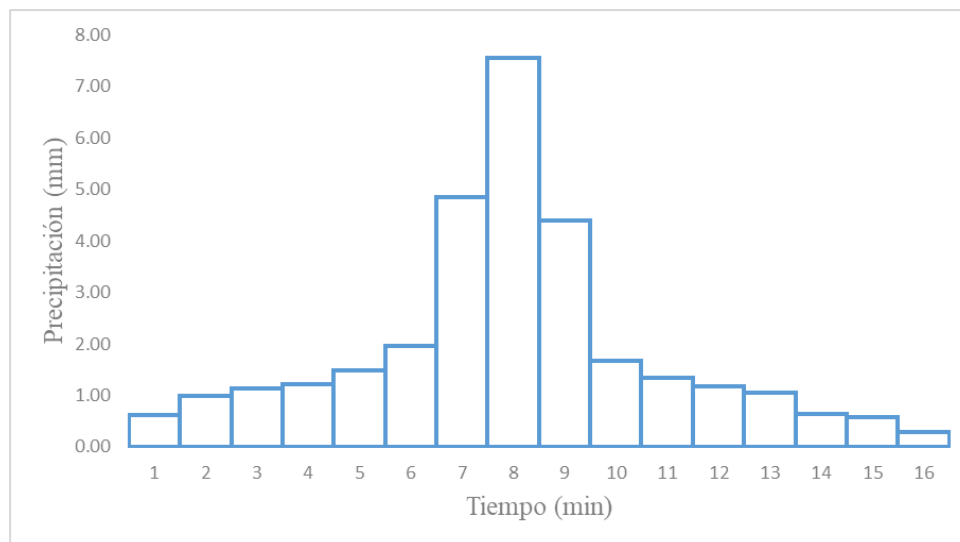


Ilustración 32: Hietograma de diseño, estación Labrados, periodo de retorno 100 años.

Continuamente, para el periodo de retorno de 100 años de la estación Labrados, se ha validado una tormenta de diseño de 30.89 mm, la misma que al dividirla en intervalos de 10 minutos, produce el pico intermedio de 7.52 mm.

- Estación Chanlud:

Tabla 47: Resumen de datos para un periodo de retorno de 25 años, estación Chanlud.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 25 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	23.4	3.89	3.89	0_10	0.53
20	18.6	6.19	2.30	10_20	0.77
30	14.9	7.47	1.28	20-30	0.85
40	13.1	8.74	1.27	30-40	0.96
50	11.9	9.88	1.13	40-50	1.13
60	10.9	10.91	1.03	50-60	1.28
70	10.2	11.87	0.96	60-70	2.30
80	9.6	12.77	0.90	70-80	3.89
90	9.1	13.62	0.85	80-90	1.77
100	8.7	14.42	0.81	90-100	1.27
110	8.3	15.20	0.77	100-110	1.03
120	8.5	16.96	1.77	110-120	0.90
130	8.1	17.51	0.55	120-130	0.81
140	7.7	18.04	0.53	130-140	0.55
150	7.4	18.54	0.50	140-150	0.50
155	7.3	18.78	0.24	150-55	0.24

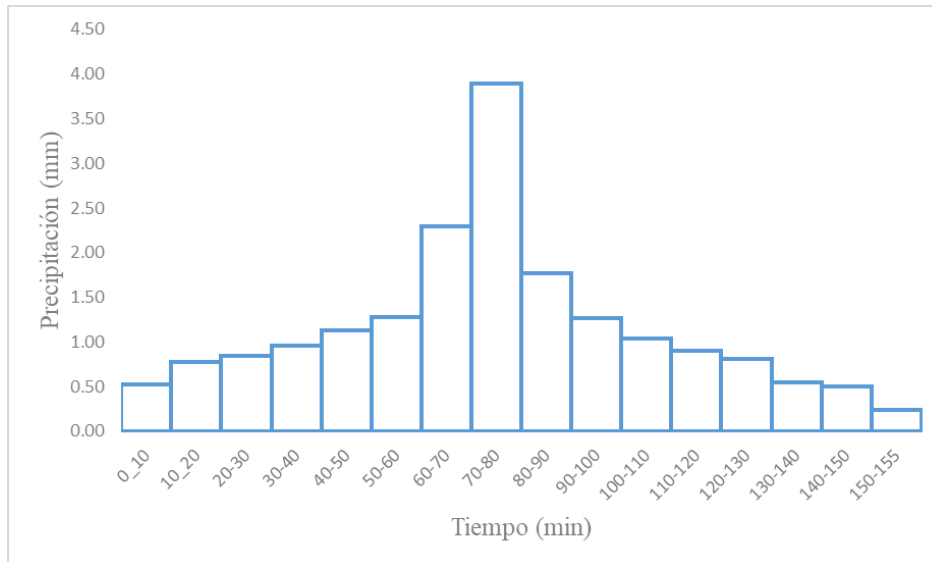


Ilustración 33: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 25 años.

Finalmente, para la estación de Chanlud, se ha obtenido, para un periodo de retorno de 25 años, una tormenta de diseño de 18.78 mm, la misma que genera un pico, al repartirla en intervalos de 10 minutos de 3.91 mm, siendo el menor de las tres estaciones.

Tabla 48: Resumen de datos para un periodo de retorno de 50 años, estación Chanlud.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	25.2	4.21	4.21	0_10	0.57
20	20.1	6.69	2.48	10_20	0.83
30	16.1	8.07	1.38	20-30	0.92
40	14.2	9.45	1.37	30-40	1.04
50	12.8	10.67	1.22	40-50	1.22
60	11.8	11.79	1.12	50-60	1.38
70	11.0	12.83	1.04	60-70	2.48
80	10.3	13.80	0.97	70-80	4.21
90	9.8	14.72	0.92	80-90	1.91
100	9.4	15.59	0.87	90-100	1.37
110	9.0	16.42	0.83	100-110	1.12
120	9.2	18.33	1.91	110-120	0.97
130	8.7	18.92	0.59	120-130	0.87
140	8.4	19.49	0.57	130-140	0.59
150	8.0	20.04	0.54	140-150	0.54
155	7.9	20.30	0.26	150-55	0.26

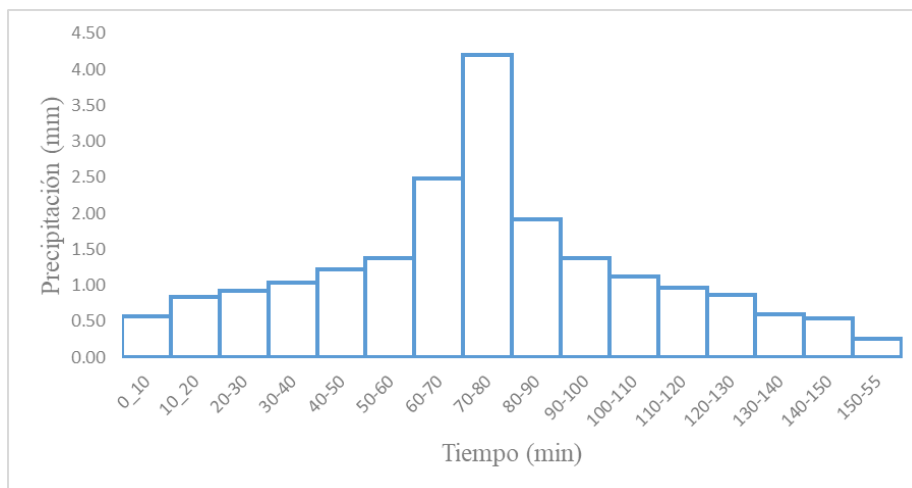


Ilustración 34: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 50 años.

Del mismo modo, para un periodo de retorno de 50 años, como se puede evidenciar en la ilustración 63, se calcula una tormenta de diseño de 20.30 mm. Es así que, con el método de los bloques alternos, se obtiene un pico 4.22 mm en el intervalo de 70-80 minutos.

Tabla 49: Resumen de datos para un periodo de retorno de 100 años, estación Chanlud.

Elaborado por: Autores.

HIETOGRAMA DE DISEÑO PERIODO DE RETORNO 100 AÑOS					
Duración	Intensidad	Profundidad calculada	Profundidad Incremental	tiempo	Precipitación
10	27.1	4.52	4.52	0_10	0.61
20	21.6	7.19	2.67	10_20	0.89
30	17.3	8.67	1.49	20-30	0.98
40	15.2	10.15	1.48	30-40	1.11
50	13.8	11.46	1.32	40-50	1.32
60	12.7	12.67	1.20	50-60	1.49
70	11.8	13.78	1.11	60-70	2.67
80	11.1	14.82	1.04	70-80	4.52
90	10.5	15.81	0.98	80-90	2.05
100	10.0	16.74	0.94	90-100	1.48
110	9.6	17.64	0.89	100-110	1.20
120	9.8	19.69	2.05	110-120	1.04
130	9.4	20.33	0.64	120-130	0.94
140	9.0	20.94	0.61	130-140	0.64
150	8.6	21.52	0.58	140-150	0.58
155	8.4	21.80	0.28	150-55	0.28

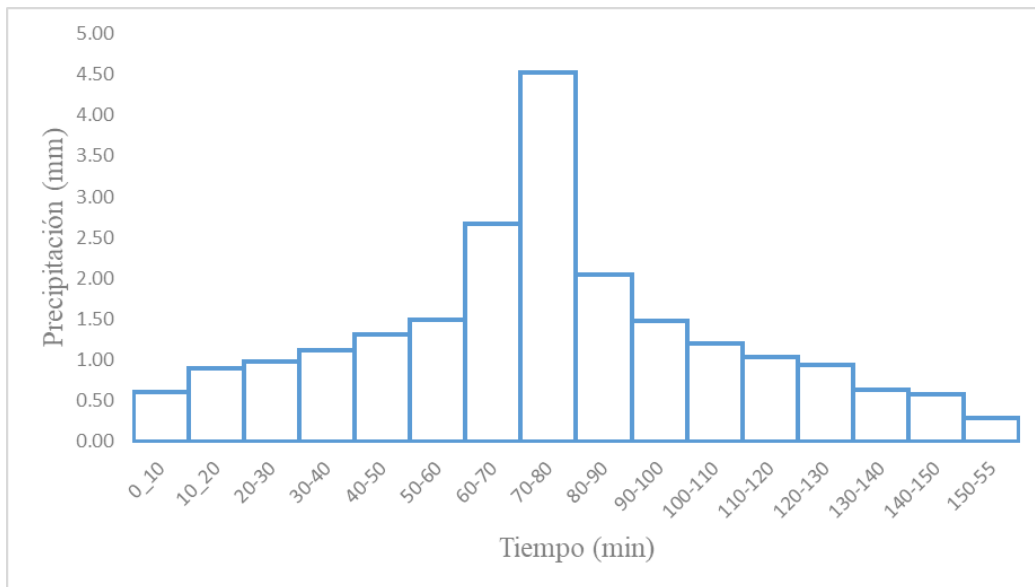


Ilustración 35: Hietograma de diseño, estación Chanlud, periodo de retorno 100 años.

Para el periodo de retorno mayor, en la estación de Chanlud, correspondiente a los 100 años, se ha obtenido una precipitación de diseño de 21.80, lo cual, al realizar la división en intervalos de 10 minutos, queda definido el pico en los 70-80 minutos de 4.54 mm.

Esta estación al tener un peso del 31%, según los polígonos de Thiessen, es de interés para el estudio. Sin embargo, posee precipitaciones relativamente bajas, por lo que equilibra el comportamiento hidrológico de la cuenca del Machángara.

3.6 Hidrogramas de crecida para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años

Por medio del modelo hidrológico validado y las tormentas de diseño para cada periodo de retorno, se pueden obtener los hidrogramas de crecida, los mismos que, más adelante, serán utilizados en la modelación hidráulica en el análisis de las zonas de inundación.

- **Periodo de retorno 25 años**

Se obtiene un caudal máximo de salida de 166.8 m³/s

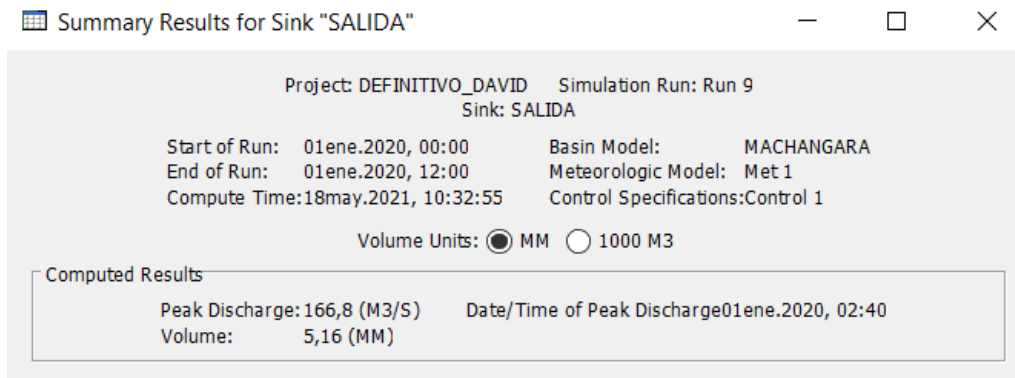


Ilustración 36: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 25 años.

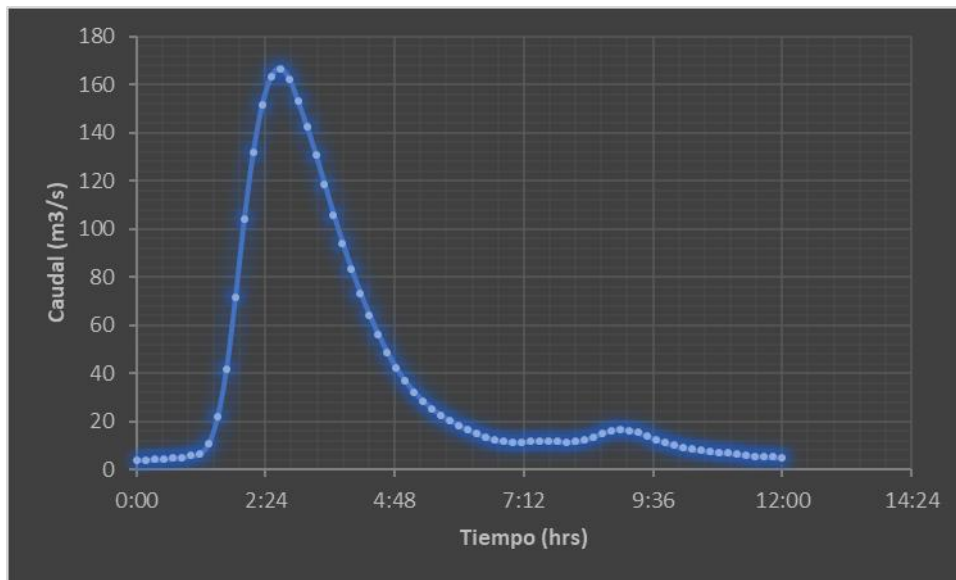


Ilustración 37: Hidrograma de crecida con periodo de retorno de 25 años.

De acuerdo con la ilustración 66 y 67, se puede observar el caudal punta de salida de la cuenca para un periodo de retorno de 25 años, así como también el ajuste de los datos que causan dicho caudal, en donde se puede notar un caudal base de 4 m³/s, los mismos que guardan concordancia con el efecto de los embalses presentes en la superficie de la cuenca hidrográfica de estudio. Así también, revela el comportamiento hidrológico de la cuenca del Machángara, donde se observa que se alcanzan valores de gasto altos en poco tiempo cuando la cuenca se encuentra en condiciones húmedas.

- **Periodo de retorno 50 años:**
Se obtiene un caudal máximo de salida de 194.8 m³/s

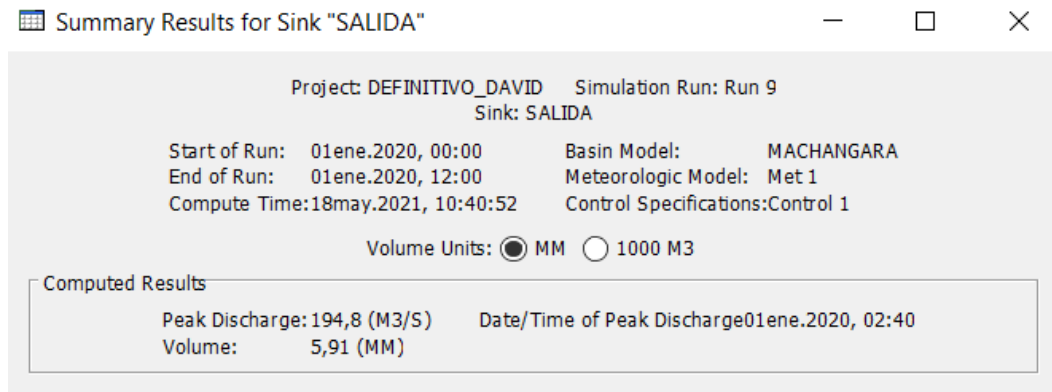


Ilustración 38: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 50 años.

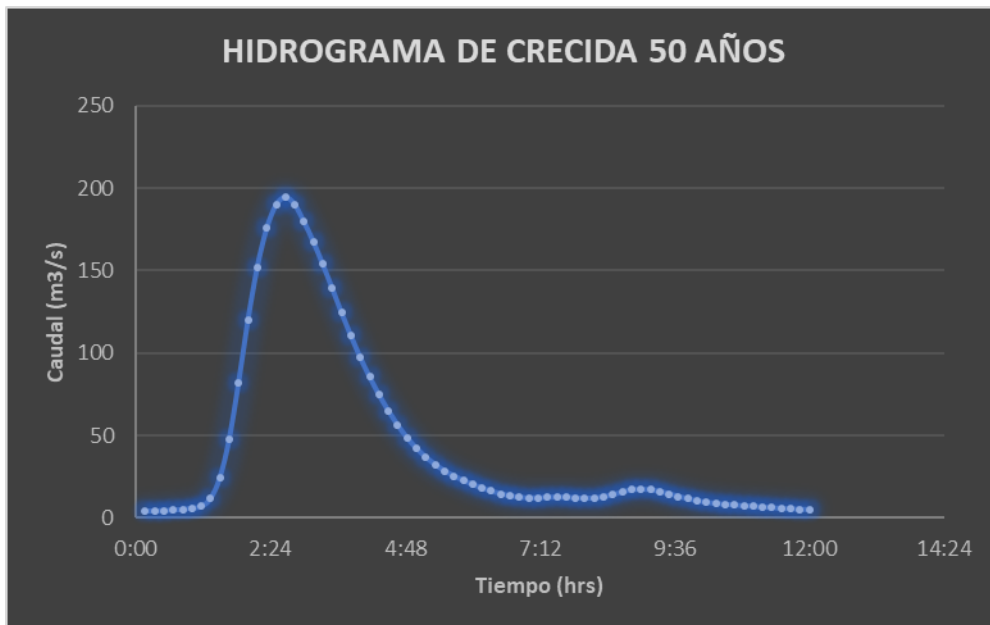


Ilustración 39: Hidrograma de crecida con periodo de retorno a 50 años.

Del mismo modo, en la ilustración 69, para un periodo de retorno de 50 años, se evidencia el mismo comportamiento marcado de crecimiento de caudal, en donde se eleva repentinamente causando el pico descrito de 194.8 m³/s, para posteriormente disminuir y mantenerse en el flujo base de 4 m³/s.

- **Periodo de retorno 100 años:**
Se obtiene un caudal máximo de salida de 224.6 m³/s

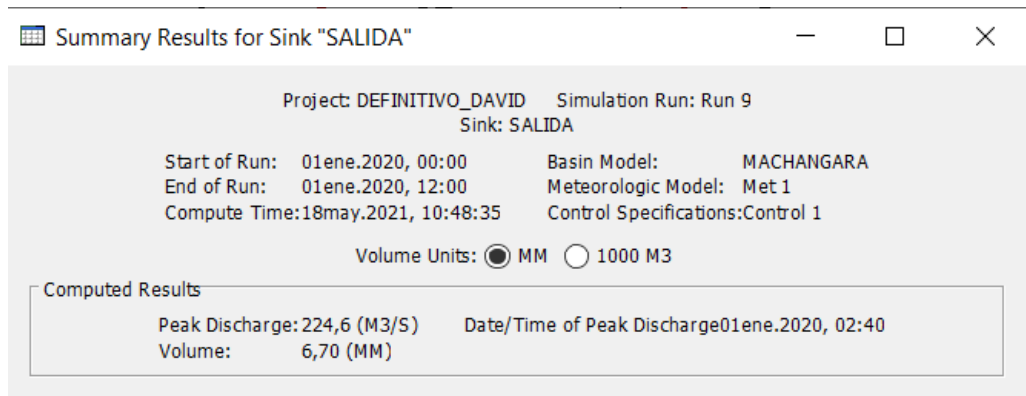


Ilustración 40: Caudal obtenido Hec-Hms, periodo de retorno 100 años.

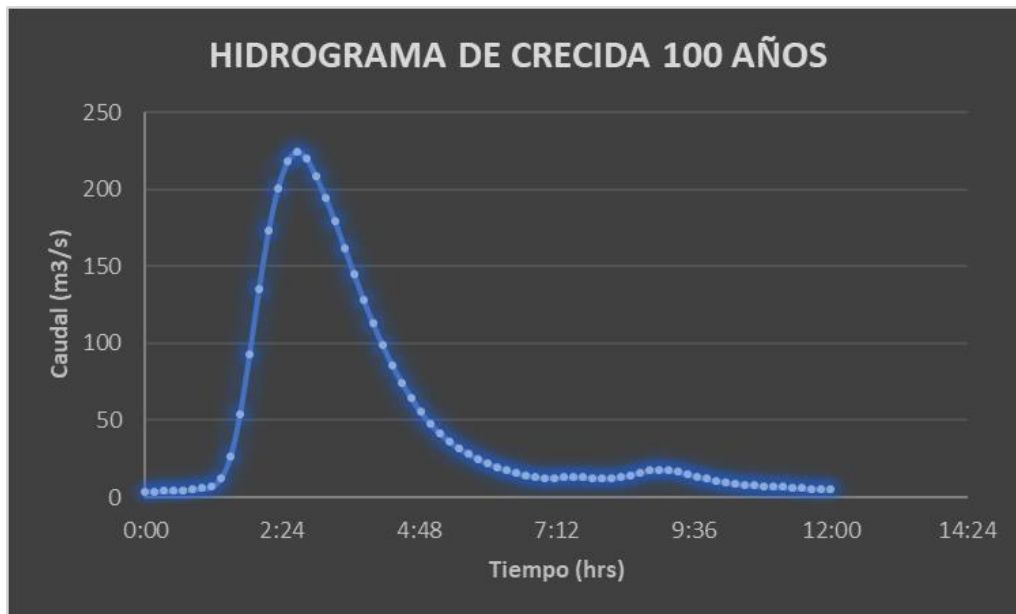


Ilustración 41: Hidrograma de crecida con periodo de retorno a 100 años.

Finalmente, para el periodo de retorno de 100 años, la cuenca del Machángara mantiene su comportamiento de crecimiento repentino, para posteriormente disminuir y mantenerse en decrecimiento por un intervalo de tiempo.

Capítulo 4: Modelación Hidrodinámica de Inundaciones

4.1 Modelación Hidráulica Unidimensional

Dentro del análisis realizado para este estudio, se ha considerado la elaboración de una modelación hidráulica unidimensional, el cual obedece a las ecuaciones de Saint Venant, mediante el programa computacional HEC-RAS, por su versatilidad y disponibilidad abierta.

Los datos de entrada necesarios para efectuar el modelo, dentro del software, hacen referencia a las secciones transversales del cauce principal, así también la llanura de inundación, de igual manera los hidrogramas de crecida de caudal, obtenidos en el capítulo anterior.

De este modo, lo que se pretende encontrar es la profundidad del agua y velocidad media en cada sección transversal del cauce, de la misma manera, la extensión de la inundación para representar la amenaza del evento de forma gráfica, a través de mapas.

4.1.1 Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca hidrográfica

El MDE, que no es más que un conjunto de puntos que guardan datos numéricos acerca de la distribución espacial de altitud del terreno determinado, ha sido obtenido por parte de las investigaciones del ingeniero Carlos Matovelle y procesos del sistema de información geográfica, con una resolución de 3x3 metros.

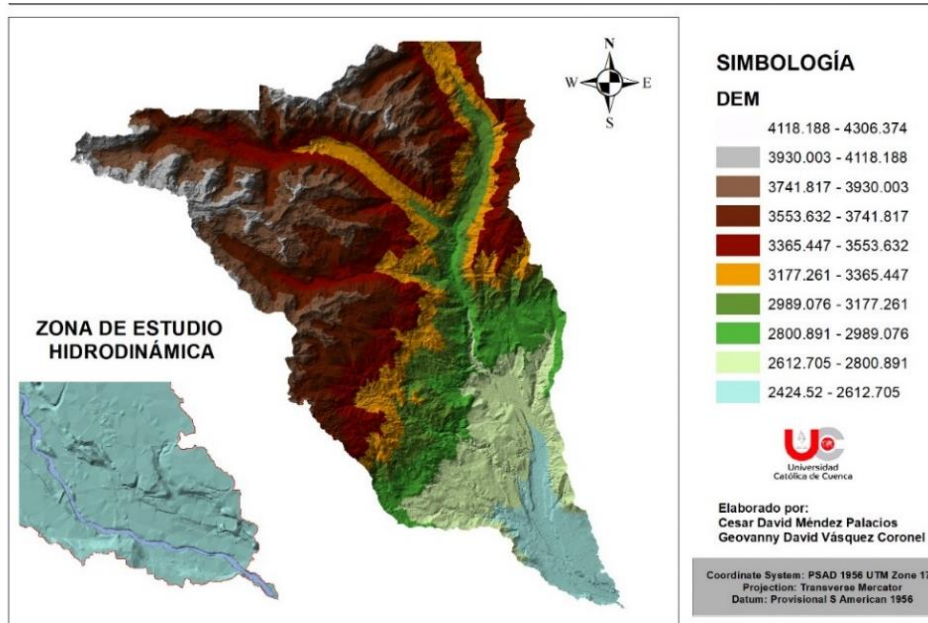


Ilustración 42: Modelo Digital de Elevaciones, Cuenca Hidrográfica del Machángara.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 18.

4.1.2 Parámetros de entrada HEC-GeoRas.

Se ha utilizado la extensión Hec-GeoRas, dentro del sistema de información geográfico ArcGis en la generación de los parámetros de entrada, para el posterior análisis dentro del software Hec-RAS, partiendo del modelo digital de elevaciones y una serie de procesos.

Inicialmente, se ha convertido el DEM en un archivo TIN, siendo una manera de representar la morfología de la superficie, basados en vectores construidos mediante una triangulación de un conjunto de puntos.

En secuencia, se crea la geometría y sus distintas capas como la línea central por donde se considera el eje del cauce, además de los contornos y laderas de inundación, también las secciones transversales donde se desean obtener los datos, para este caso se han tomado cada 10 metros, en una longitud total del tramo de interés de 3592 metros.

De esta manera, se llega a obtener el río y sus extremos digitalizados, divididos en secciones que, a su vez, deben guardar concordancia con la morfología del canal natural.

A continuación, se muestra el tramo de cauce de interés, con sus propiedades geométricas, digitalizadas en el software mencionado:

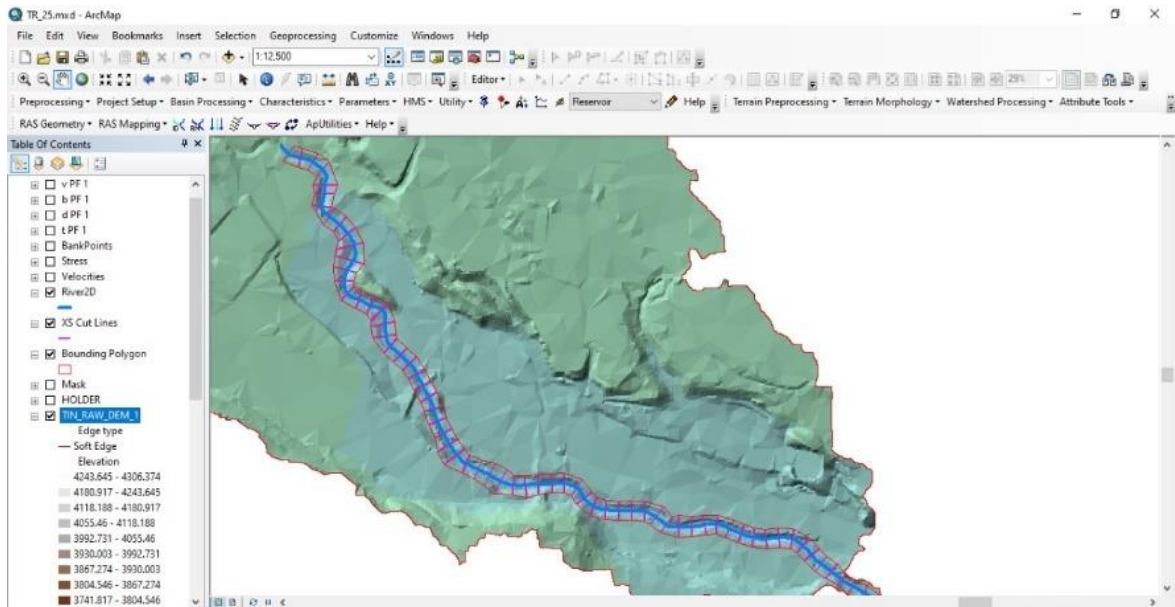


Ilustración 43: Digitalización del tramo del río Machángara, Hec-GeoRas.

Elaborado por: Autores.

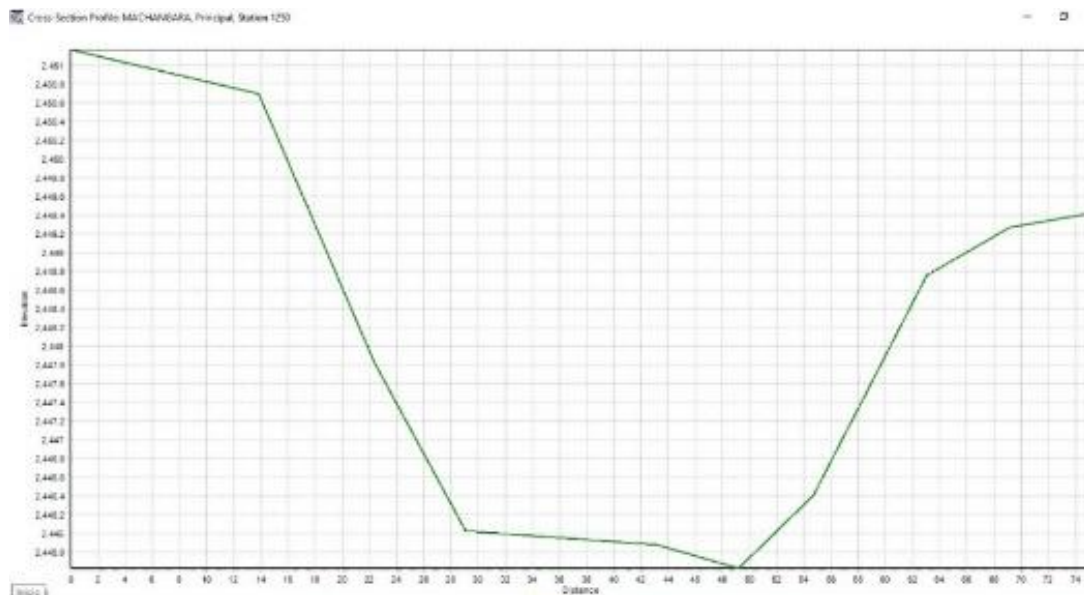


Ilustración 44: Sección transversal, tramo del río Machángara.

Elaborado por: Autores.

De acuerdo con lo observado, se puede evidenciar la extensión del tramo de río de interés como objeto de estudio, junto con cada una de las propiedades geométricas necesarias como parámetros de entrada en procesos posteriores como: el eje del cauce, representado con la línea azul y los bordes del río, denotado con las líneas rojas. De igual manera, las secciones transversales guardan estrecha relación con las condiciones reales del terreno del canal natural, tal como se ilustra en la imagen 74, en donde: el eje de las abscisas,

representa la distancia en metros y, en el eje de las ordenadas, la correspondiente altura en metros sobre el nivel del mar.

4.1.3 Modelación Hec-Ras

Los datos obtenidos en el apartado anterior en la extensión Hec-GeoRas, deben ser exportados al programa Hec-Ras, considerando el sistema de medidas, para nuestro caso se ha empleado el sistema métrico.

De esta manera, se procede a cargar la geometría anteriormente descrita y se verifica la correcta importación de los datos de las secciones transversales:

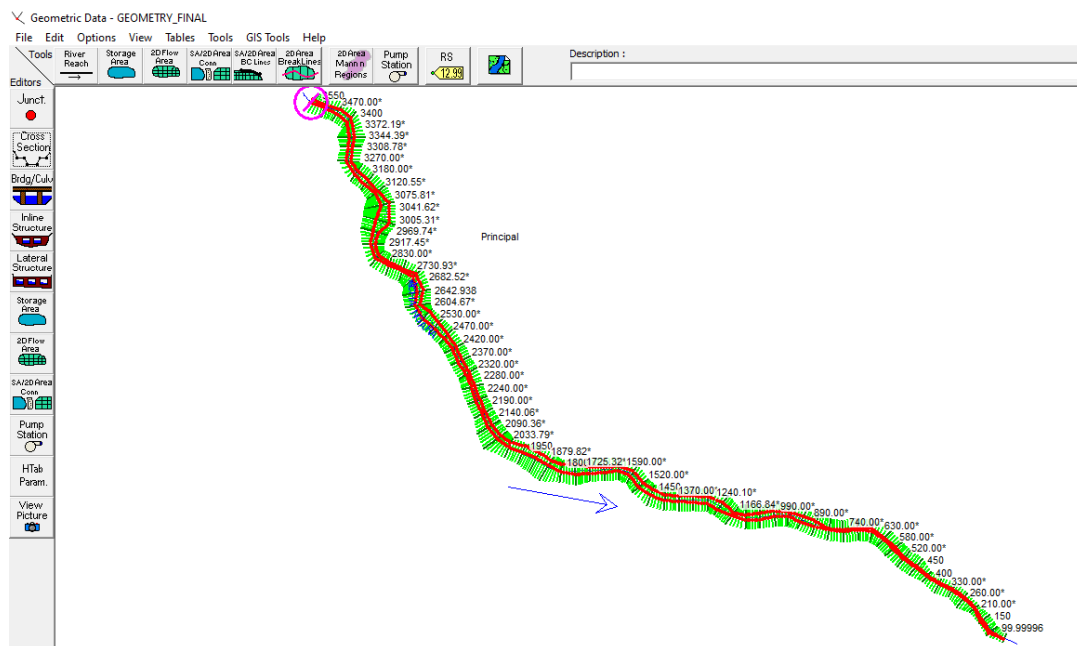


Ilustración 45: Modelación Hidráulica Hec-RAS, Geometría.

Elaborado por: Autores.

Tal como se observa, el tramo del río de interés queda definido por 350 secciones, separadas cada 10 metros, dando un total de longitud del tramo de 3.5 km, teniendo su inicio en la abscisa 3550, en donde se considerará la presencia de la estación de la Llantera para la posterior calibración del modelo, debido a los datos observados de caudal.

4.1.3.1 Coeficiente de rugosidad

Una vez importados los archivos dentro del Hec-Ras, se deben dar los valores de entrada del número de Manning, el cual representa la rugosidad del canal, en donde se ha utilizado la siguiente tabla, obtenida del autor Chow (1959):

Tabla 50: Tabla 4.8 Valores de coeficientes de rugosidad, literal D Cursos Naturales.

Fuente: Chow (1959).

CURSOS CON ANCHO MENOR A 100 PIES			
a. Cursos en planicie	0.025	0.03	0.033
1.Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.03	0.035	0.04
2.Igual que arriba, per más piedras y pastos	0.033	0.04	0.045
3.Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.035	0.045	0.05
4.Igual que arriba pero algunos pastos y piedras	0.04	0.048	0.055
5.Igual que arriba, nivel inferiores, más pendiente y sección inefectivas	0.045	0.05	0.06
6.Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.05	0.07	0.08
7.Tramos con muchos pastos, pozos profundos o recorridos de la crecida	0.075	0.1	0.15
b. Cursos en montaña, sin vegetación en el canal			
1.Fondo grava, canto rodado y algunas rocas	0.03	0.04	0.05
2.Fondo cantos rodados con grandes rocas	0.04	0.05	0.07

La selección del coeficiente de rugosidad, se ha basado en la observación de las secciones transversales del cauce, así como también en sus propiedades geológicas y de vegetación, encajando en el criterio de cursos naturales con un ancho superior al nivel de crecida menor a 100 pies, en donde se tiene como objeto de estudio al tramo del cauce en una planicie, al pertenecer a la parte baja de la cuenca con un entorno de piedras y pastos, para lo cual se ha empleado un número de Manning de 0.035 para la base del río y para las paredes del canal natural.

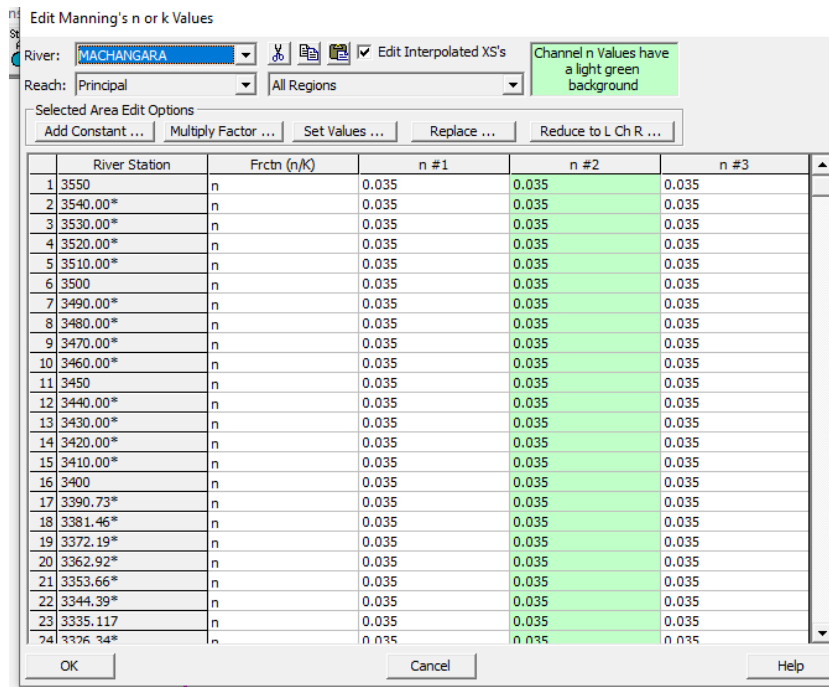


Ilustración 46: Números de Manning iniciales, Modelación Hidrodinámica Hec-RAS.

Elaborado por: Autores.

4.1.3.2 Análisis de flujo no estacionario

Una vez ingresados los parámetros geométricos del tramo de río de estudio, los mismos que fueron obtenidos en la sección 4.1.2, se ha designado los datos respectivos de flujo y las condiciones de frontera del modelo, lo cual, para nuestro caso de estudio, al ser un río perenne se ha considerado un flujo permanente de condiciones inestables con un régimen mixto, lo cual implica el ingreso de las condiciones de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo ya que analizara los cambios de régimen sub-crítico a supercrítico y viceversa.

Dentro de las condiciones de frontera asimiladas, se ha utilizado una curva de gasto, debido a la disponibilidad de los datos que ofrece la estación de la Llantera, ubicada aguas abajo de la cuenca del Machángara. De este modo, la elevación versus caudal, es interpolado a lo largo de las secciones ingresadas.

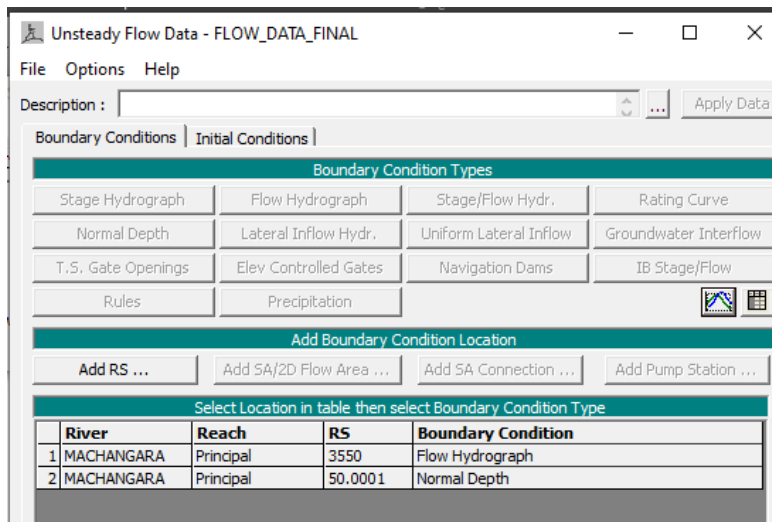


Ilustración 47: Condiciones de frontera, Modelación Hidrodinámica Hec-RAS.

Elaborado por: Autores.

De este modo, el hidrograma seleccionado para una simulación inicial, tiene su inicio el 28 de junio del año 2015 a las 15:00 horas, cuyos valores duran hasta el 29 de junio del mismo año a las 02:15, con un intervalo de 5 minutos. Dichos valores se han seleccionado de los registros de la estación de la Llantera, los mismos que describen el siguiente hidrograma:

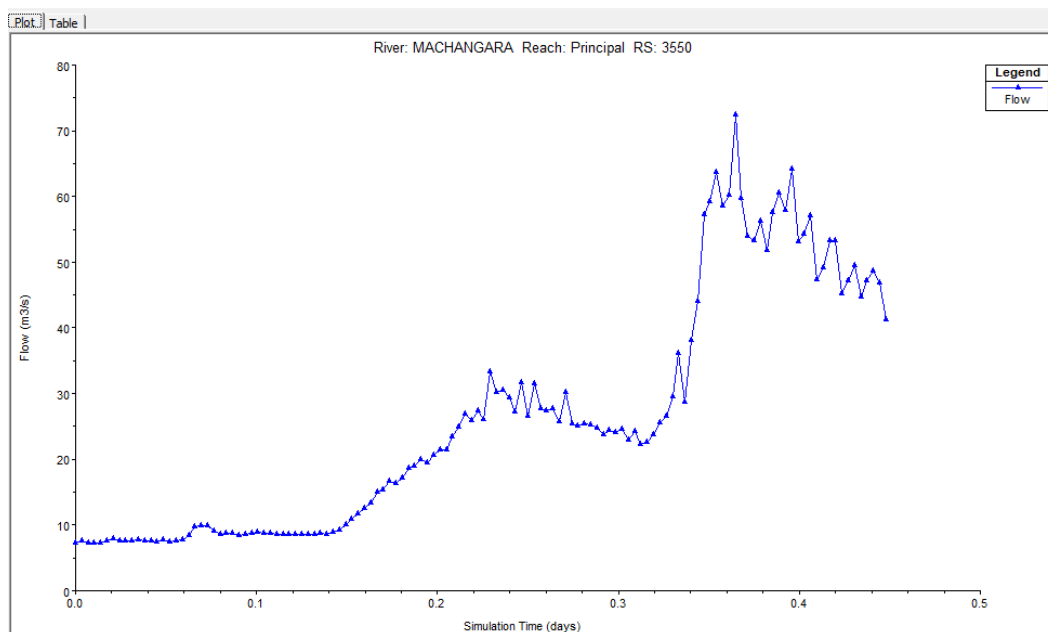


Ilustración 48: Hidrograma inicial para la Modelación Hidráulica, Hec-RAS.

Elaborado por: Autores.

Como se puede evidenciar en la ilustración 81, el hidrograma ingresado presenta un inicio de 7 m³/s aproximadamente, esto de acuerdo con los registros cada 5 minutos de la estación utilizada, posteriormente se tiene un primer pico de 35 m³/s para nuevamente elevarse hasta un máximo de 75 m³/s.

De esta manera, se ha decidido ingresar un flujo inicial de los 7m³/s que registra la estación en el apartado de “ingreso de flujo inicial” en la abscisa 3550, junto con un intervalo de procesamiento de datos de 3 segundos.

Los valores arrojados por el software Hec-RAS en su primera simulación con los datos inicialmente supuestos, no revelaron una aproximación adecuada de lo calculado, en comparación con los datos observados, ya que ciertos valores se encuentran bastante alejados, es por esto que, a continuación, se realiza la calibración del modelo.

4.1.4 Calibración y Validación del Modelo Hidrodinámico

4.1.4.1 Calibración del Modelo Hidrodinámico

De acuerdo con lo obtenido en la primera corrida de la simulación dentro del programa computacional, demostró que los datos calculados no guardan una relación conveniente con lo observado, de modo que los hidrogramas registrados en la abscisa de interés, es decir, en donde se encuentra la estación de la Llantera, se muestran a continuación:

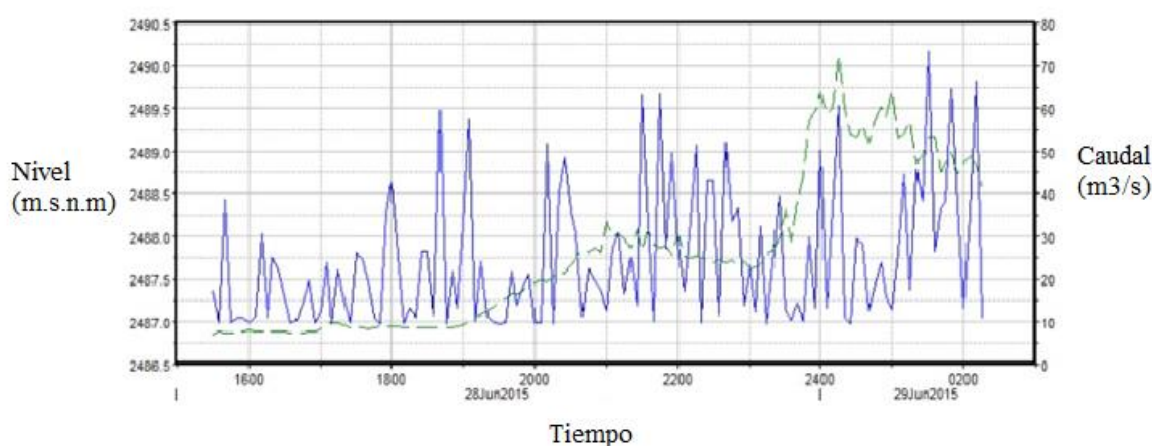


Ilustración 49: Comparación de caudales calculados y observados, HEC-RAS.

Elaborado por: Autores.

En la ilustración 82, se muestra entre líneas punteadas verdes, el hidrograma observado por la estación de la Llantera, ubicada en la abscisa 3550. Del mismo modo, se denota el hidrograma calculado por el programa, en línea azul.

Es así que, no se puede relacionar ambos parámetros, por lo que se procede a una calibración del modelo, modificando ciertas variables propias del programa, en donde, se han producido 10 simulaciones, variando periódicamente el parámetro correspondiente al coeficiente de rugosidad de Manning hasta obtener, con un valor de Manning de 0.035 en el centro del canal, y en los bordes con valores de 0.03. Además, un tiempo computacional de 3 segundos, registrándose los siguientes datos de altura de agua:

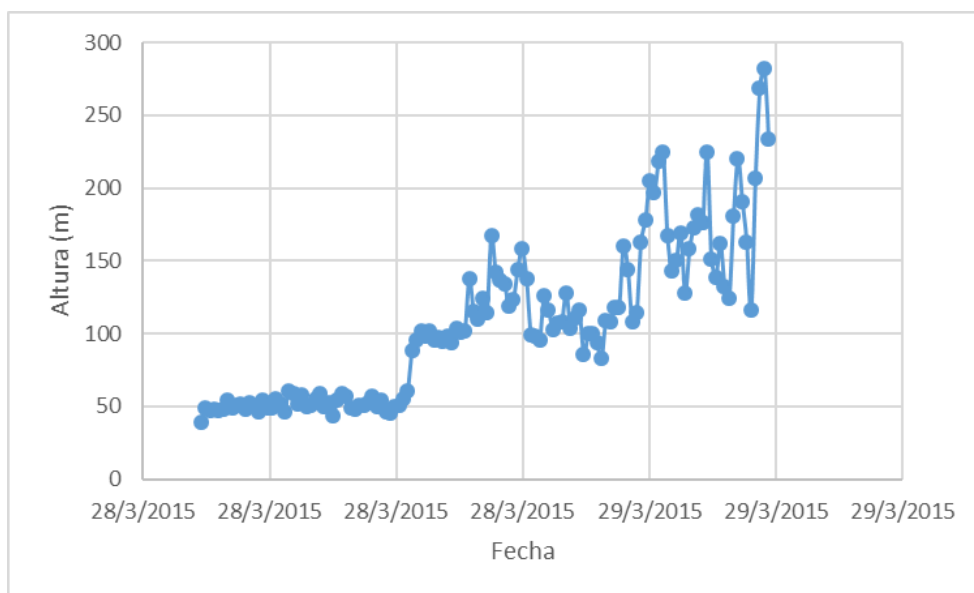


Ilustración 50: Alturas de agua, simulación No.10, $n=0.035$.

Elaborado por: Autores.

Como se puede evidenciar en la imagen, se representa las alturas de forma gráfica, en donde, en el eje de las abscisas se encuentran las fechas y, en el eje de las ordenadas se registran los respectivos niveles en metros, guardando una estrecha relación con los valores observados, para lo cual, se procede a la validación del modelo definitivo, a través de un análisis estadístico.

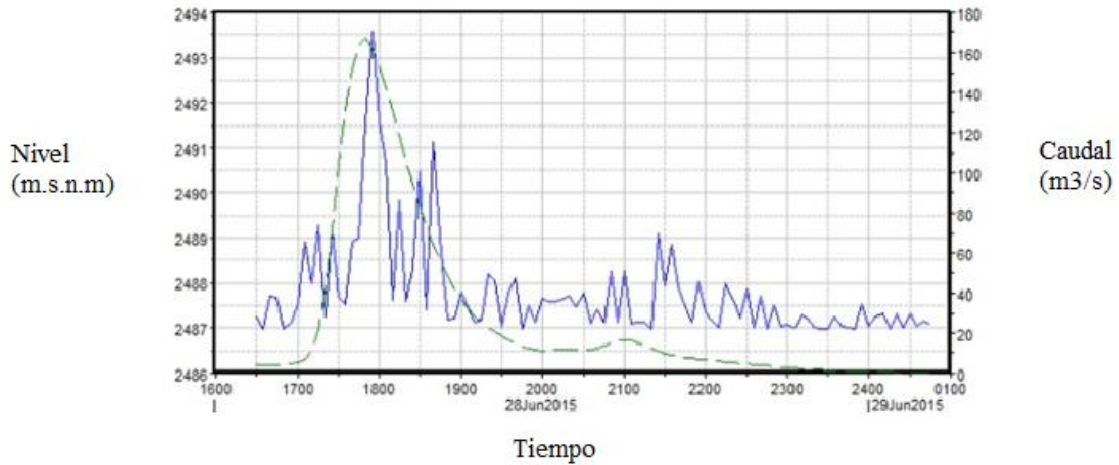


Ilustración 51: Modelo Hidrodinámico Calibrado, HEC-RAS.

Elaborado por: Autores.

De igual manera, se puede observar una relación adecuada con los valores que registra los cálculos del programa, en comparación con los datos observados por la estación de la Llantera, ubicada en la cuenca baja del Machángara.

4.1.4.2 Validación del Modelo Hidrodinámico

El modelo hidrodinámico, se ha validado siguiendo los mismos parámetros vistos dentro de la modelación hidrológica, para lo cual, se ha empleado el programa R estudio, en donde se han dado importancia a las mismas variables de la sección 3.3 del presente estudio, arrojando lo siguiente:

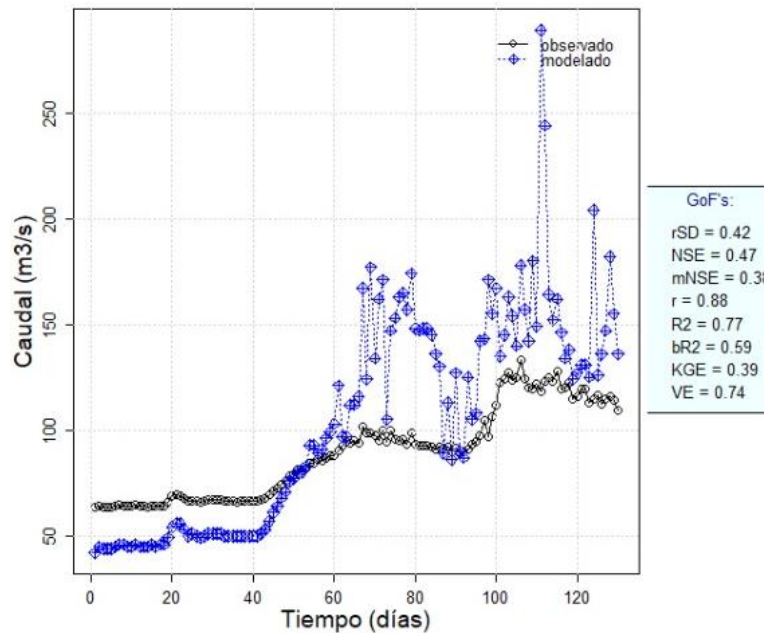


Ilustración 52: Validación del Modelo Hidrodinámico.

Elaborado por: Autores.

Como se observa en la imagen 85, el radio de la desviación estándar (rSD), el mismo que registra la variación de los datos en un 42%, al igual que la eficiencia de Nash (NSE), el mismo que denota la linealidad de los datos en un 47%. En cuanto a los parámetros de dispersión más relevantes, se puede observar un R2 que registra una predicción de los datos en un 77%, siendo un valor bastante acertado para el mapeo, acerca del grado de amenaza en función de ciertos parámetros que ayudan a determinar este fenómeno.

De esta manera, se considera a la simulación hidrológica del tramo del río de estudio, adecuadamente validado y listo para el ingreso de los hidrogramas obtenidos en el apartado 3.5.

4.2 Mapas de amenaza de inundación en GIS

Inicialmente, se ha realizado el proceso inverso, importando en el software ArcGis los datos de nivel de agua, velocidades y las condiciones de los bordes del cauce, de modo que se reproduzcan dichos valores, de manera gráfica, de acuerdo a un determinado parámetro.

A continuación, se realizan los procesos dentro de la pestaña RAS Mapping, que facilitan el manejo de la información registrada en Hec-Ras, transformándolo a los archivos para la elaboración de los mapas.

De esta manera, de acuerdo al parámetro de profundidad del agua en metros, se obtienen los siguientes mapas de amenaza de inundación, respecto a cada periodo de retorno:

4.2.1 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 25 años, del parámetro Profundidad.

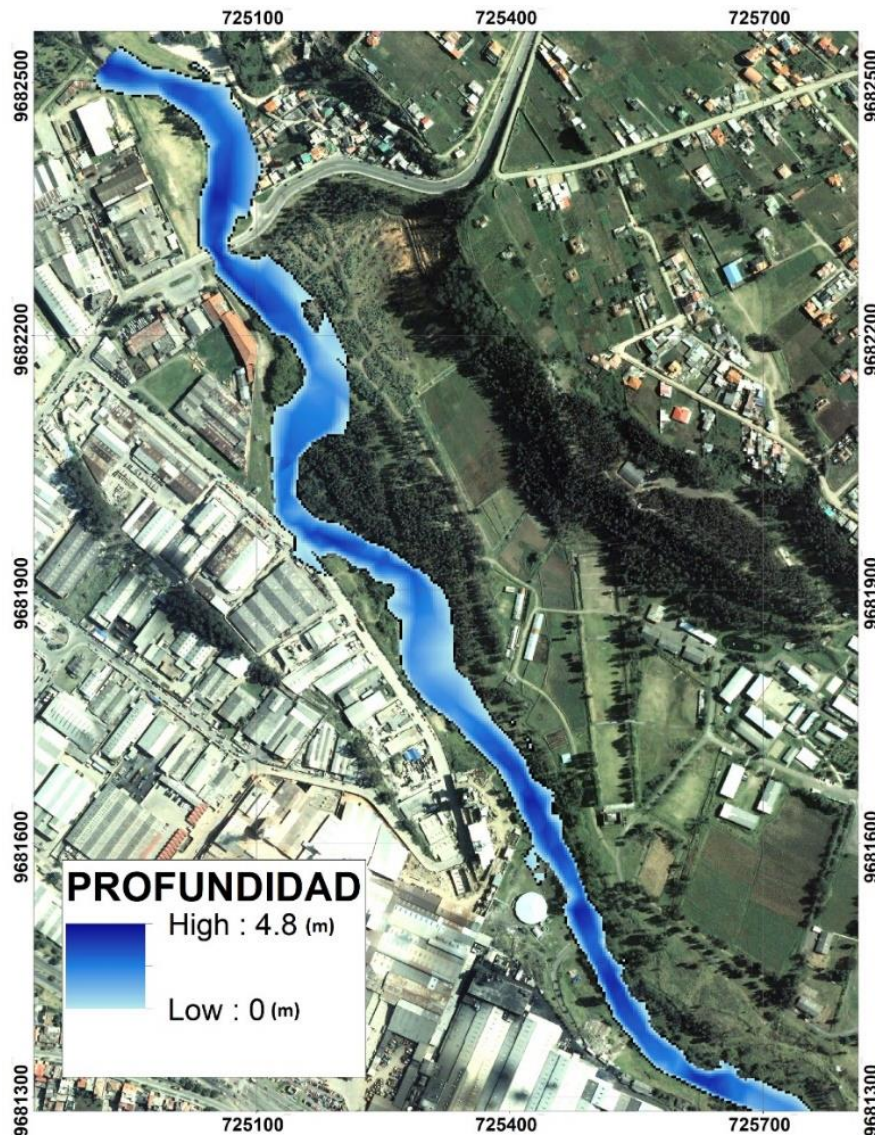


Ilustración 53: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 4.

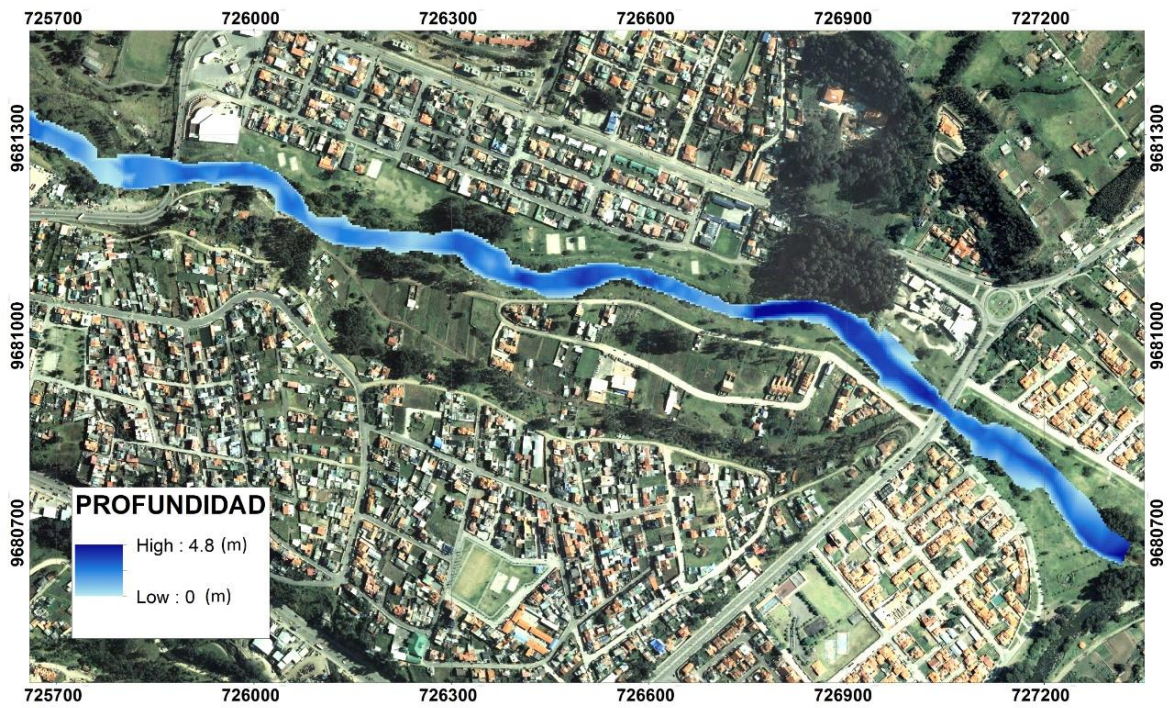


Ilustración 54: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 5.

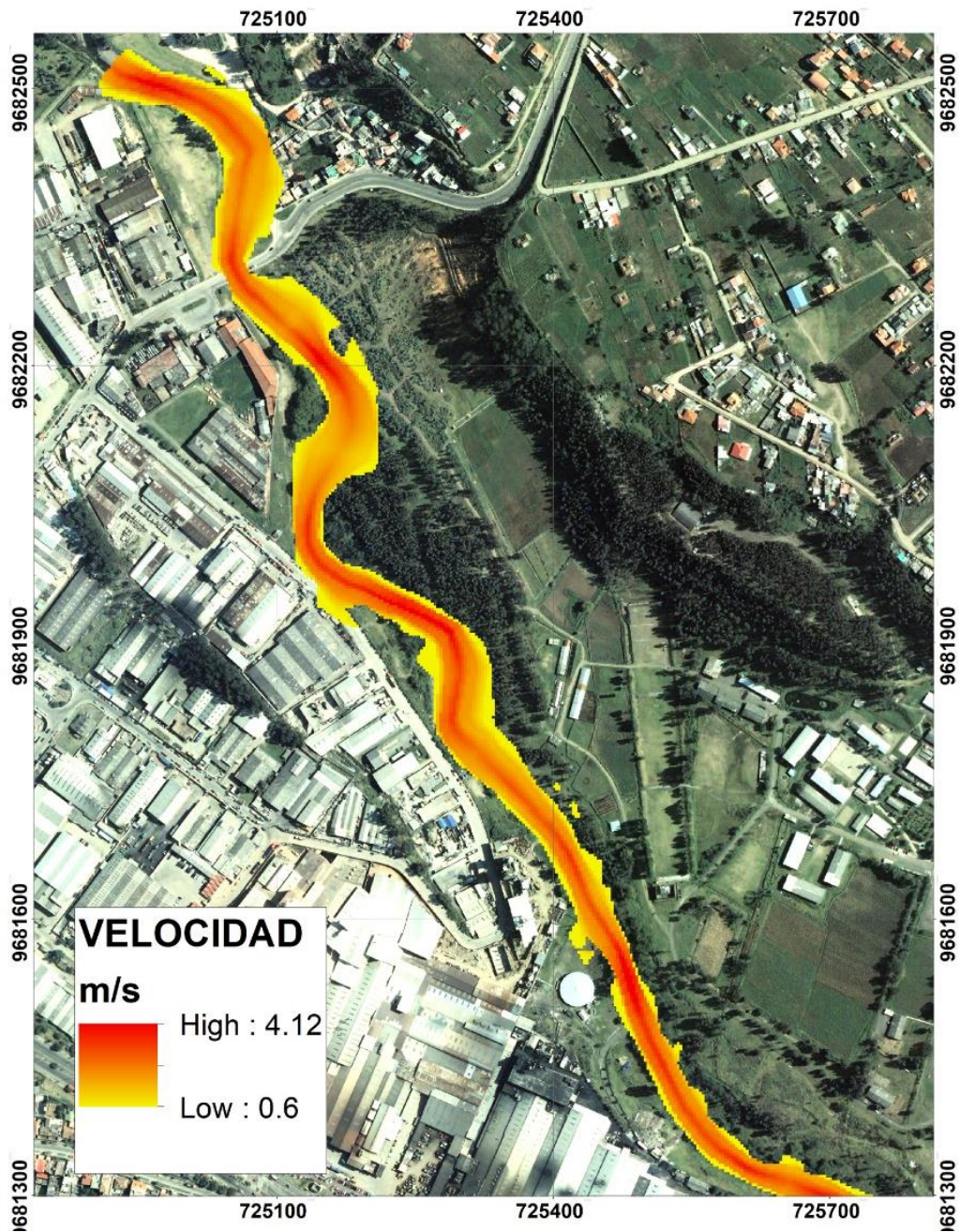


Ilustración 55: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 6.



Ilustración 56: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 25 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 7.

Al ingresar al modelo hidrológico validado, los valores del hidrograma de creciente correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, se ha obtenido un mapa de amenaza de inundación, con base a la profundidad en cada sección del tramo de río de estudio, en donde se registra un máximo de 4.8 metros, ubicado en varias partes del cauce donde la topografía lo permite. Además, en cuanto al parámetro de la velocidad, se ha registrado un máximo de 4.12 m/s, en donde se obtienen desbordamientos en los sitios donde se evidencia una mayor altura y velocidad. Sin embargo, no se observan intrusiones en los domicilios aledaños. De igual manera, en los bordes del tramo del río, se tienen velocidades bajas, cercanas a 0.6 m/s, lo cual indica que no se propagara una inundación dirigida hacia las estructuras, presentándose una inundación ligeramente baja, en su mayoría, en la vegetación aledaña.

4.2.2 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 50 años, de los parámetros Profundidad y Velocidad.

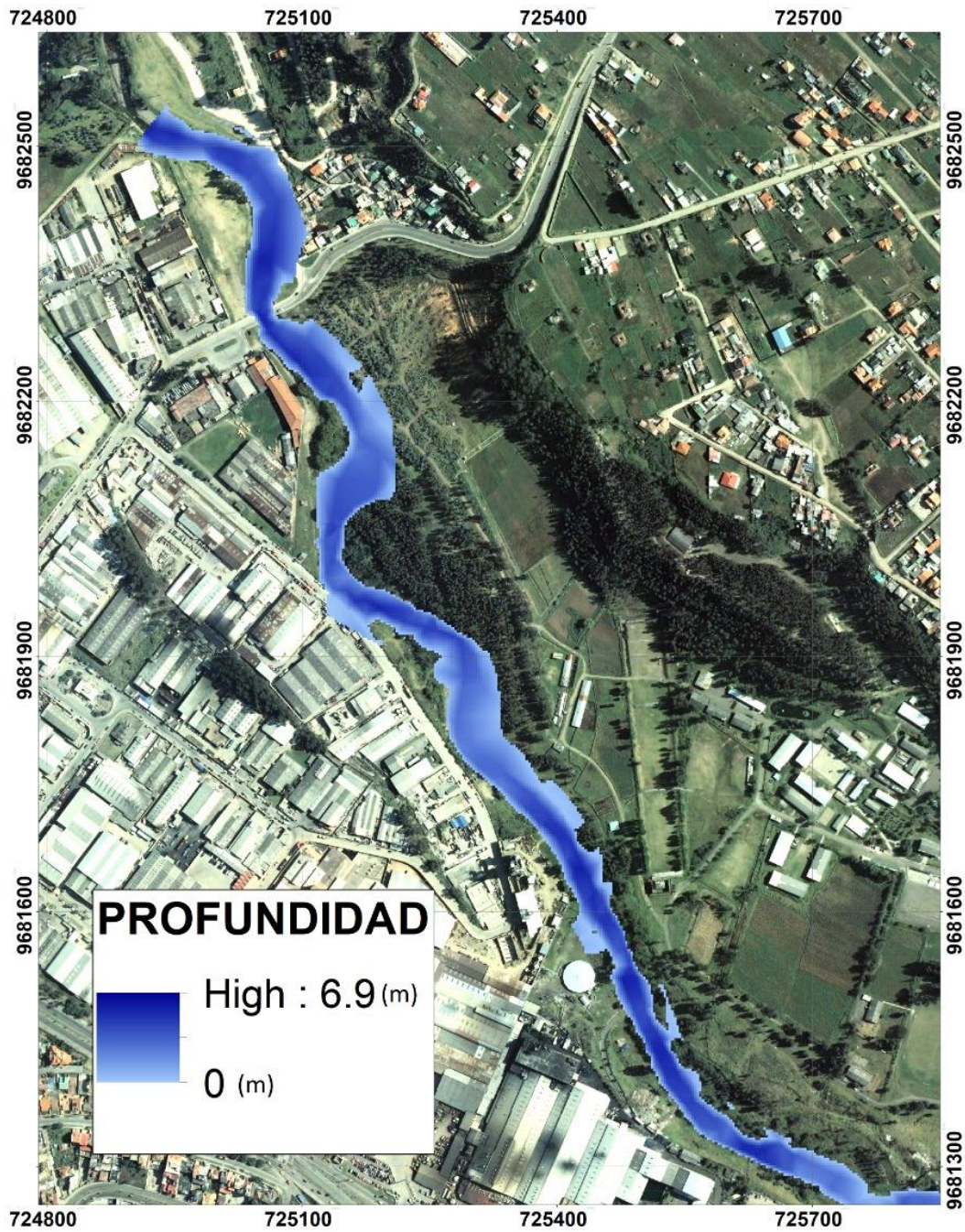


Ilustración 57: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 8.



Ilustración 58: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 9.

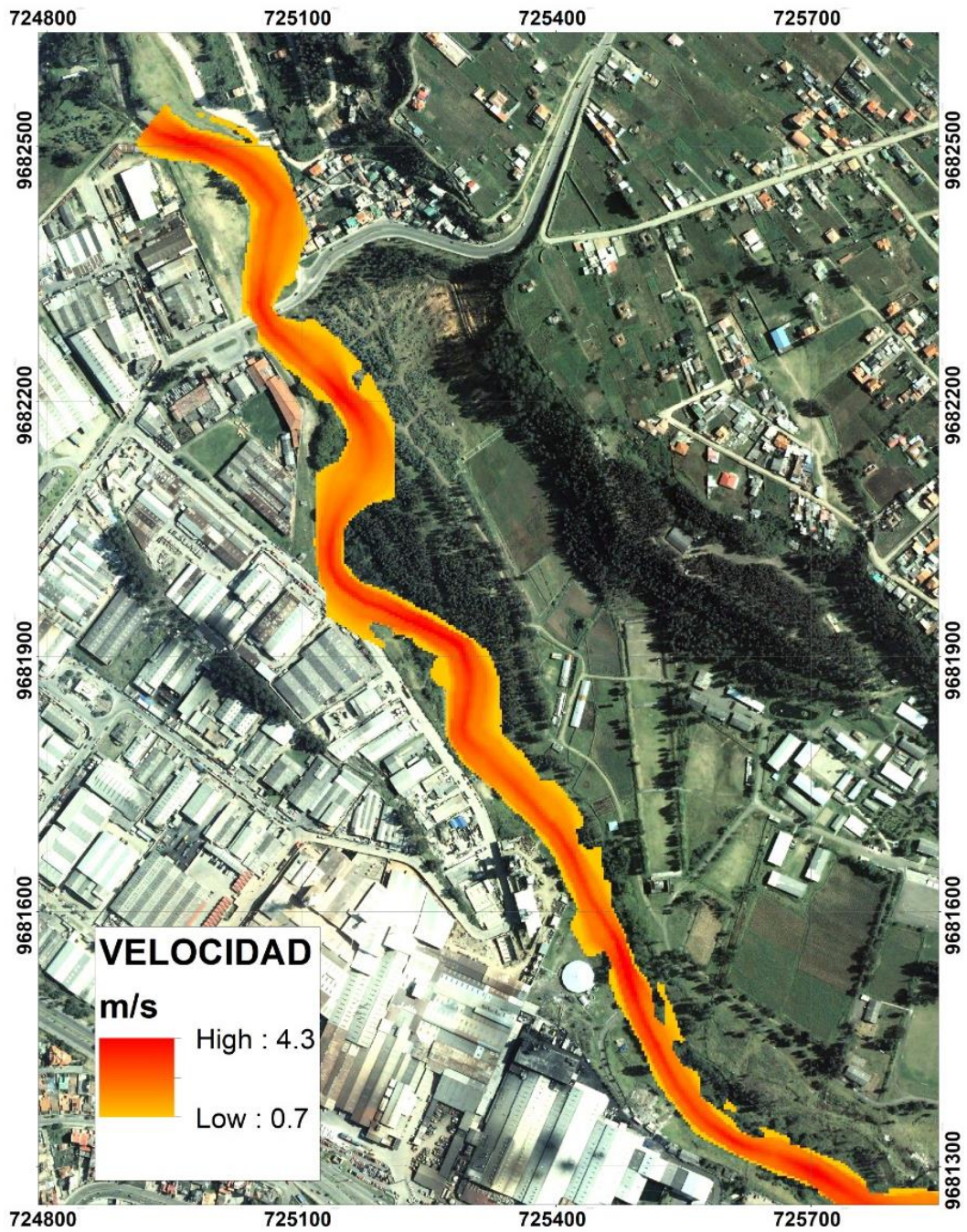


Ilustración 59: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 10.

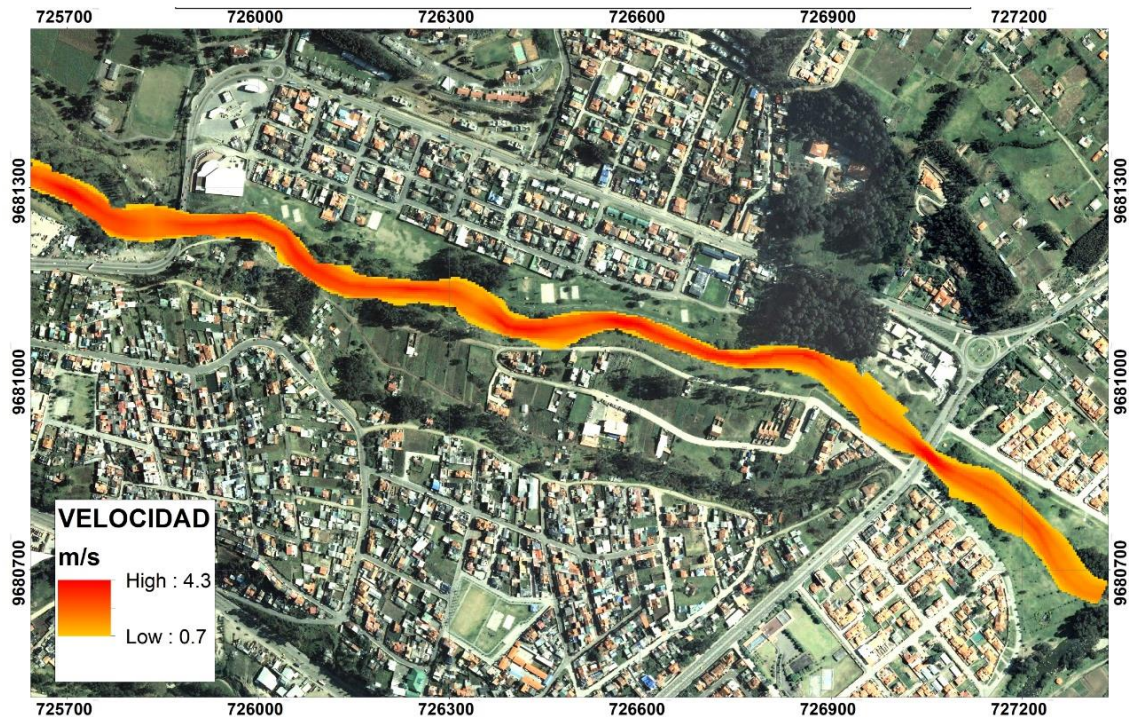


Ilustración 60: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 50 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 11.

De igual manera, en base a un periodo de retorno de 50 años se tiene un máximo de profundidad de 6.9 metros, registrándose estos altos en las mismas secciones vistas en el periodo de retorno anterior. Así también, se tienen velocidades máximas de 4.3 m/s, en relación con la ubicación de las profundidades antes mencionadas. Se pueden observar desbordamientos próximos a la junta con el Río Cuenca, aunque un poco mayores al caso anterior, no se evidencian irrupciones en las propiedades pero si en la vía adyacente al tramo del río de estudio, al igual que en los bordes boscosos, esto, a pesar de que la velocidad, tan solo ha aumentado en 0.1 m/s, al caso anterior, produciéndose una amenaza moderada de inundación que afecte a estructuras cercanas en un radio de 50 metros.

4.2.3 Mapas de amenaza de inundación con periodo de retorno 100 años, del parámetro Profundidad.



Ilustración 61: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 12.



Ilustración 62: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Profundidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 13.

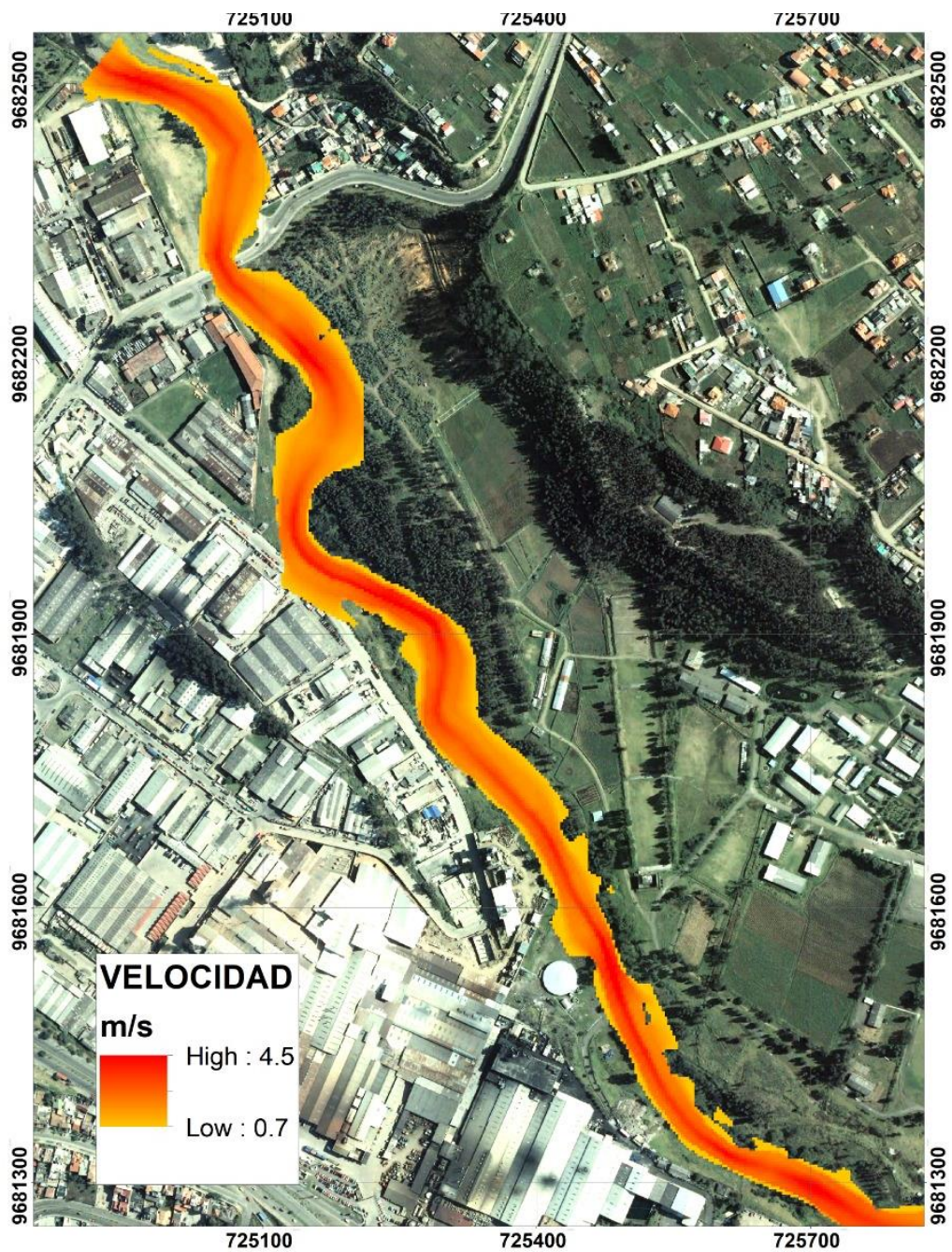


Ilustración 63: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 14.



Ilustración 64: Mapa de amenaza de inundación Río Machángara DJ Río Chulco hasta AJ Río Cuenca (TR 100 años) Velocidad.

Elaborado por: Autores.

Anexo: 15.

Finalmente, en cuanto al periodo de retorno de 100 años, se registran profundidades máximas de 7.62 metros, de igual modo, en las secciones de mayor peligro vistas en los periodos de retorno anteriores. Adicionalmente, se puede notar una velocidad máxima de 4.5 m/s con inundaciones que alcanzan la vía adyacente al Río del Machángara, sobretodo en la parte inicial del tramo del cauce de estudio y en pequeñas secciones al termino del tramo del rio, antes de la junta con el Río Cuenca. A pesar de que la velocidad mínima se mantiene constante al análisis con periodo de retorno de 50 años, ha aumentado la velocidad máxima registrada en 0.2 m/s, lo cual afecta considerablemente la amenaza de inundación, pudiendo observarse intrusiones en domicilios cercanos al río en un radio entre los 50 y 100 metros.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

La cuenca del Río Machángara, de acuerdo con la modelación hidrológica, reveló un comportamiento que se basa en varios factores como el número de curva, tiempo de retraso y porcentaje de impermeabilidad, resultando una sensibilidad ante estos parámetros. De igual manera, en relación a las estaciones distribuidas en la superficie de estudio, se pudo notar la irregularidad en la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones, lo cual modifica el comportamiento de la cuenca, manteniendo, por lo general, hidrogramas de crecida elevados.

Por otro lado, en cuanto a la simulación hidrodinámica del tramo del Río del Machángara, antes de la junta con el Río Cuenca, se asumió un comportamiento inestable, en donde, el modelo era cambiante en correlación con la rugosidad del canal y la pendiente accidentada de la topografía, contemplándose inundaciones leves en periodos de retorno de hasta los 50 años e, inundaciones de mayor riesgo con periodos de retorno superiores, como fue el caso de los 100 años. , de este manera, ante eventos críticos, se pueden suscitar amenazas de inundación en la parte baja de la cuenca, reveladas por las simulaciones, al incrementarse la velocidad del cauce, así como también su profundidad.

La cuenca del Río Machángara, fue constituida por tres micro-cuencas que fueron designadas de acuerdo a la importancia de la red hídrica, quedando dividida en tres superficies de 132.5 km², 66.13 km² y 121.01 km², en donde cada una de ellas guardó estrecha relación con la presencia de un determinado tipo de suelo y uso de su cobertura vegetal, al igual que la ubicación del casco urbano en la planicie de la micro-cuenca baja del Machángara, al momento de la determinación de los parámetros de escurrimiento.

Las estaciones hidro-meteorológicas han sido de gran interés para el presente estudio, puesto que todos los resultados obtenidos fueron comparados directamente con los datos observados en campo en las estaciones nombradas, los modelos, la información que se desarrolló fue revisada y comprobada con la información proveniente de las mismas, por esta razón para cualquier estudio hidrológico o hidráulico es esencial tener referencias de estaciones aledañas.

Cada uno de los modelos, fueron debidamente calibrados y validados, en conformidad con datos observados por estaciones hidro-meteorológicas, distribuidas a lo largo de la superficie de la cuenca hidrográfica, todo esto, por medio de análisis

estadísticos en relación con la dispersión de los valores calculados por los distintos softwares computacionales.

La representación gráfica mediante mapas de amenaza de inundación, basados en los parámetros de profundidad y velocidad, demostraron la probabilidad de ocurrencia de una inundación en un periodo de 25, 50 y 100 años respectivamente; en donde las alturas excedían los 4 metros y la velocidad, sobrepasaba los 4 m/s en ciertos tramos.

5.2 Aspectos relevantes del trabajo

Para la delimitación de la cuenca de estudio, correspondiente al Machángara, se utilizó el modelo digital de elevaciones de la Universidad del Azuay de la cuenca de Paute, con características de 50x50 metros de resolución, confiable y suficiente para la extracción de la cuenca de estudio y varios parámetros iniciales tales como: longitudes de cauce, pendiente de cauce, pendiente de la cuenca, tipo de suelo, entre otros. Estos valores aportaron en la obtención de nuevos parámetros, necesarios en la modelación hidrológica, como es el caso de los números de curva y datos fisiográficos. Sin embargo, a pesar de lograr satisfactoriamente la recolección de todos los parámetros de entrada, es necesario tener presente que la información no se encuentra actualizada en las bases de datos de las entidades públicas y privadas, reduciendo el nivel de exactitud del estudio.

Dentro de la modelación hidráulica, es necesario un mayor nivel de detalle del modelo digital de elevaciones, así que un ráster de 50x50 metros no es adecuado, por lo que se obtuvo un DEM de mejores características con un detalle de 3x3 metros, de esta manera se consigue observar el cauce para su digitalización y posterior definición del coeficiente de rugosidad.

Del mismo modo, en el caso del registro de precipitaciones diarias y de caudal que, las estaciones pluviométricas y limnigráficas guardan, son adecuadas para el alcance de este estudio, pero no existe, por lo general, una continuidad de los datos, perdiéndose valiosa información que puede ser contrastada con los datos obtenidos. De igual manera, ciertos valores de caudal, no guardan una relación de concordancia unos con otros, distorsionando la veracidad de los datos observados y, si bien ha sido eficiente para lograr un hidrograma acertado en este estudio, los datos no se prestan por completo, para periodos de retorno de gran magnitud.

Dentro del cálculo de la precipitación media, se adoptó la metodología correspondiente a los Polígonos de Thiessen, puesto que se ha dividido la cuenca a nivel de

sub-cuencas ya que permite acercarse con mayor exactitud al comportamiento general de la superficie hidrográfica; empleando para ello, las estaciones pluviométricas de Labrados, Chulco y Chanlud, las mismas que se encuentran distribuidas en la zona de interés. Esto demostró que el registro de cada estación, tienen fechas de inicio y final distintas, no existe una continuidad para intervalos de tiempo de 5 minutos, provocando el rechazo de ciertos valores que, si se disponían en algunas estaciones, con el fin de mantener simetría entre estas. En definitiva, el principal obstáculo fue conseguir información que empate el comportamiento del caudal en base a la precipitación registrada.

5.2.1 Procedimientos empleados

La metodología adoptada se basó en conocer el comportamiento de caudal de la cuenca del Machángara, generada por el registro de precipitación, condicionado por los parámetros hidrológicos y morfológicos de la cuenca del Machángara, así como también las condiciones de terreno del tramo de río de interés. De igual manera, el apoyo de los sistemas de información geográficas, en conjunto con los programas hidrológicos e hidráulicos y su versatilidad de exportación e importación entre estos respectivamente, lo cual permitió una fácil manipulación de los parámetros que sensibilizan los modelos.

5.2.2 Sensibilidad de los Modelos

El modelo hidrológico, es altamente sensible al número de curva (CN), lo cual es obvio, puesto que este parámetro hace referencia a la retención de agua en la superficie de la cuenca y está ligado directamente con la escorrentía; por lo que se deberían tener registros actualizados de la cobertura vegetal y tipo de suelo en subestaciones repartidas estratégicamente en la superficie de la cuenca, de modo que se mantenga un control en cuanto al constante cambio de estos parámetros, que a su vez, modifican notablemente el comportamiento hidrológico e hidráulico. Es así que, con este tipo de estaciones, se podría llegar a un cálculo más específico sin necesidad de calibrar manualmente las modelaciones.

Otros parámetros que modifican los modelos, son: el porcentaje de impermeabilidad de la superficie y el tiempo de retraso, los cuales aportan en la dispersión de los datos, influyendo en adelanto o retraso del punto máximo de la curva.

Dentro de la modelación hidráulica netamente, el parámetro que modifica el comportamiento del caudal, recae en el coeficiente de escorrentía de Manning, el cual

depende de las condiciones de rugosidad de terreno por el que atraviesa el cauce y, esto a su vez, está definido por el nivel de detalle del modelo digital de elevaciones que facilite observar las características de rugosidad.

5.3 Recomendaciones

Luego de un proceso del análisis, la investigación y el diseño, se puede recomendar lo siguiente:

Se deberían disponer de estaciones de registro de tipo de suelo y cobertura vegetal, ubicadas estratégicamente a lo largo de la superficie de las cuencas hidrográficas, debido a que estos parámetros determinan el comportamiento de escorrentía de la cuenca, de modo que, al disponer de estos datos, se puede lograr una mayor exactitud, al evitar la calibración de los datos, de una forma manual.

Es preciso mantener un registro continuo y funcional de las estaciones pluviométricas y limnimétricas ya que, si se desea conocer sobre el comportamiento hidrológico de una cuenca y, posteriormente hidrodinámico de las redes hidrográficas; se debe disponer de un conjunto de datos confiable, actualizado y de libre acceso, puesto que se genera un conocimiento que enriquece a la planificación y construcción de obras civiles seguras.

Además de la aplicación de una normativa municipal con respecto a los resultados obtenidos en este trabajo, de modo que se logre prevenir los daños causados por una inundación en la zona de estudio, principalmente en las áreas de mayor relevancia con las vías y viviendas cercanas y, de este modo, actuar antes de que se suscite un problema como ya se ha visto en otras cuencas hidrográficas de la provincia del Azuay.

Bibliografía

- Aguilar, J. (2017). *EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS EN ESTEROS Y CANALES MEDIANTE MODELAMIENTO HIDRODINAMICO 1D Y 2D*. Cuenca.
- Alvarado, V. (2020). *Modelacion Hidrologica del Río Torres y su Variación con respecto al cambio climatico*. San Jose-Costa Rica.
- Arias, P. (2015). *Guia de aplicaciones del Hec-Hms en cuencas cubanas*. La Habana.
- Ayuso, J. (06 de 1994). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/39431137_Estimacion_del_hidrograma_unitario_Estudio_comparativo_de_cuatro_metodos_lineales/link/0fcfd5117da109710a000000/download
- Bateman, A. (2007). *Hidrologia Basica y Aplicada* . Grupo de Investigacion en Transporte de Sedimentos.
- Botero, A. (2010). Estimacion del tiempo de concentracion en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis . 14.
- Botero, B. (2012). *MANUAL DE HIDROLOGIA PARA OBRAS VIALES BASADO EN EL USO DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA*. Bogota: ResearchGate.
- Castro, L. T. (2011). *Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones*. Cuenca.
- Castro, S. (2019). *Estudio de máximas avenidas en la cuenca del Río Moche*. Trujillo-Peru.
- Chavez. (2011). *Estudio Arqueologico en las cuencas media y bajas del rio Machangara*. Cuenca.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. California: Editorial Mc Graw Hill.
- Contreras, R. (2018). *SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA VIA INTERNET PARA EL MANEJO DE CUENCAS Y LOS DESASTRES NATURALES. REAXION*.

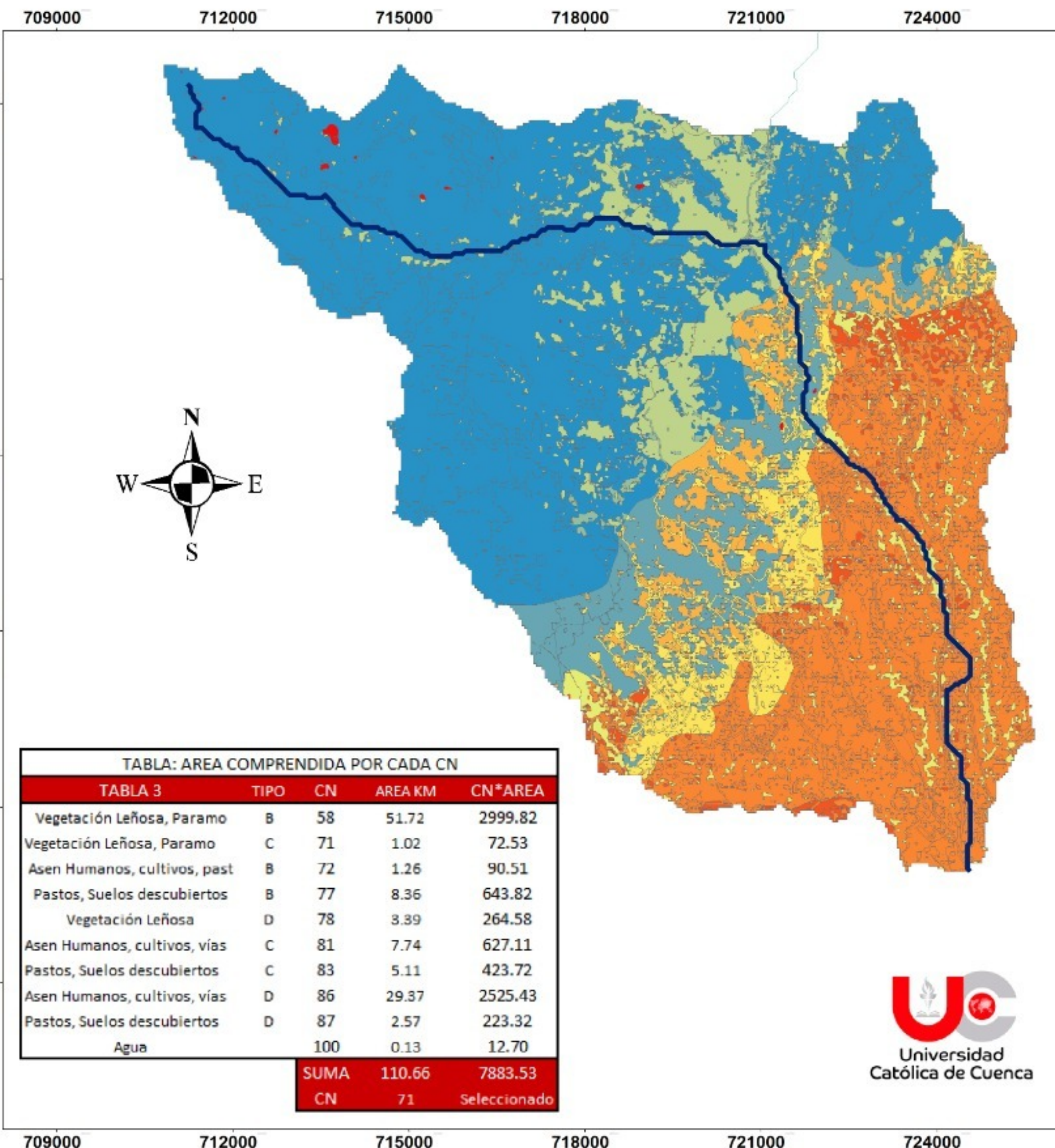
- Cotler, H. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Mexico D.F.: Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- Diez, J. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Fundación, BBVA .
- Ejército(US), C. d. (2016). *Manual de Referencia Hidráulica HECRAS*. CALIFORNIA, US.
- ELEC AUSTRO. (2019). *ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/centrales-y-represas/represa-chanlud/>
- García, M. (2014). *La hidrología y su papel en la ingeniería del agua*.
- Gimenez. (1998). Manual de Referencia Hidráulica. 122.
- Guido, P. (2015). Curso básico de hidráulica fluvial. *Seminario Internacional de Potamología* , (pág. 50). Ciudad de Mexico.
- Ibáñez, A. (2018). *Valores de número de curva* . Valencia: Produccion Vegetal.
- Lopez, J. (2012). Caracterización del modelo Hec-Hms en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Scielo*.
- Lopez, S. (2018). Modelación Hidrológica e Hidráulica requeridas durante eventos extremos. *CETA*, 81.
- MECCA, J. C. (2008). *Análisis y Modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomas y Bajo Giuliani Santa Rosa, La Pampa*.
- Mejía, L. (2011). APLICACION DE LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA LA TOMA DE DECISIONES. . *RECAI*, 18.
- Merida, S. (05 de 11 de 2020). *INTA*. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_catedra_libre_del_agua_silvia_merida_1_.pdf
- Nanía, L. (2007). *Manual Básico de Hec-Hms y Hec-GeoHMS*. Granada.
- Oliveras, J. (2013). *Hidrojing*. Obtenido de <https://www.hidrojing.com/condiciones-de-contorno-en-hec-ras/>
- Ordoñez, J. (2011). *Ciclo Hidrológico*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ortega, E. (2012). *ELABORACIÓN DE MAPAS TIPO ATLAS PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA*. CUENCA-ECUADOR.

- Pascual. (2016). Guia practica sobre la modelacion hidrológica y el modelo HEC-HMS. *CIVILSCAPE*, 155.
- Pascual, A. (2016). *Guia practica sobre la modelacion hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Madrid: CIVILSCAPE.
- Perez, A. (2013). *ESTUDIO PARA DETERMINAR LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Y SU IMPACTO EN LA CAPACIDAD DE LA RED DE ALCANTARILLADO EN LOS COLECTORES DE LAS CALLES RIRUMBA E IMBABURA*. Cuenca.
- Pín, A. (2018). *Modelacion hidrológica de la cuenca del Río Jipijapa, cantón Jipijapa de la provincia de Manabí*. Manabí.
- Porras, J. (2013). *ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO PARA EL DISEÑO DEL PUENTE SOBRE LA QUEBRADA BLANCH RUTA NACIONAL 801*. San Jose.
- Rodriguez, F. (2006). Cuencas Hidrograficas, Descentralizacion y Desarrollo Regional Participativo. *redalyc* , 15.
- Salazar. (2018). Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias. *Tecnología y Ciencias del agua*, 28.
- Sánchez, J. (2015). *Hec-Hms Manual Elemental*. Salamanca-España.
- Sánchez, L. (2017). *Modelacion Hidrológica e Hidraulica acoplada de la cuenca media y baja del rio Magdalena*. Bogota-Colombia.
- Triviño, A. (2001). *SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA Y MODELIZACIONES HIDROLOGICAS*. Kingston.
- Umaña, B. (2014). *Analisis Hidrológico de la cuenca del rio Toyogres utilizando el modelo Hec-Hms*. Costa Rica.
- USAID. (1993). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C.
- Varona, M. (2018). *Modelo Hidrológico de la cuenca Catamayo-Chira hasta el ingreso al reservorio Poechos Usando Hec-Hms*. Piura.
- Villa, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrologia Superficial*. Ciudad de Mexico: Universidad Autonoma Metropolitana .

Worschitz, R. O. (2018). *Topografía e Hidrografía*.

Zeas, R. (2001). *Establecimiento de un Plan de Manejo de Cuencas en Ríos Andinos (Macua)*. Cuenca.

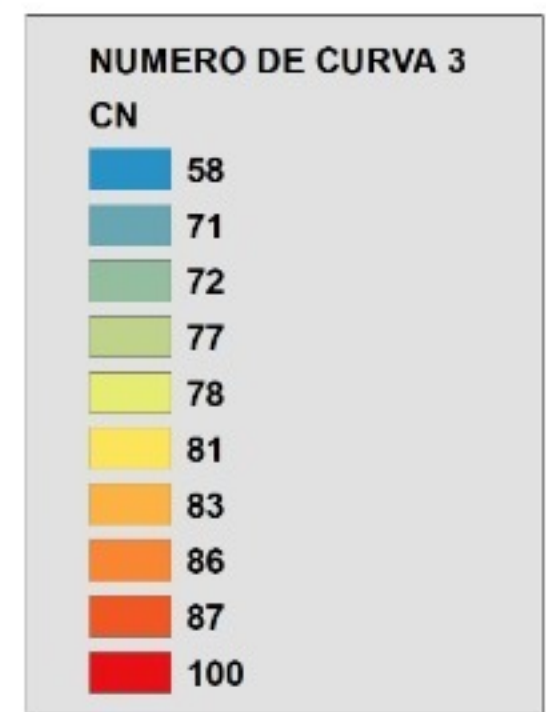
Anexos



NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA DE LA SUBCUENCA BAJA DEL RÍO MACHÁNGARA

TABLA: USO DEL SUELO VS CN

Valor	Descripcion	A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Medio Residencial	57	72	81	86
3	Area Forestal	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87



Tipo de Suelo	Característica
A	Franco arenosos
B	Franco limosos
C	Franco arenosos arcillosos
D	Franco arcillosos

Elaborado por: David Mendez
Geovanny Vasquez

Coordinate System: PSAD 1956 Transverse Mercator
Projection: Transverse Mercator
Datum: Provisional S American 1956



NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA DE LA SUBCUENCA ALTA DEL RÍO MACHÁNGARA

TABLA: USO DEL SUELO VS CN

Valor	Descripcion	A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Medio Residencial	57	72	81	86
3	Area Forestal	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87

NÚMERO DE CURVA 1 CN

	30
	58
	67
	72
	77
	100

Tipo de Suelo	Característica
A	Franco arenosos
B	Franco limosos
C	Franco arenosos arcillosos
D	Franco arcillosos

Elaborado por: David Mendez
Geovanny Vasquez

Coordinate System: PSAD 1956 Transverse Mercator
Projection: Transverse Mercator
Datum: Provisional S American 1956

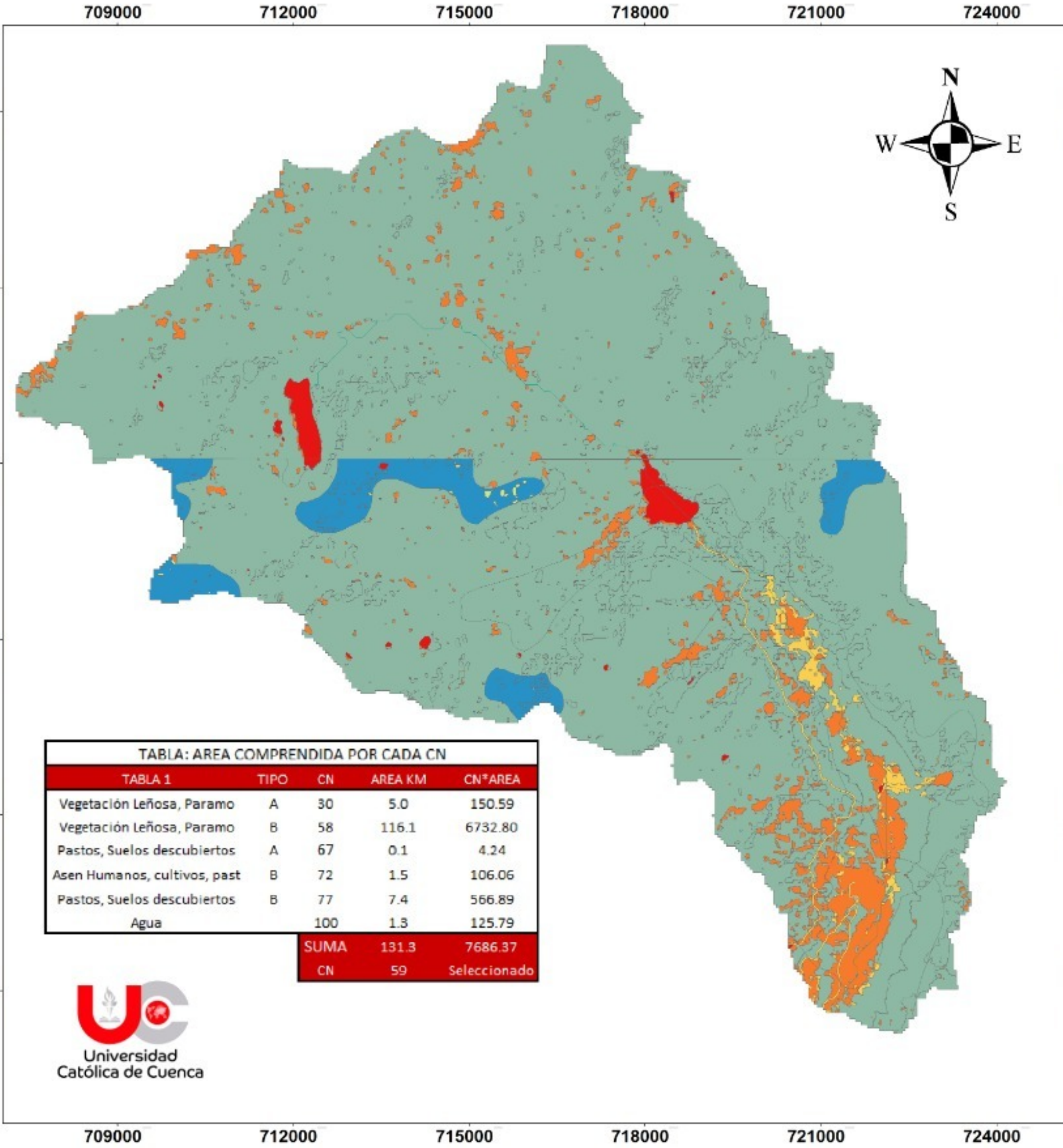


TABLA: AREA COMPRENDIDA POR CADA CN

TABLA 1	TIPO	CN	AREA KM	CN*AREA
Vegetación Leñosa, Paramo	A	30	5.0	150.59
Vegetación Leñosa, Paramo	B	58	116.1	6732.80
Pastos, Suelos descubiertos	A	67	0.1	4.24
Asen Humanos, cultivos, past	B	72	1.5	106.06
Pastos, Suelos descubiertos	B	77	7.4	566.89
Agua		100	1.3	125.79
SUMA			131.3	7686.37
CN			59	Seleccionado



709000

712000

715000

718000

721000

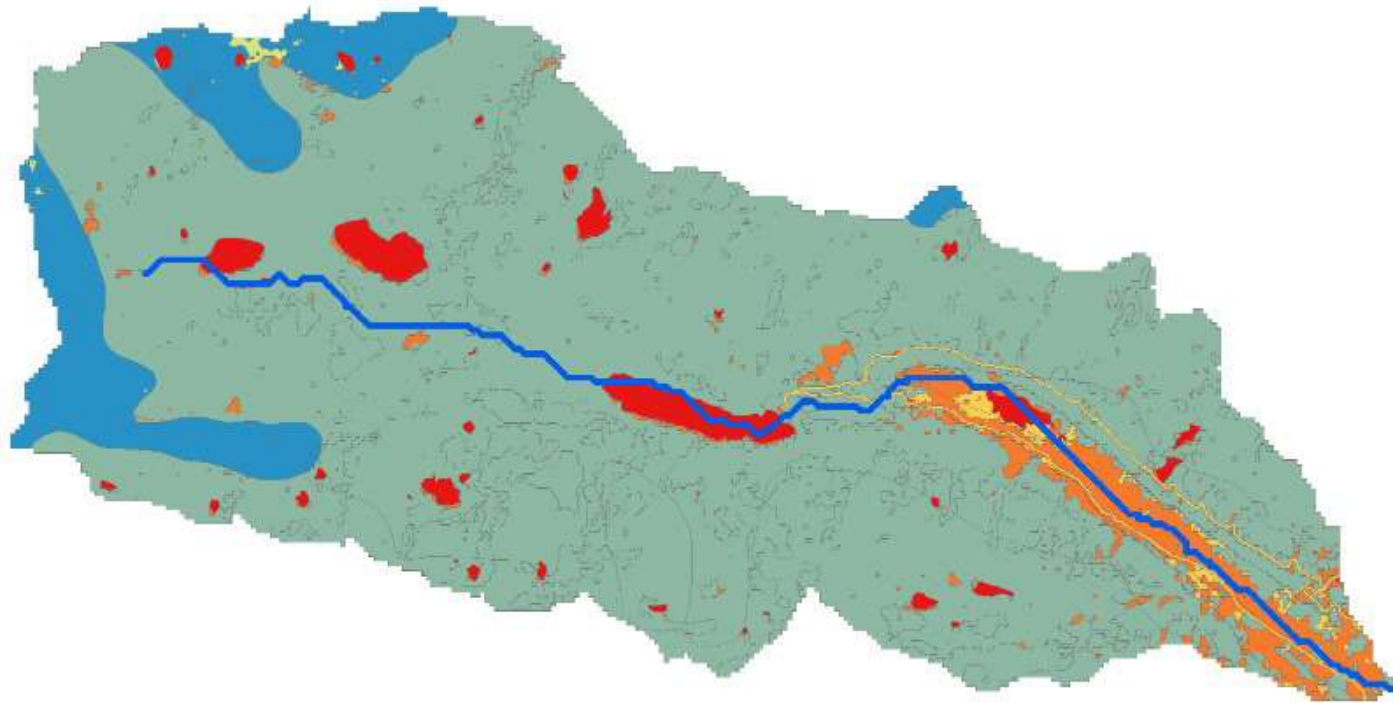
9705000

9702000

9699000

9696000

9693000



NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA DE LA SUBCUENCA MEDIA DEL RÍO MACHÁNGARA

TABLA: USO DEL SUELO VS CN

Valor	Descripcion	A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Medio Residencial	57	72	81	86
3	Area Forestal	30	58	71	78
4	Agricultura	67	77	83	87

NÚMERO DE CURVA 2

CN

■	30
■	58
■	67
■	72
■	77
■	100

TABLA: AREA COMPRENDIDA POR CADA CN				
TABLA 2	TIPO	CN	AREA KM	CN*AREA
Vegetación Leñosa, Paramo	A	30	5.68	170.5
Vegetación Leñosa, Paramo	B	58	54.20	3143.4
Pastos, Suelos descubiertos	A	67	0.11	7.5
Asen Humanos, cultivos, past	B	72	0.88	63.4
Pastos, Suelos descubiertos	B	77	2.95	227.4
Agua		100	1.96	195.6
SUMA			65.78	3807.7
CN			58	Seleccionado

Tipo de Suelo	Característica
A	Franco arenosos
B	Franco limosos
C	Franco arenosos arcillosos
D	Franco arcillosos

Elaborado por: David Mendez
Geovanny Vasquez

Coordinate System: PSAD 1956 Transverse Mercator
Projection: Transverse Mercator
Datum: Provisional S American 1956

709000

712000

715000

718000

721000

ANEXO 4

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 25 AÑOS)

725100

725400

725700

9682500

9682500

9682200

9682200

9681900

9681900

9681600

9681600

9681300

9681300

725100

725400

725700

PROFUNDIDAD



High : 4.8 (m)

Low : 0 (m)



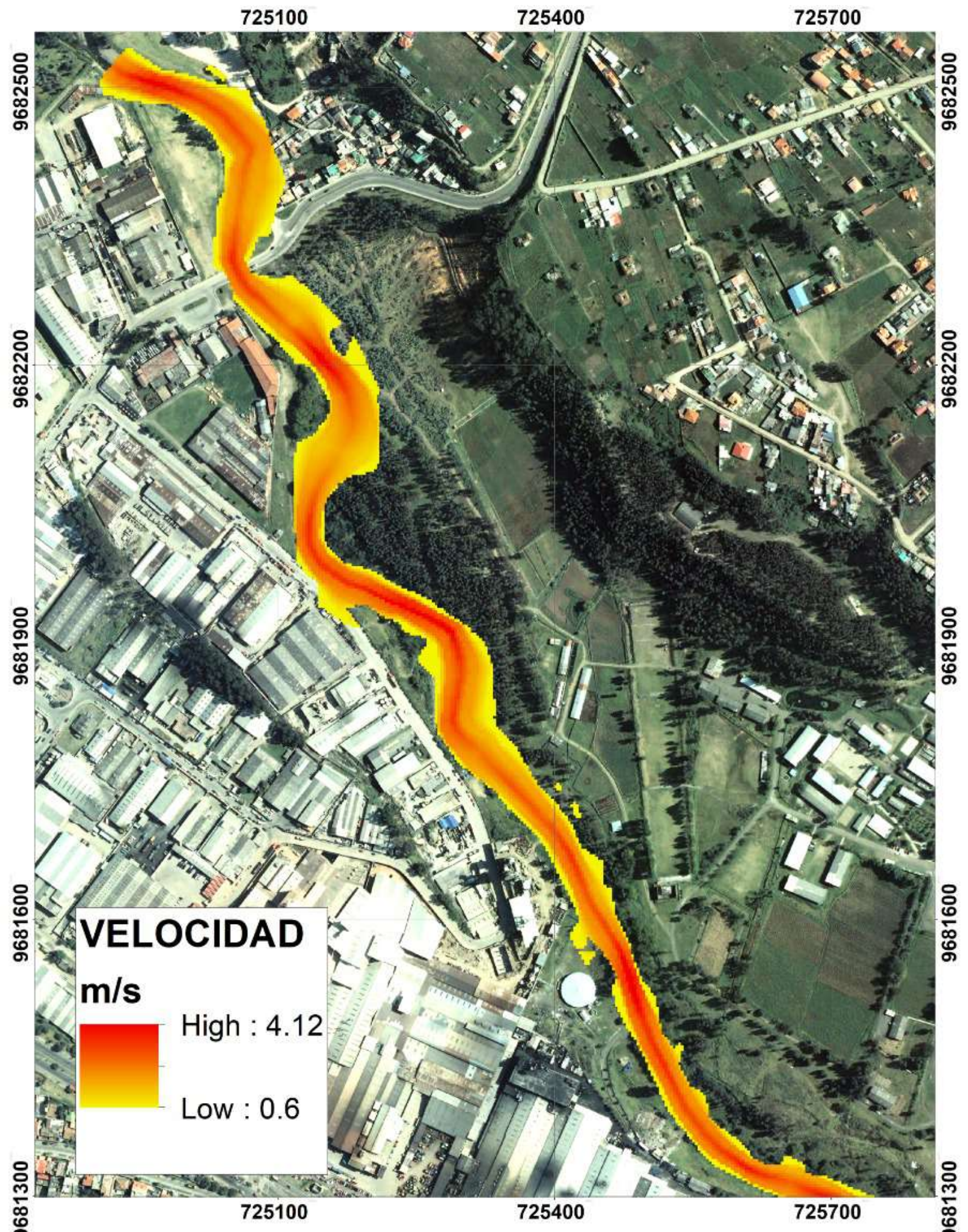
ANEXO 5

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 25 AÑOS)



ANEXO 6

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 25 AÑOS)



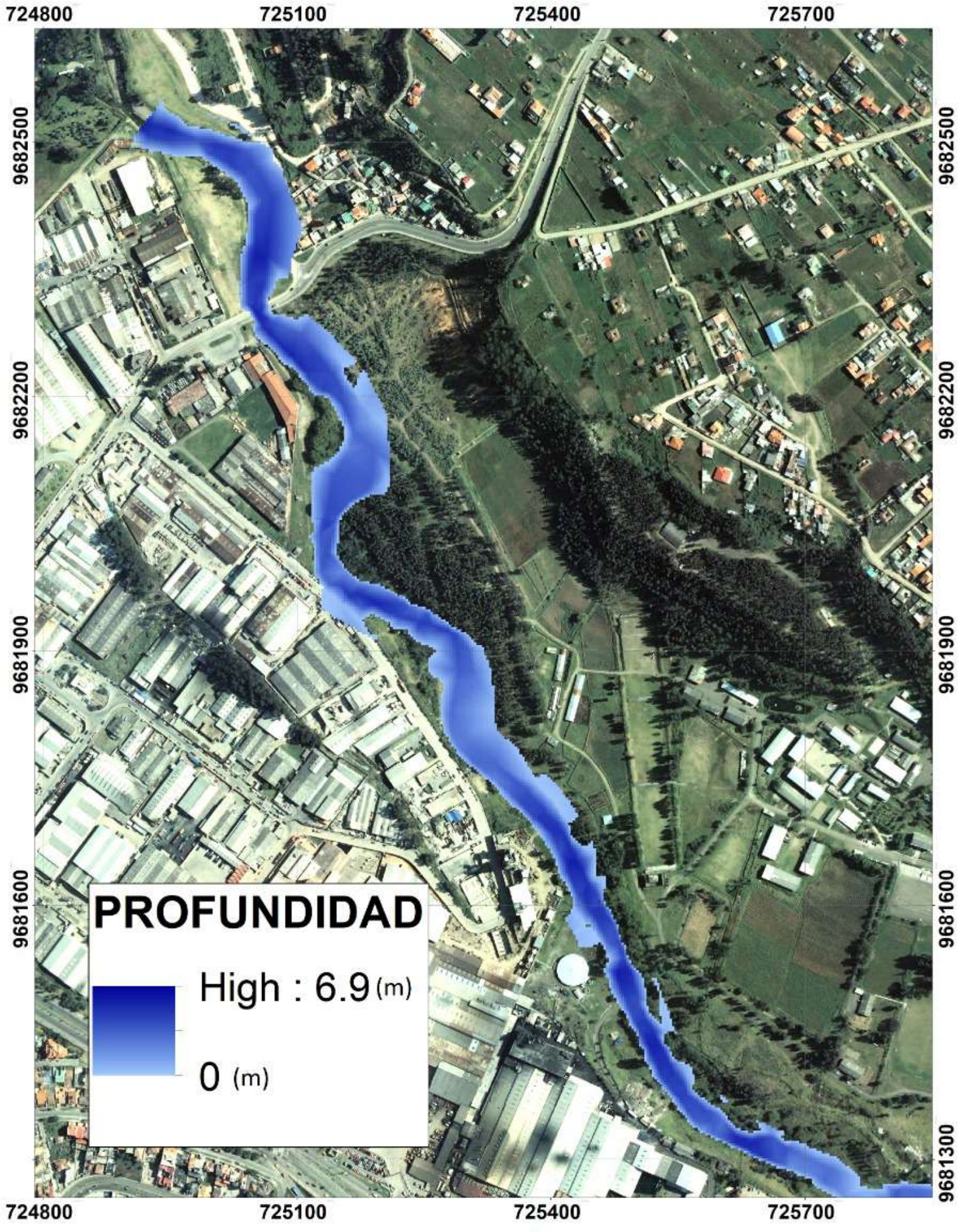
ANEXO 7

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 25 AÑOS)



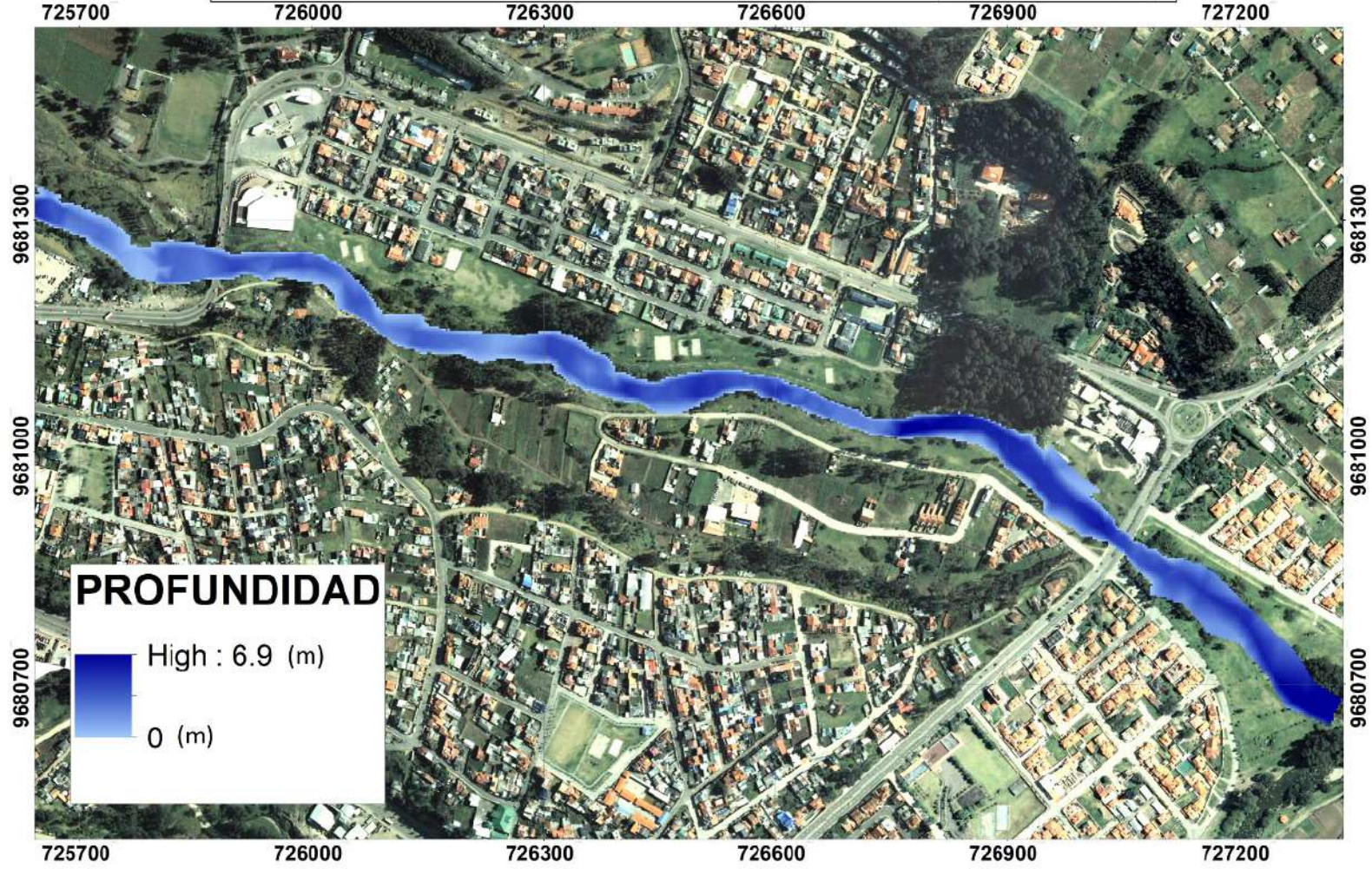
ANEXO 8

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 50 AÑOS)



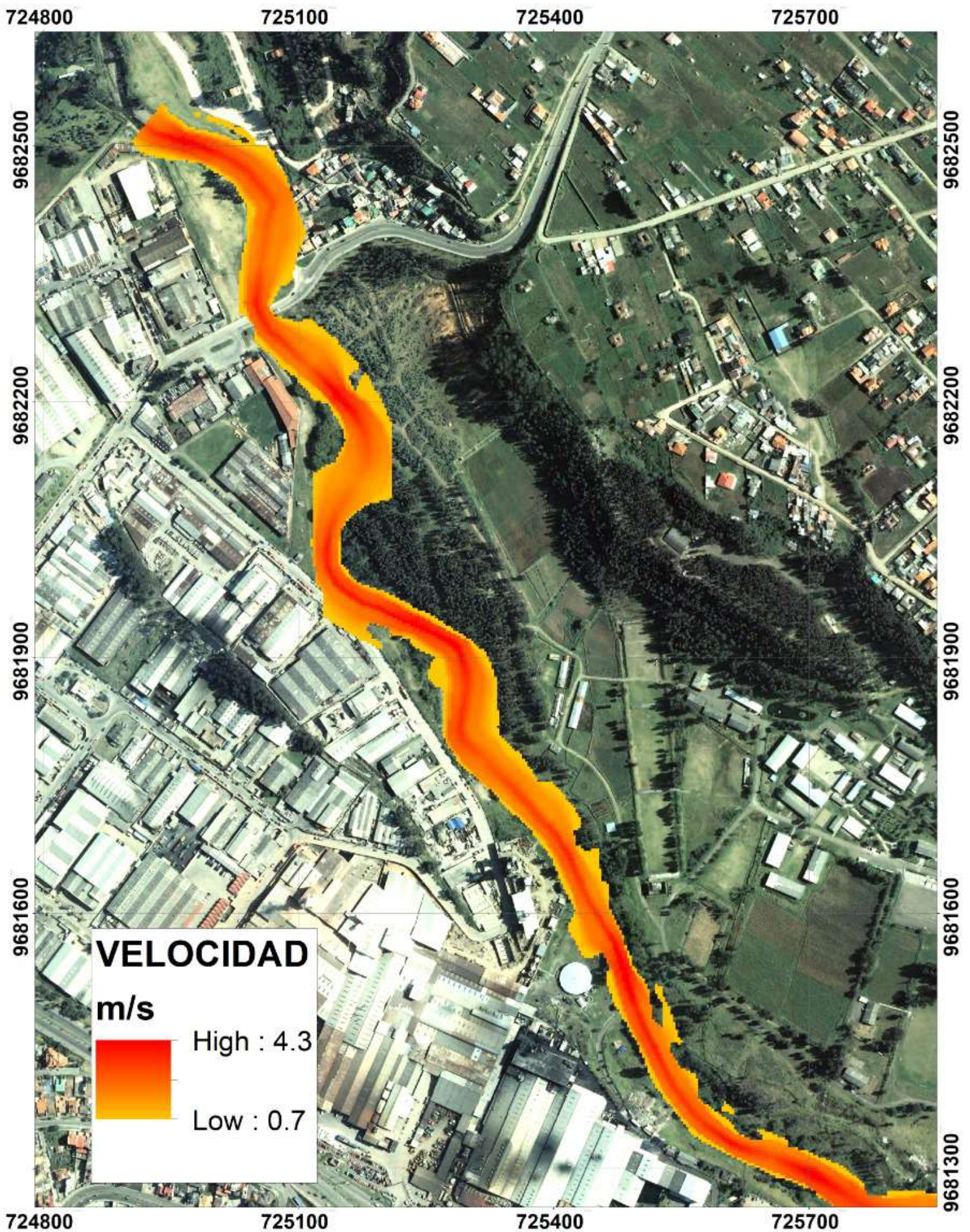
ANEXO 9

**MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA
DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 50 AÑOS)**



ANEXO 10

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 50 AÑOS)



ANEXO 11

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 50 AÑOS)



ANEXO 12

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 100 AÑOS)



ANEXO 13

**MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA
DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 100 AÑOS)**



ANEXO 14

**MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA
DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 100 AÑOS)**

725100

725400

725700

9682500

9682500

9682200

9682200

9681900

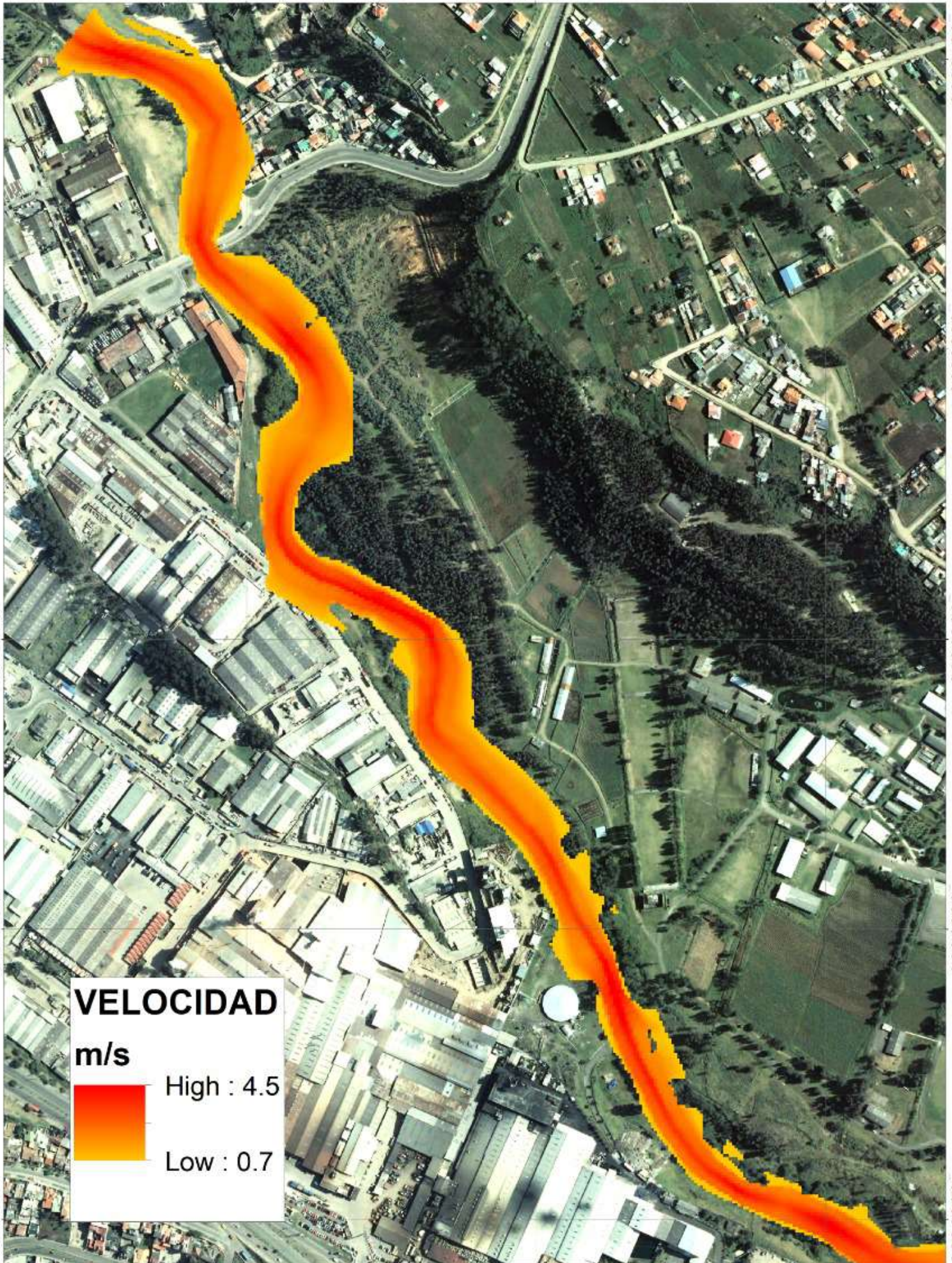
9681900

9681600

9681600

9681300

9681300



725100

725400

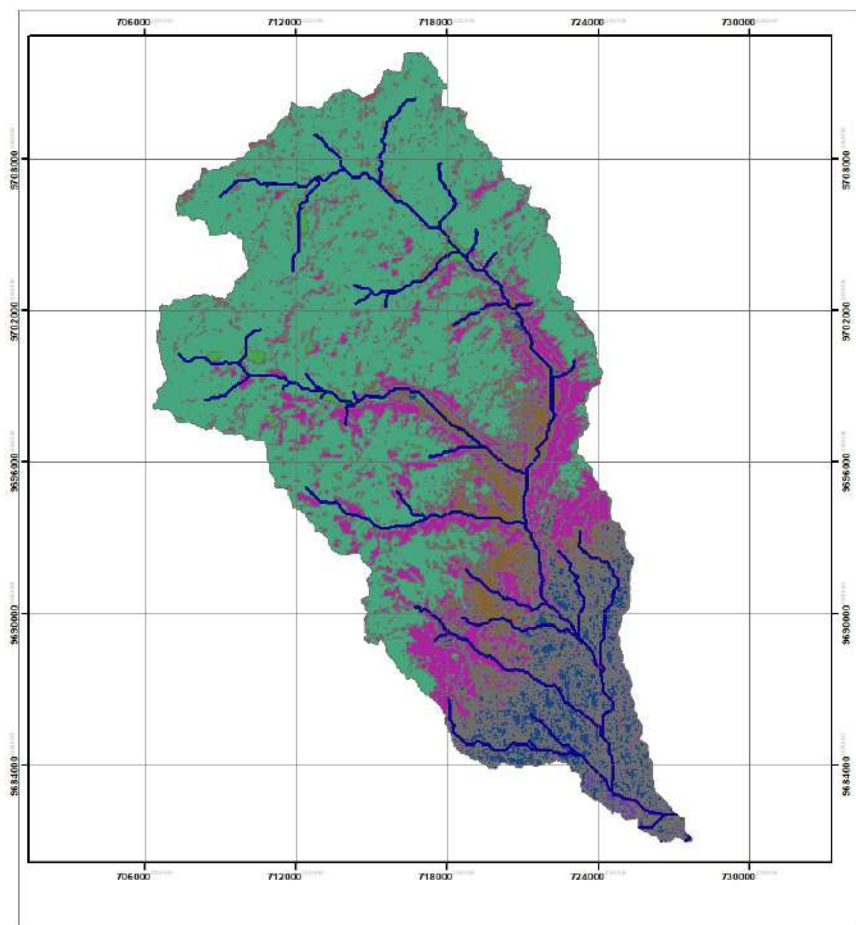
725700

ANEXO 15

MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN RIO MACHANGARA
DJ RIO CHULCO HASTA AJ RIO CUENCA (TR 100 AÑOS)



ANEXO 16



COBERTURA DEL SUELO-SUBCUENCA DEL MACHÁNGARA



Legend

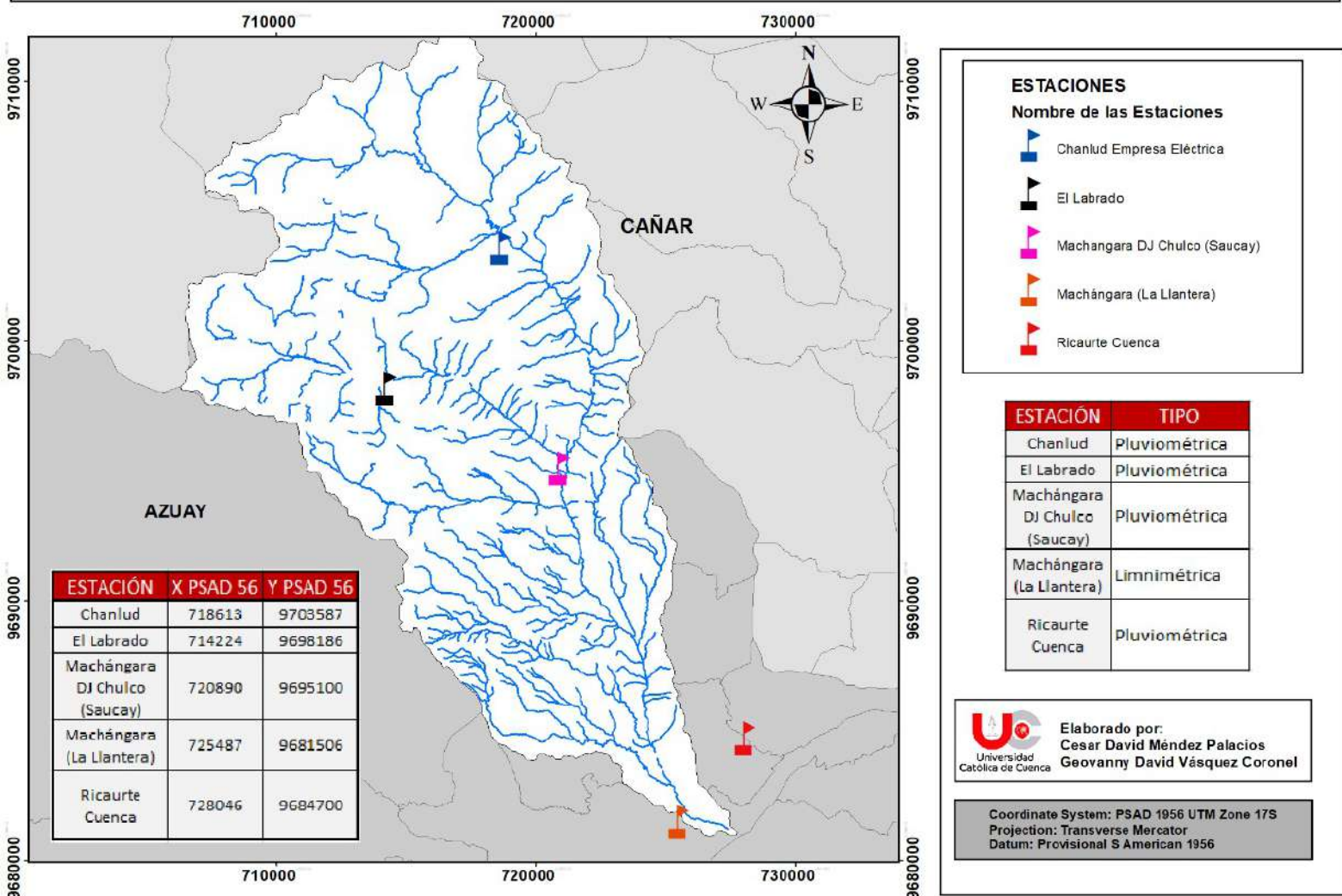
- RED_HIDRICA
- MACHANGARA_COBERTURA**
- <all other values>
- DESCRIPCIO**
- Agua
- Centros Poblados
- Cultivos
- Eucalipto y Matorral
- Eucaliptos y matorral abierto
- Matorral intervenido
- Mosaico: Veg leñosa, Asen Humanos, cultivos, past
- Paramo
- Pastos
- Suelo Descubierta
- Suelo descubierta, Matorral degradado y Asentamiento
- Vegetación Leñosa
- Vías

ELABORADO POR: DAVID MÉNDEZ
GEOVANNY VÁSQUEZ

ESCALA: 1.150.000

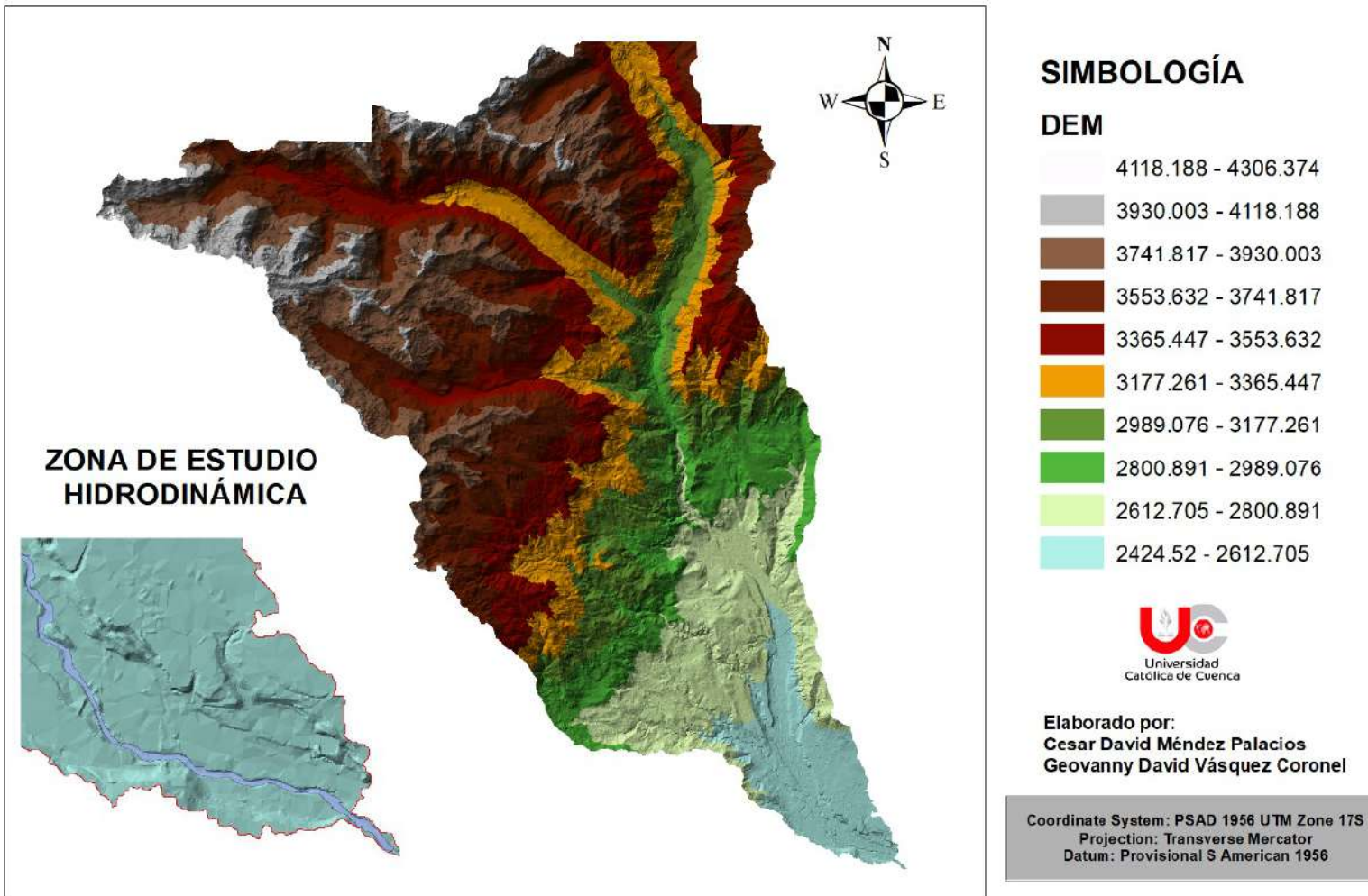
ANEXO 17

CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MACHÁNGARA ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS



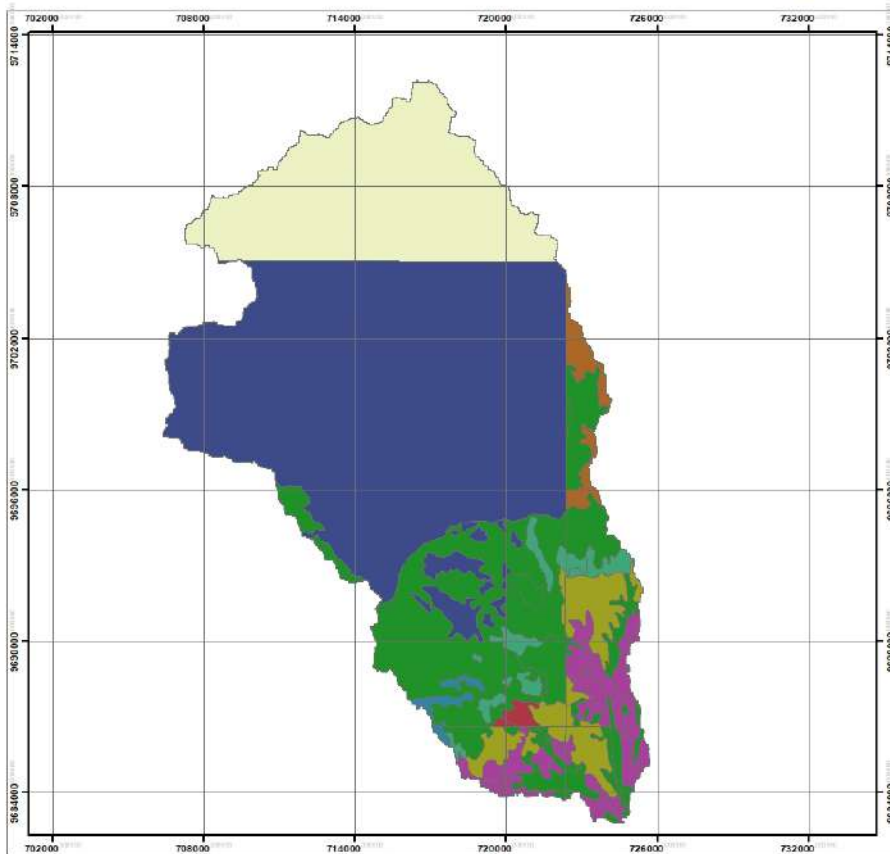
ANEXO 18

MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES - CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA



ANEXO 19

Uso Posible del suelo Cuenca Hidrográfica del Machángara



Legenda

Suelos_CRP_50k_UTM_SAM56_Cli

<all other values>

POSIB_USO

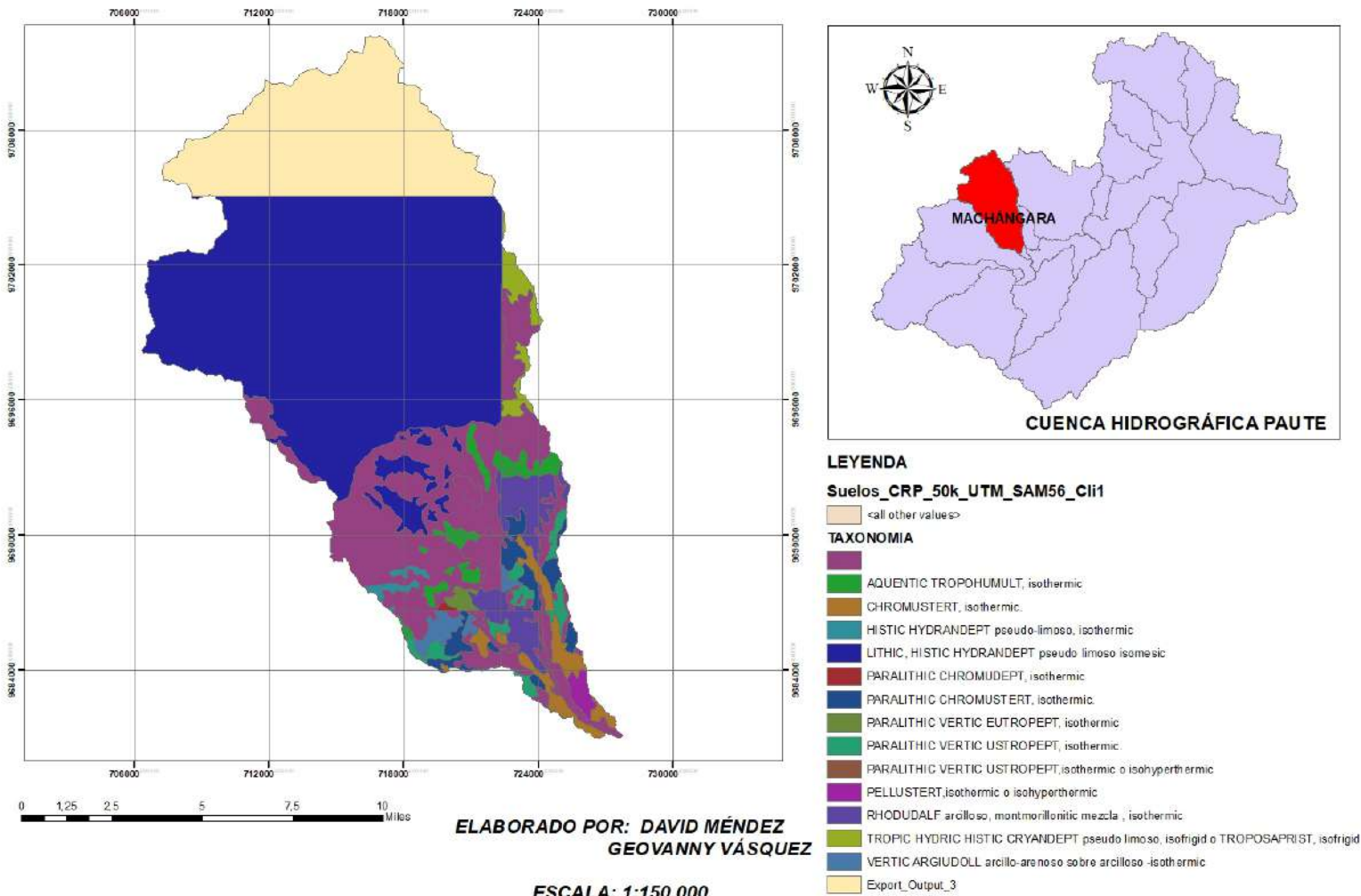
- Bosque muy humedo
- Maiz
- Nada
- Pastos con bajos rendimientos
- Pastos de bajos rendimientos
- Reforestacion
- Tierra templada fria: trigo, Tierra templada: Maiz, Tierra caliente: Arroz - algodón - pastos - caña
- Tierra templada: Pastos, Tierra caliente: Arroz, pastos
- ProyectArea

ELABORADO POR: DAVID MÉNDEZ
GEOVANNY VÁSQUEZ

ESCALA 1:150.000

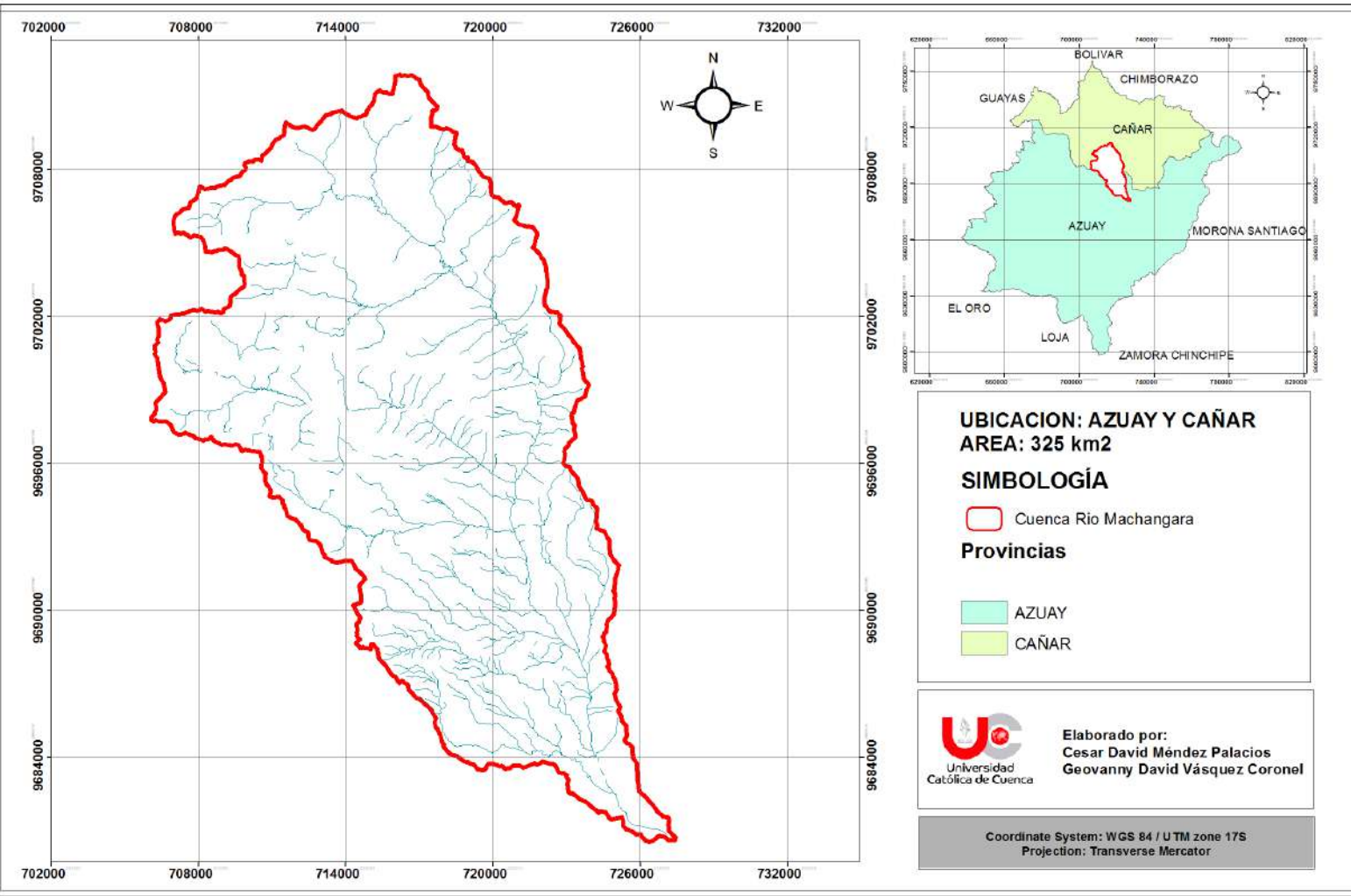
ANEXO 20

TAXONOMIA DEL SUELO CUENCA HIDROGRÁFICA MACHÁNGARA

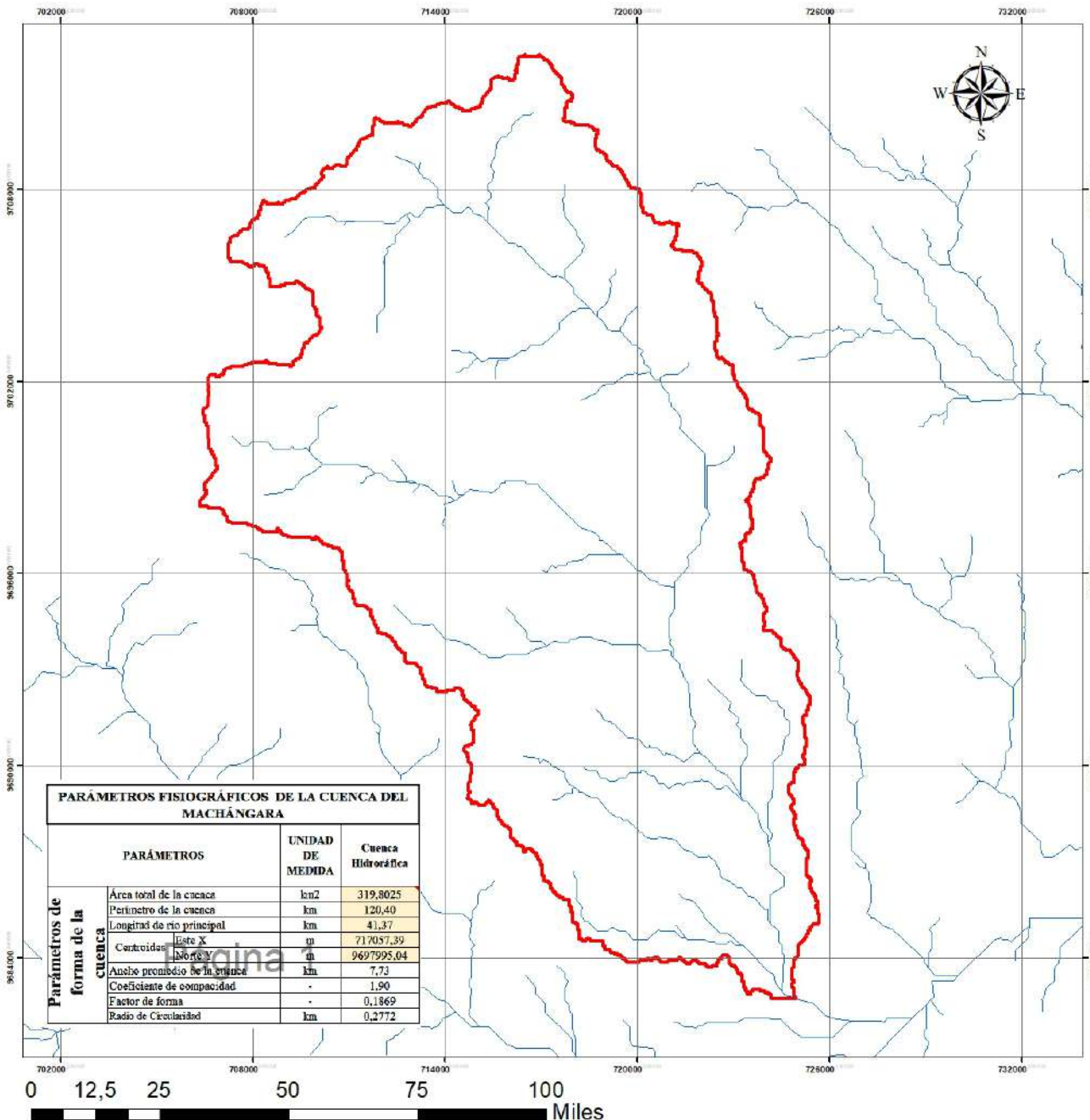


ANEXO 21

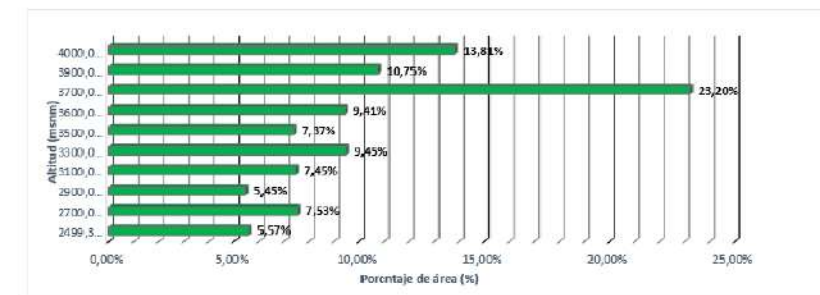
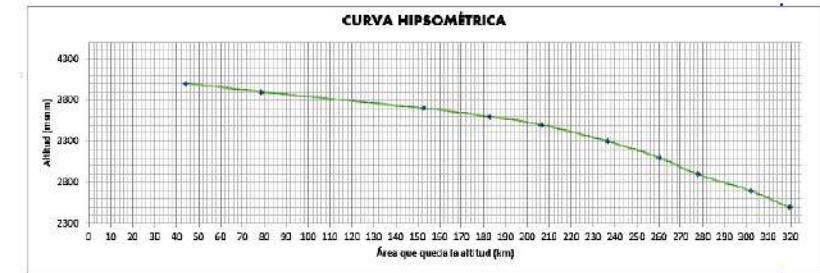
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MACHÁNGARA



Cuenca Hidrográfica del Machángara



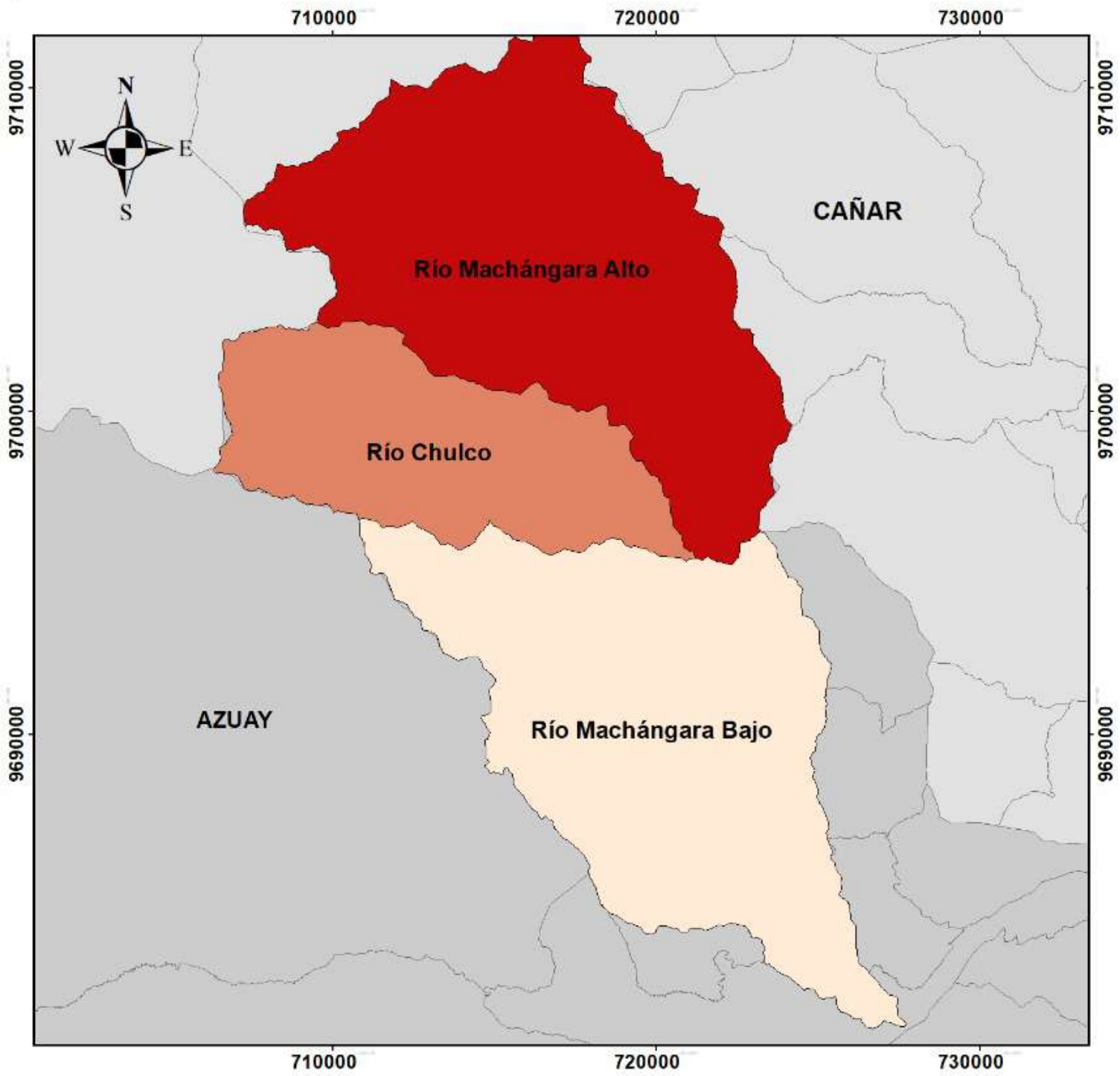
PARÁMETROS FISIográfICOS DE LA CUENCA DEL MACHÁNGARA		
PARÁMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	Cuenca Hidrográfica
Área total de la cuenca	km ²	319,8025
Perímetro de la cuenca	km	120,40
Longitud de río principal	km	41,37
Centroides Este X	m	717037,39
Centroides Norte Y	m	9697995,04
Ancho promedio de la cuenca	km	7,73
Coefficiente de compactación	-	1,90
Factor de forma	-	0,1869
Radio de Circularidad	km	0,2772



REALIZADO POR: DAVID MÉNDEZ
GEOVANNY VÁSQUEZ

ESCALA: 1:100.000

CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MACHÁNGARA "MICROCUENCAS" *ANEXO 23*



MICROCUENCAS

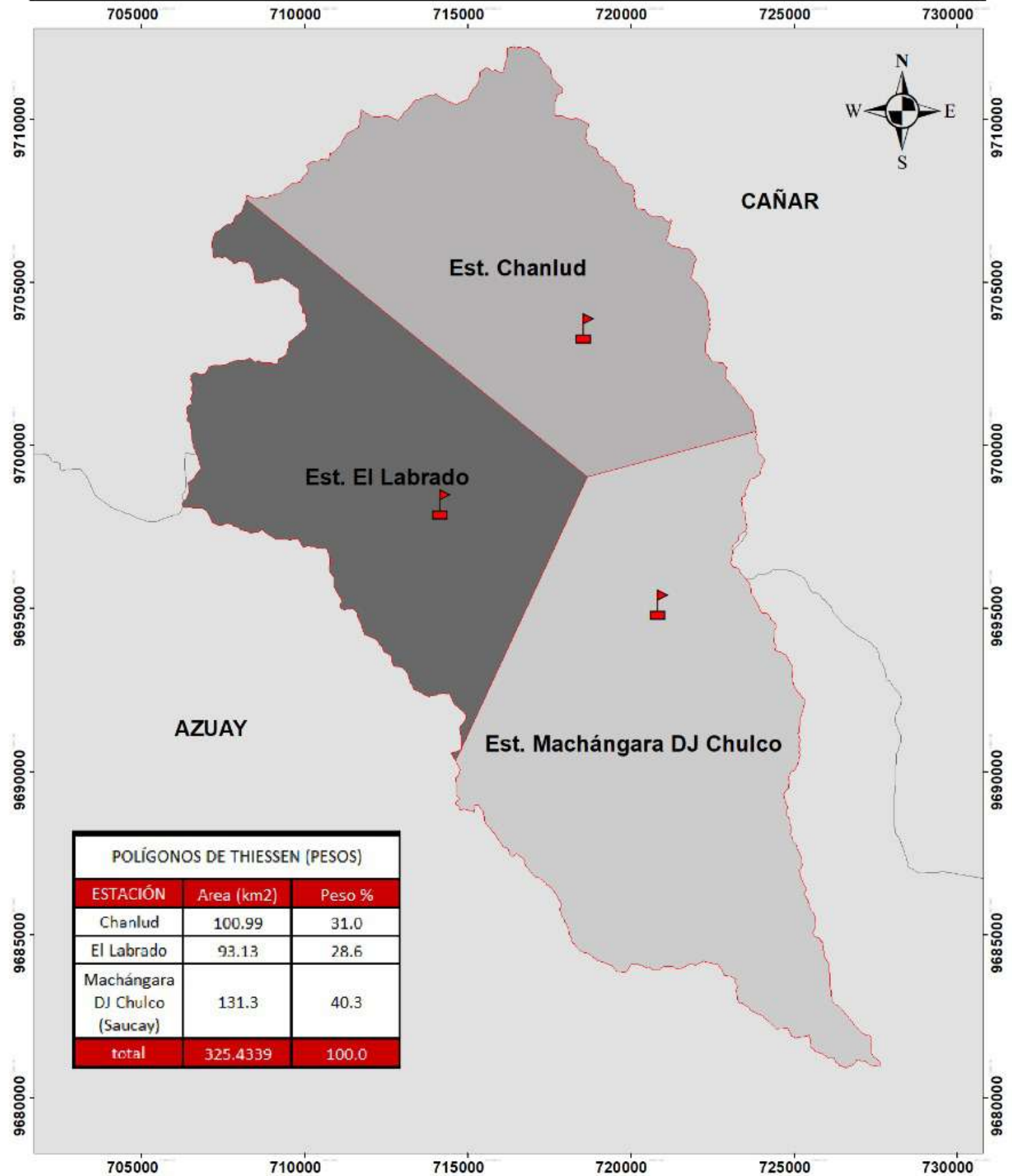
- Río Chulco
- Río Machángara Alto
- Río Machángara Bajo

NOMBRE	Area (km ²)	Perímetro (km)
Cuenca Alta del Río Machángara	132.1975	77.20
Cuenca del Río Chulco	66.1325	52.50
Cuenca Baja del Río Machángara	121.0125	70.50

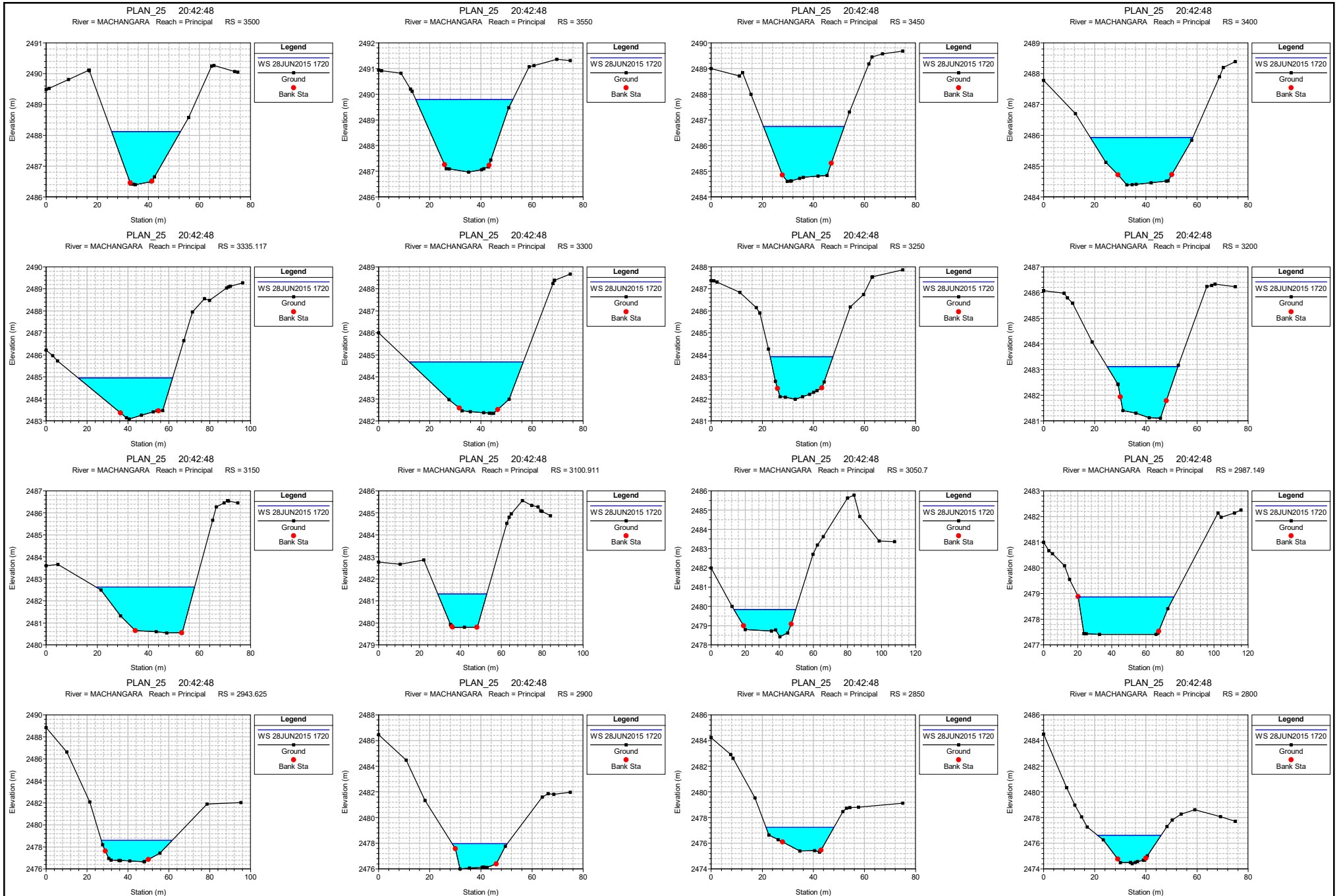

Elaborado por:
Cesar David Méndez Palacios
Geovanny David Vásquez Coronel

Coordinate System: PSAD 1956 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Provisional S American 1956

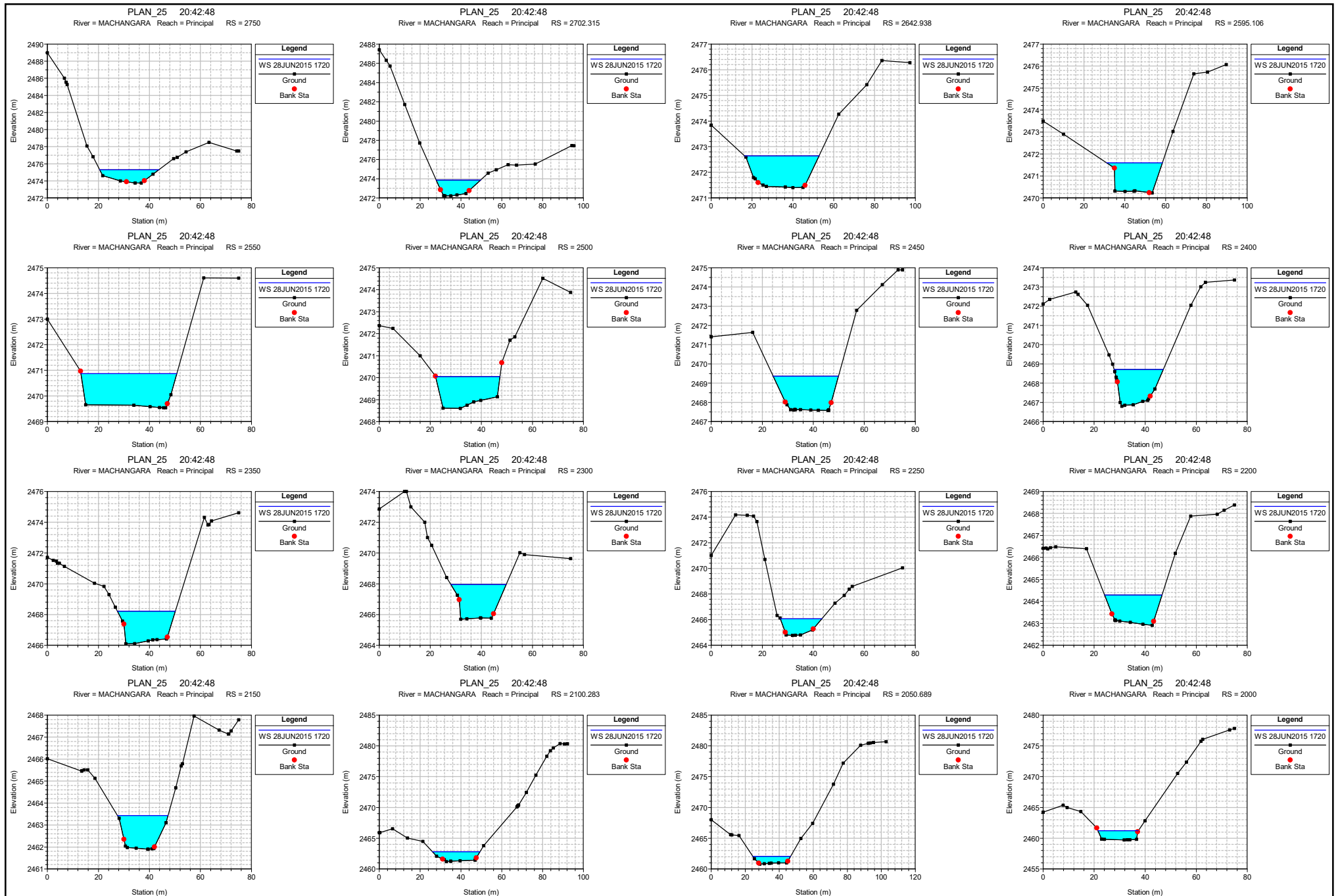
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MACHÁNGARA "POLÍGONOS DE THIESSEN" *ANEXO 24*



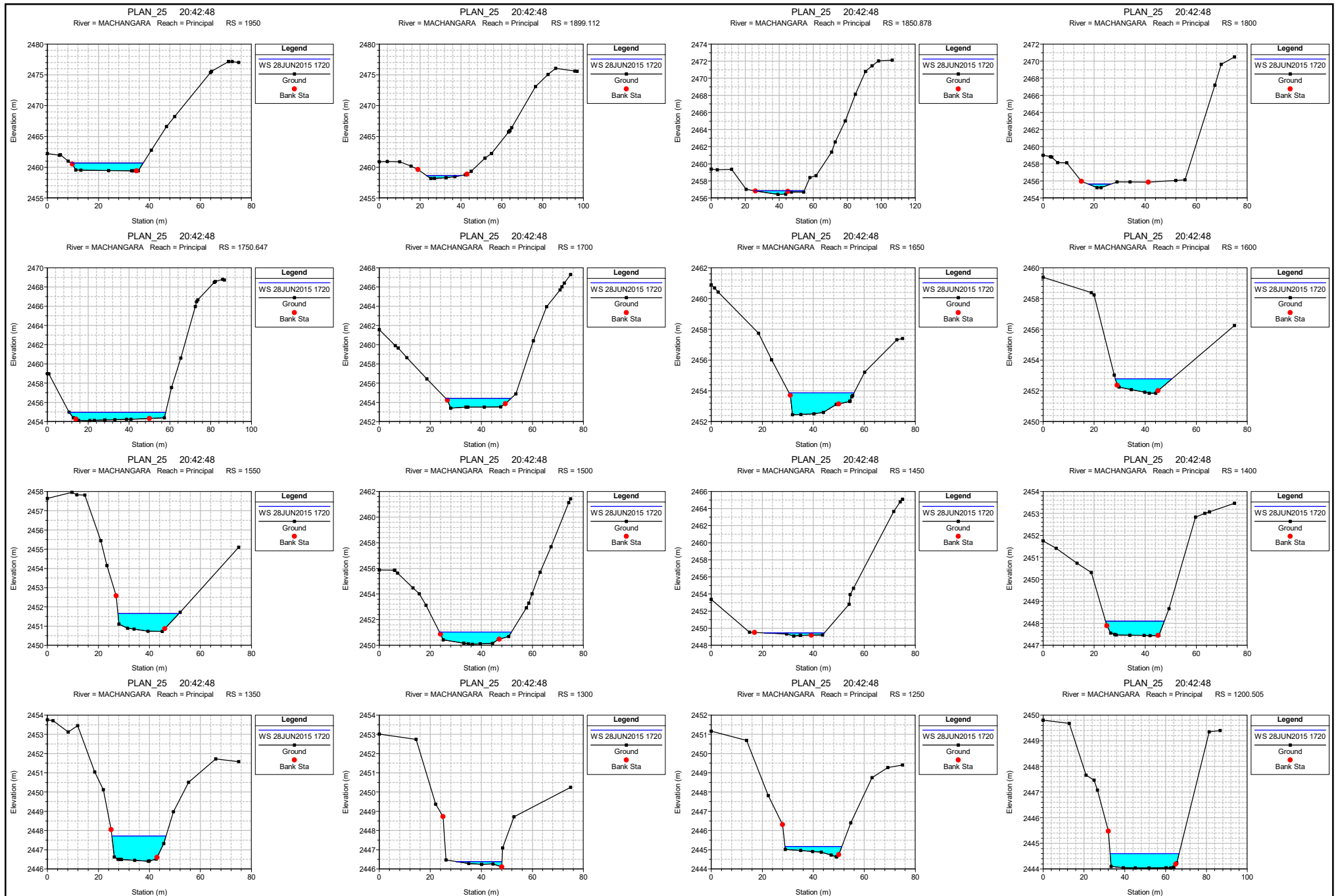
ANEXO 25



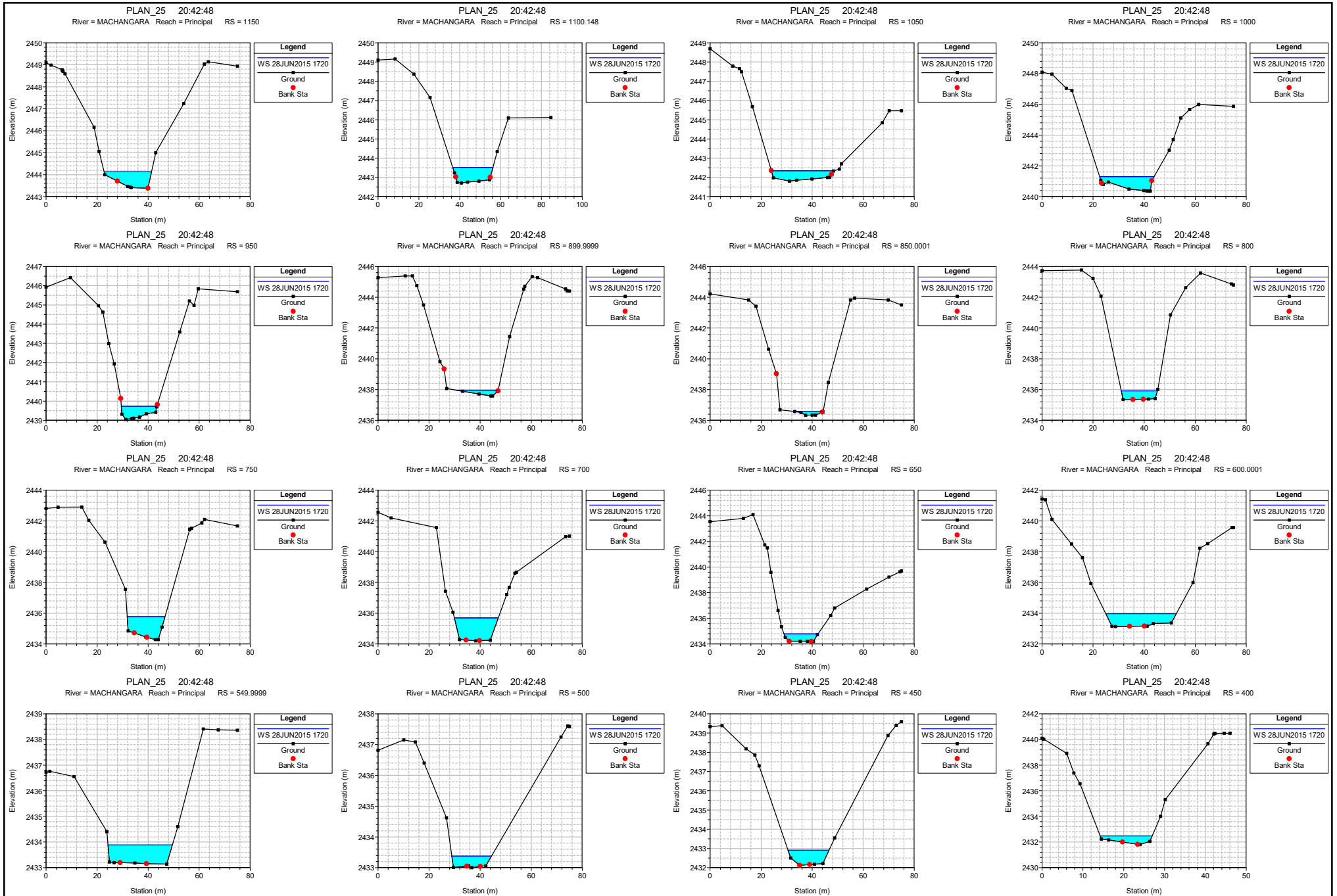
ANEXO 26



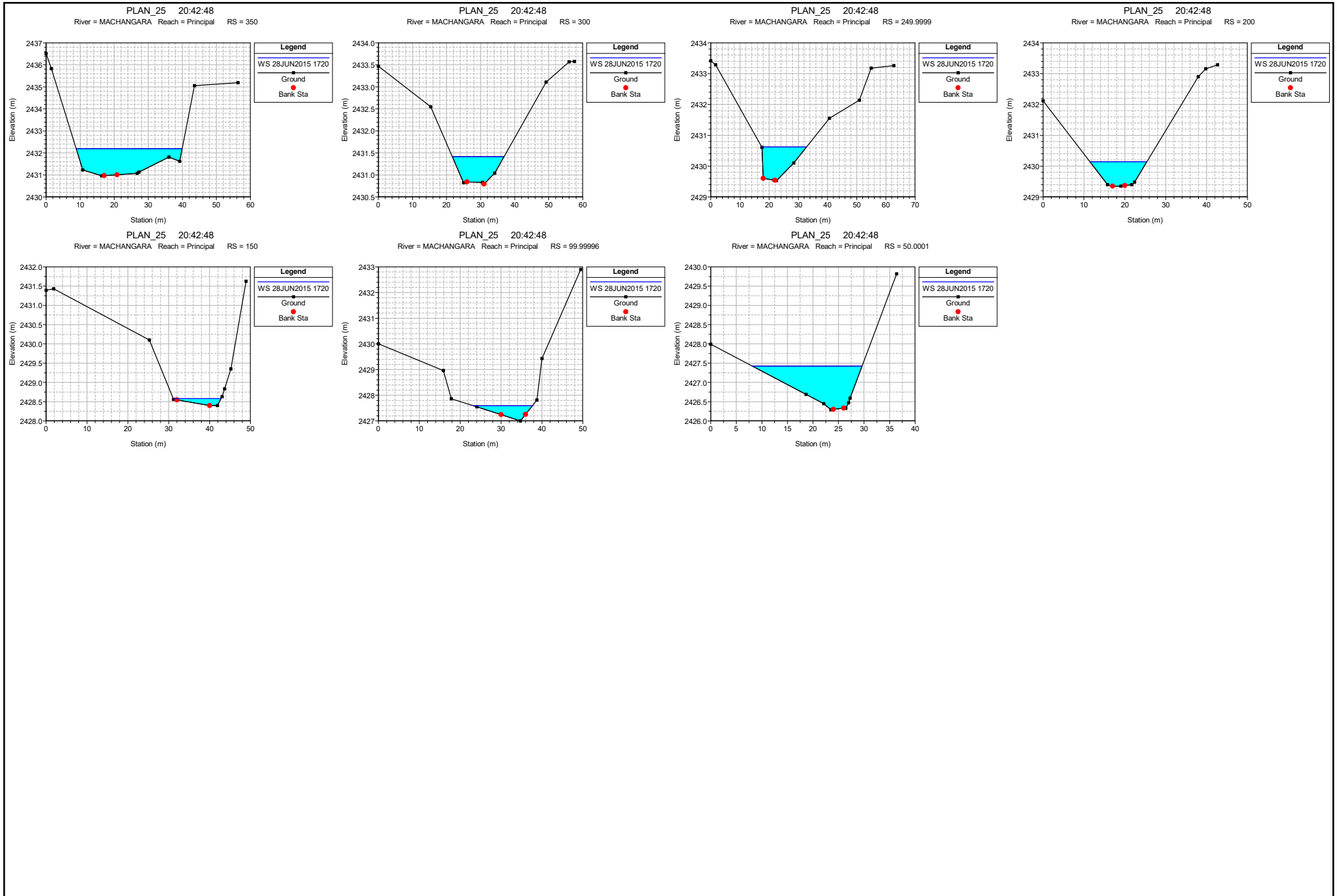
ANEXO 27



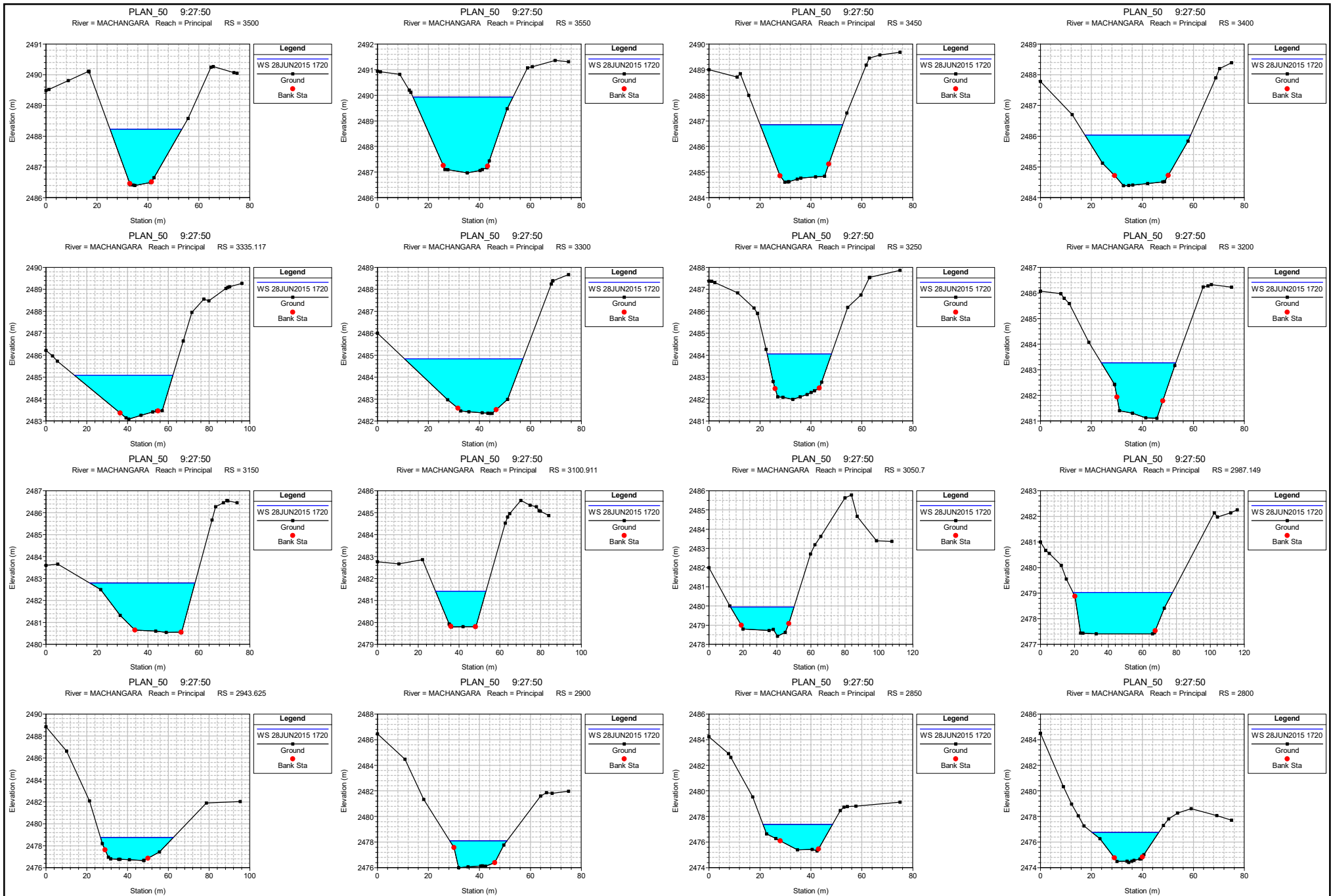
ANEXO 28



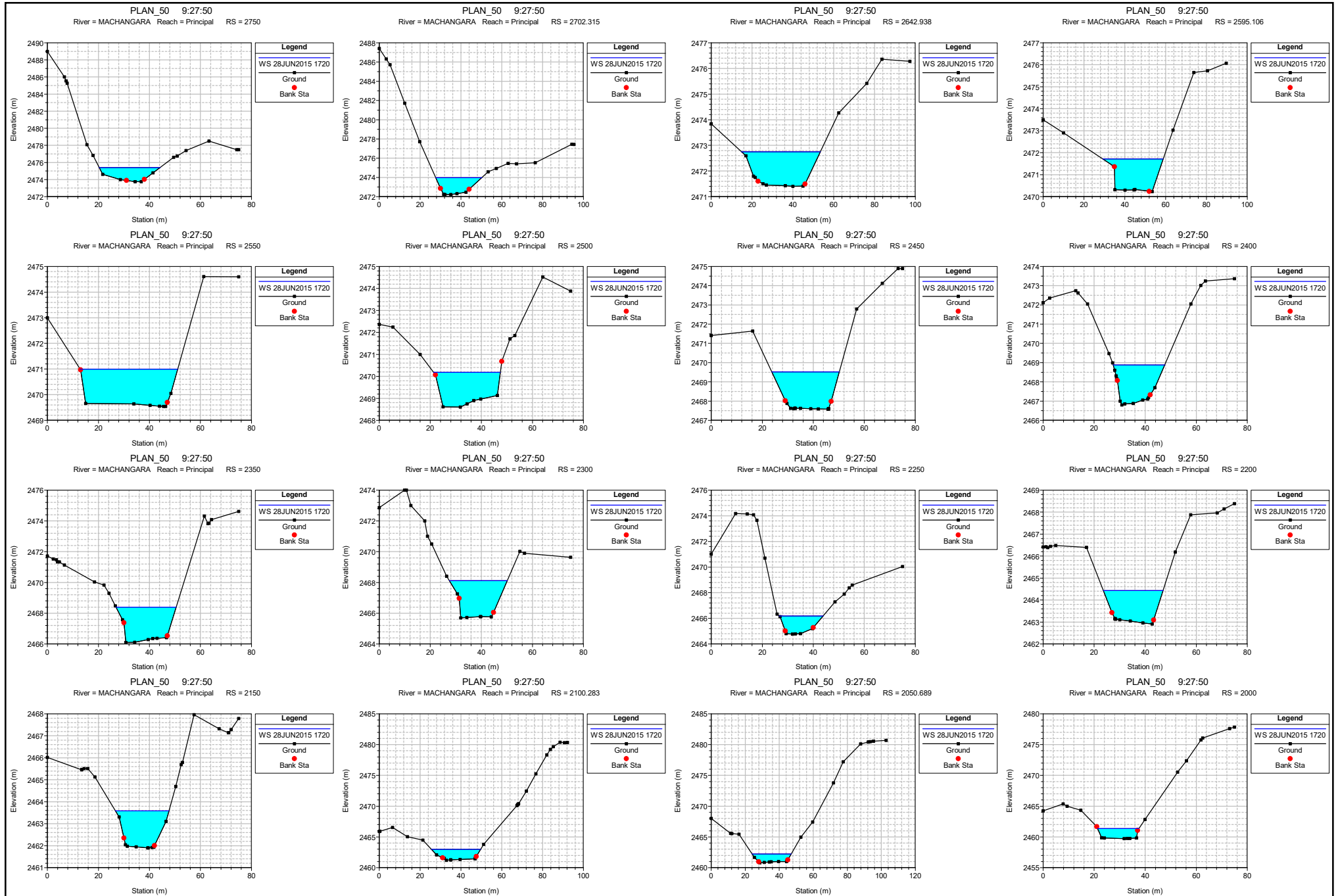
ANEXO 29



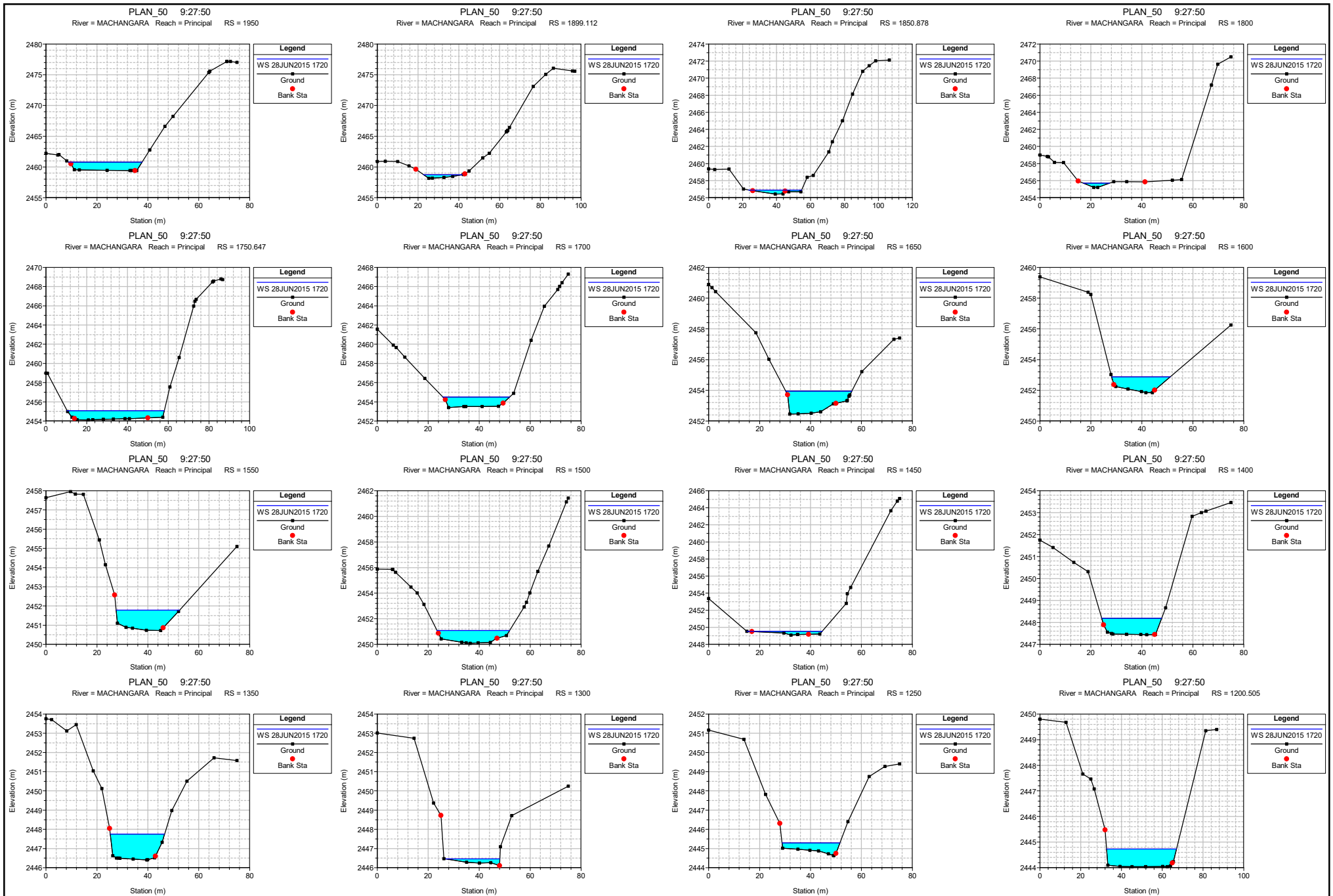
ANEXO 30



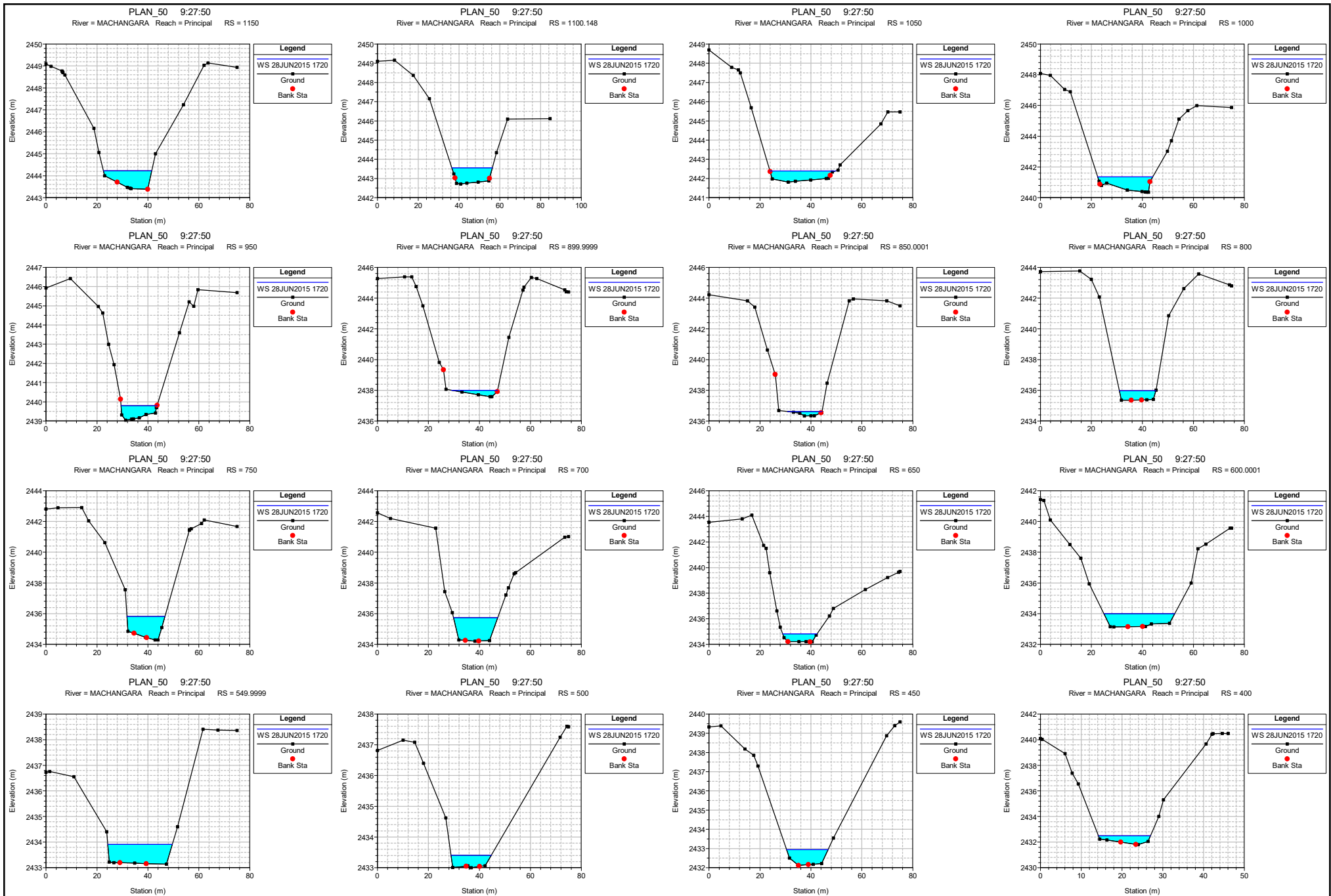
ANEXO 31



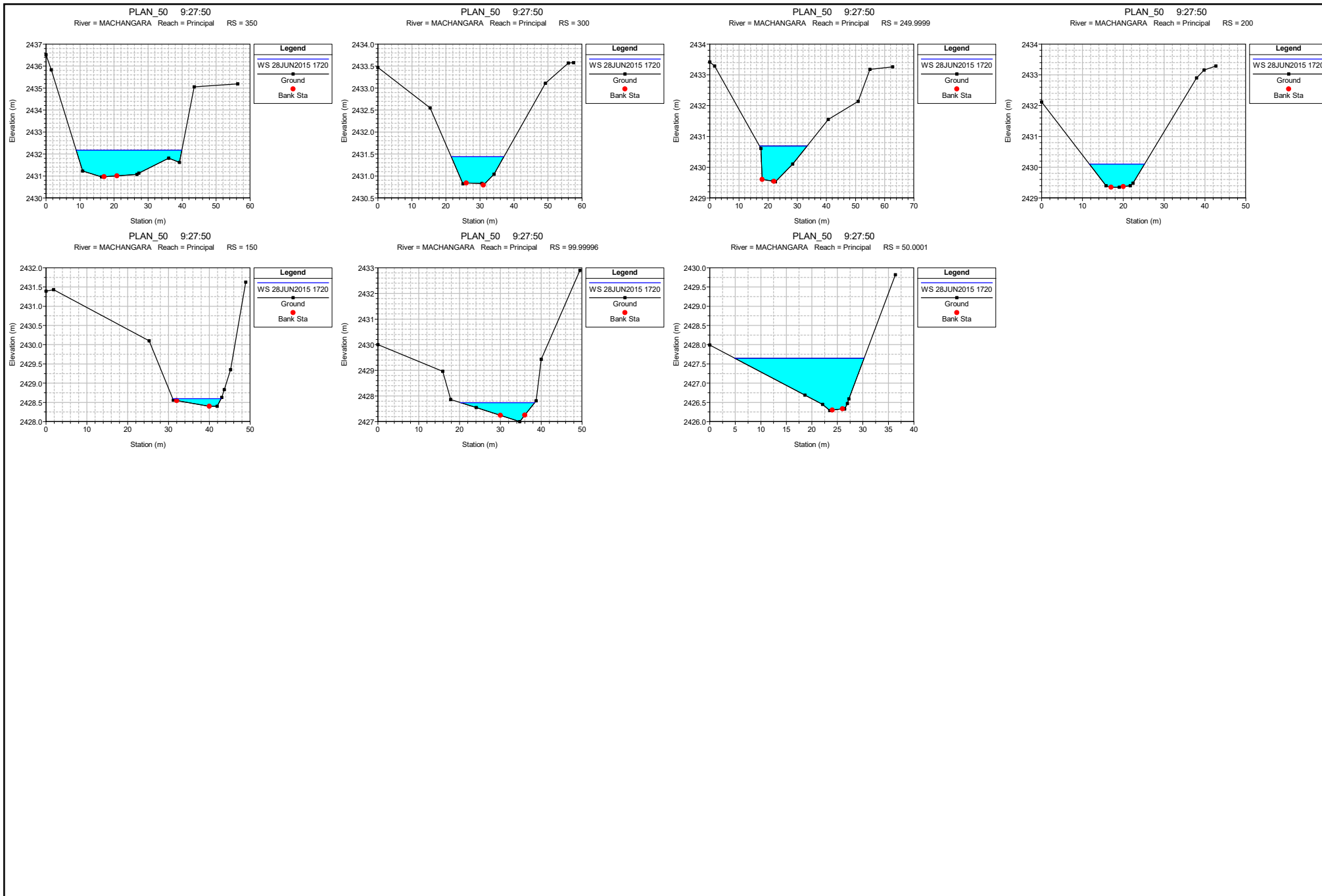
ANEXO 32



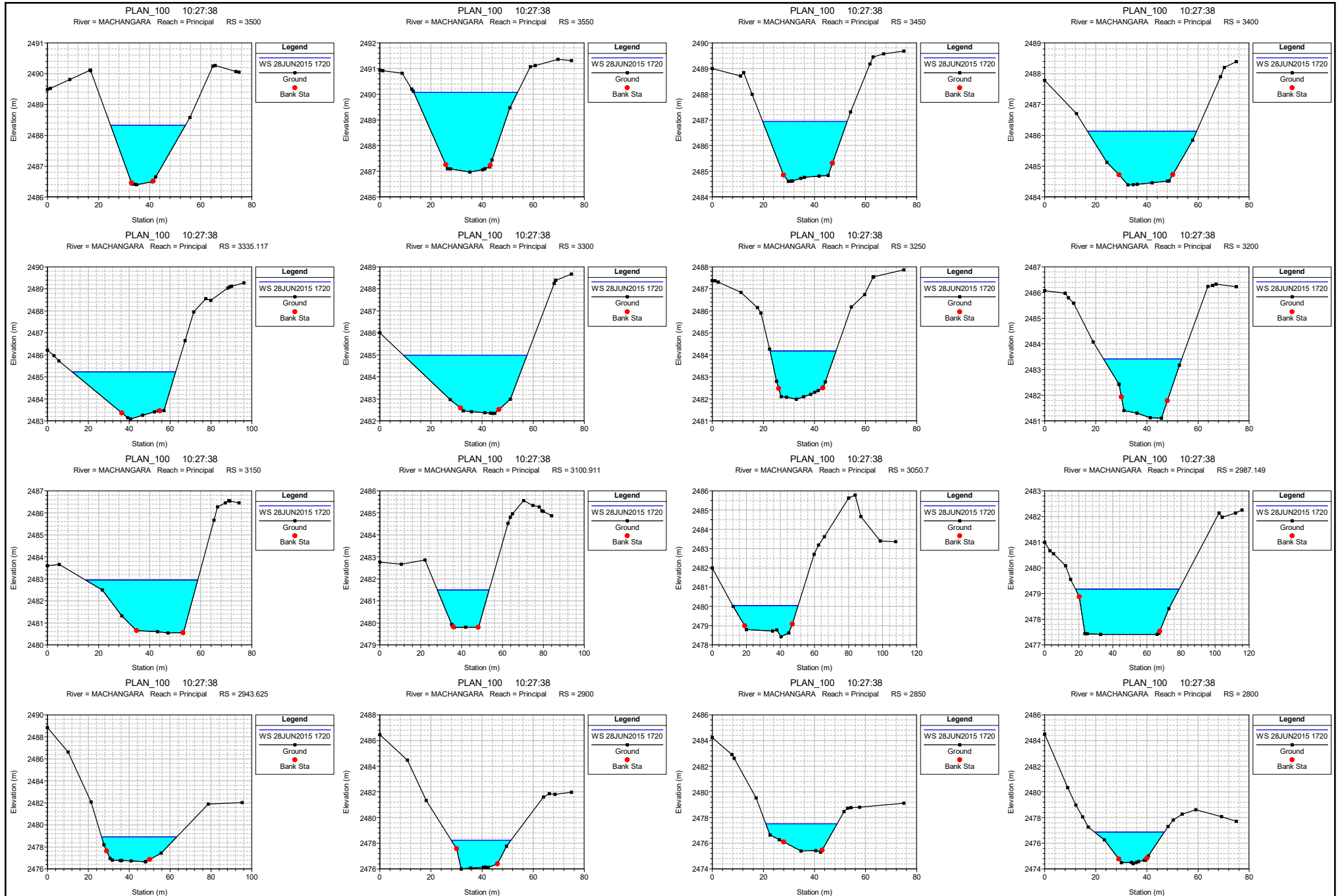
ANEXO 33



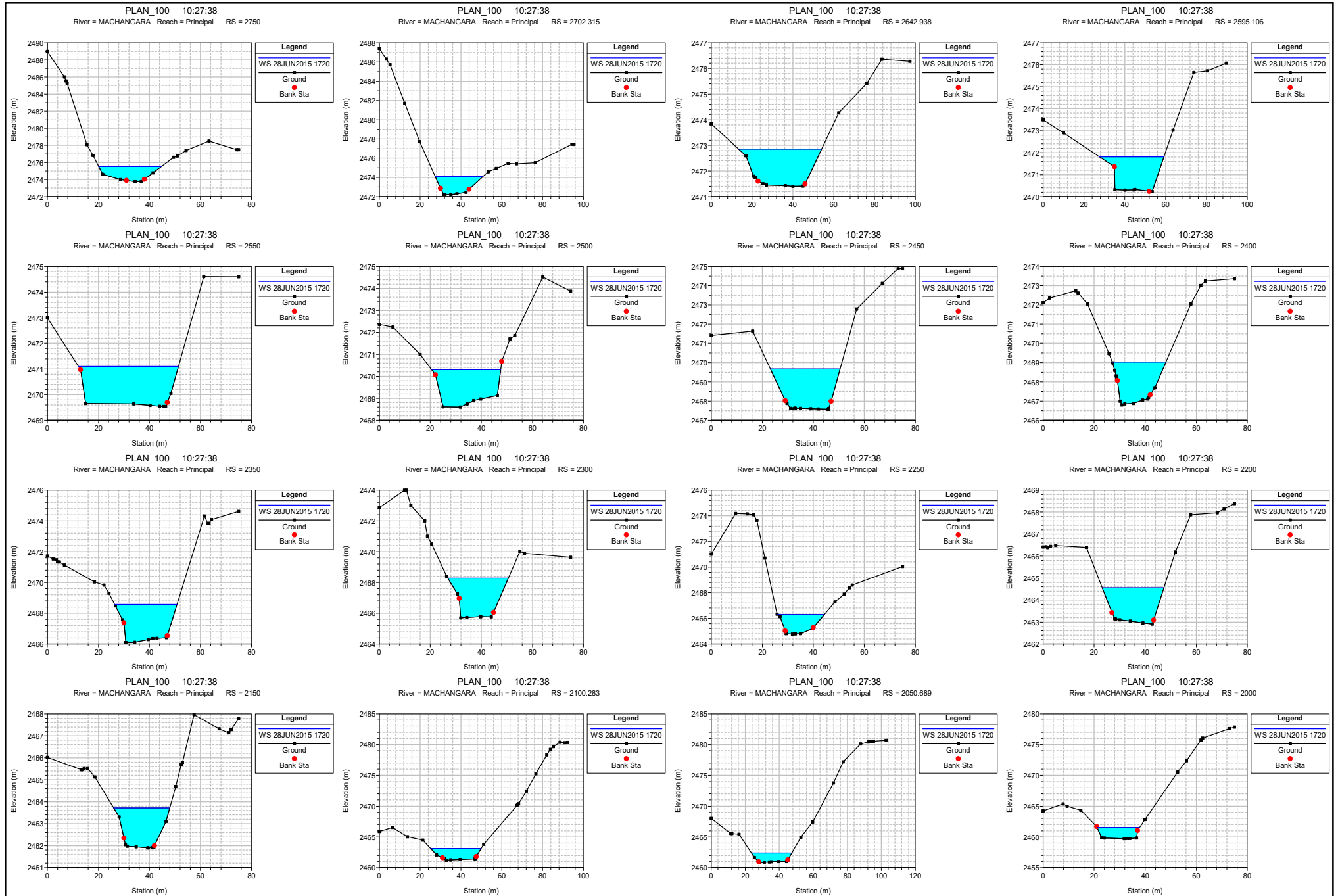
ANEXO 34



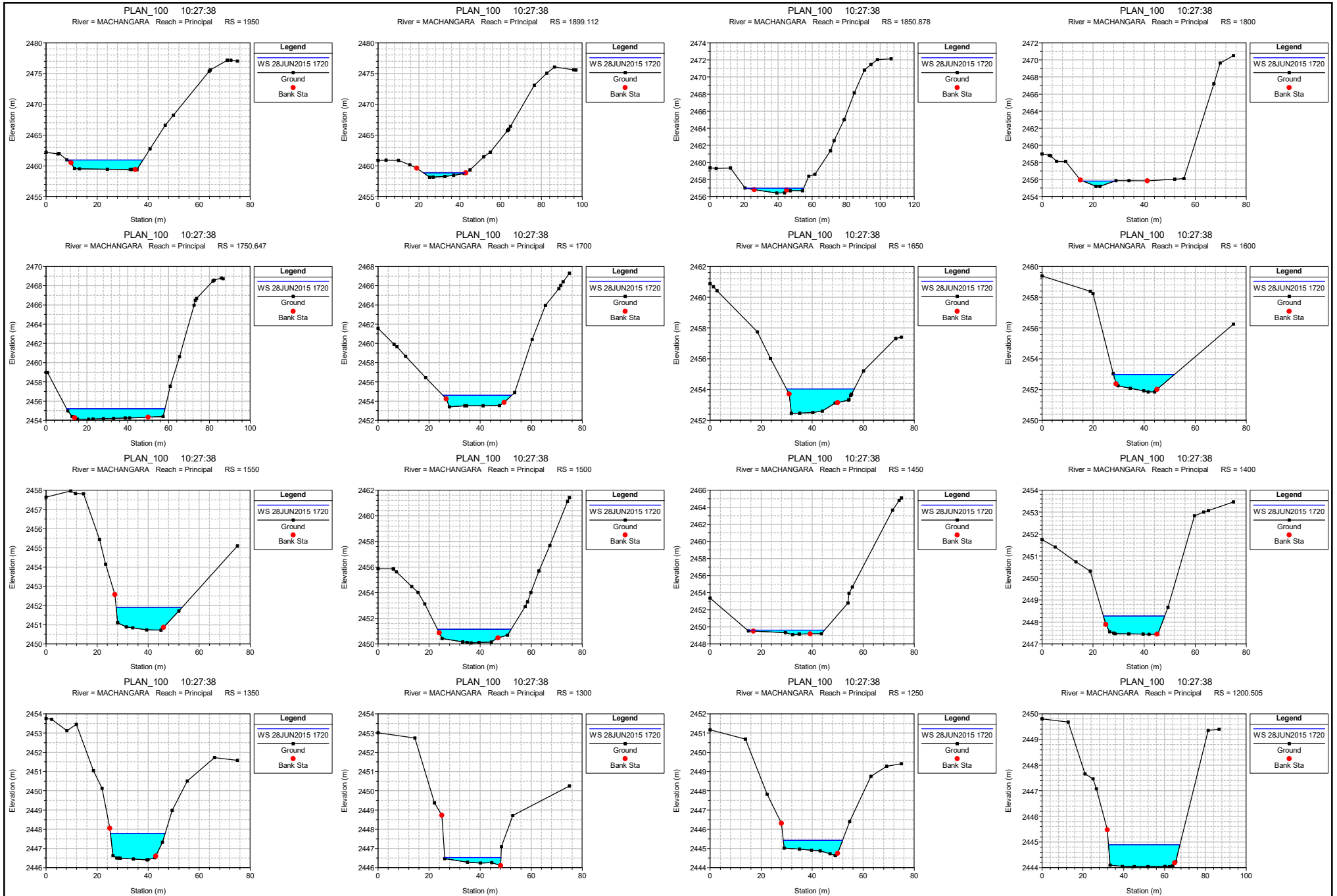
ANEXO 35



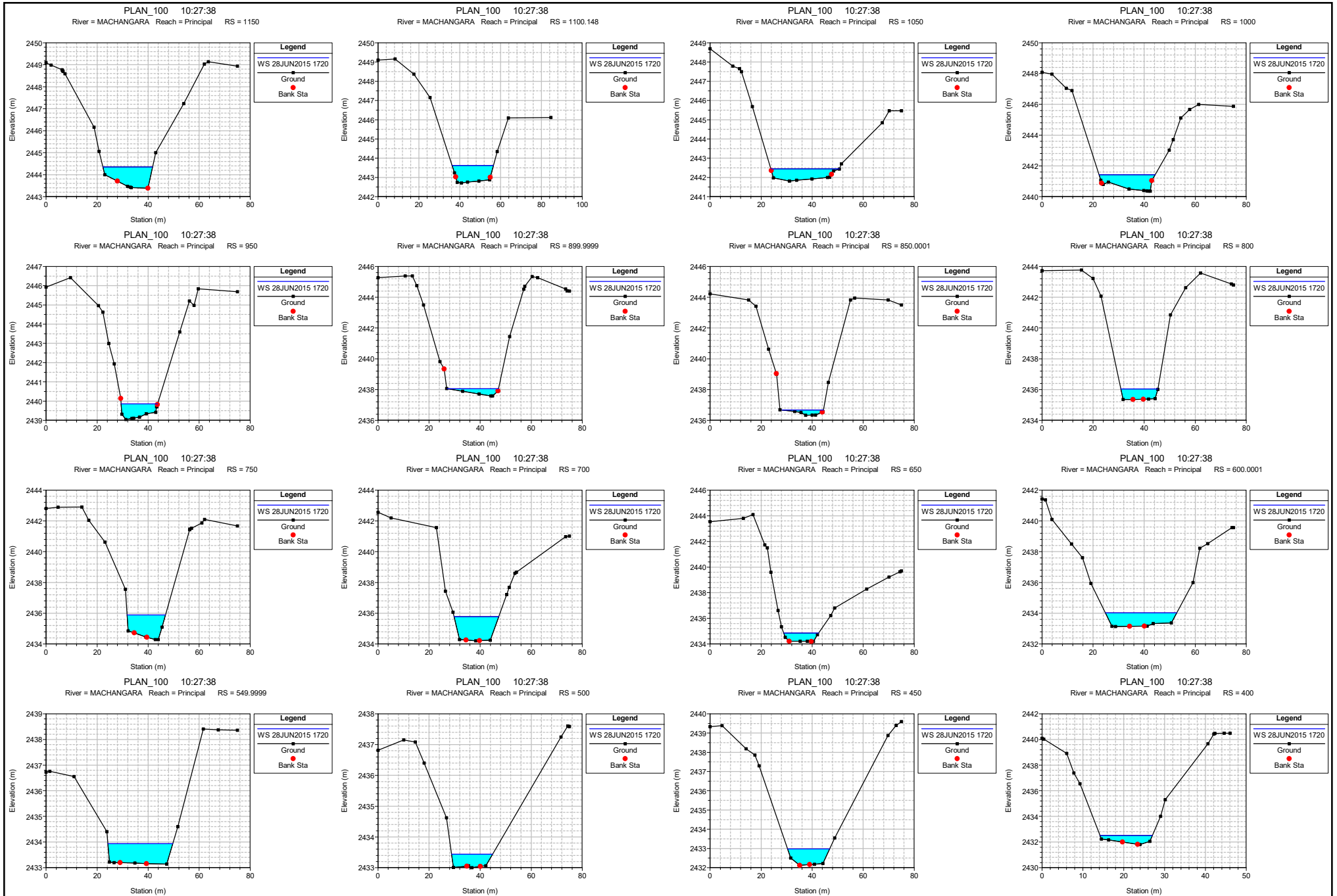
ANEXO 36



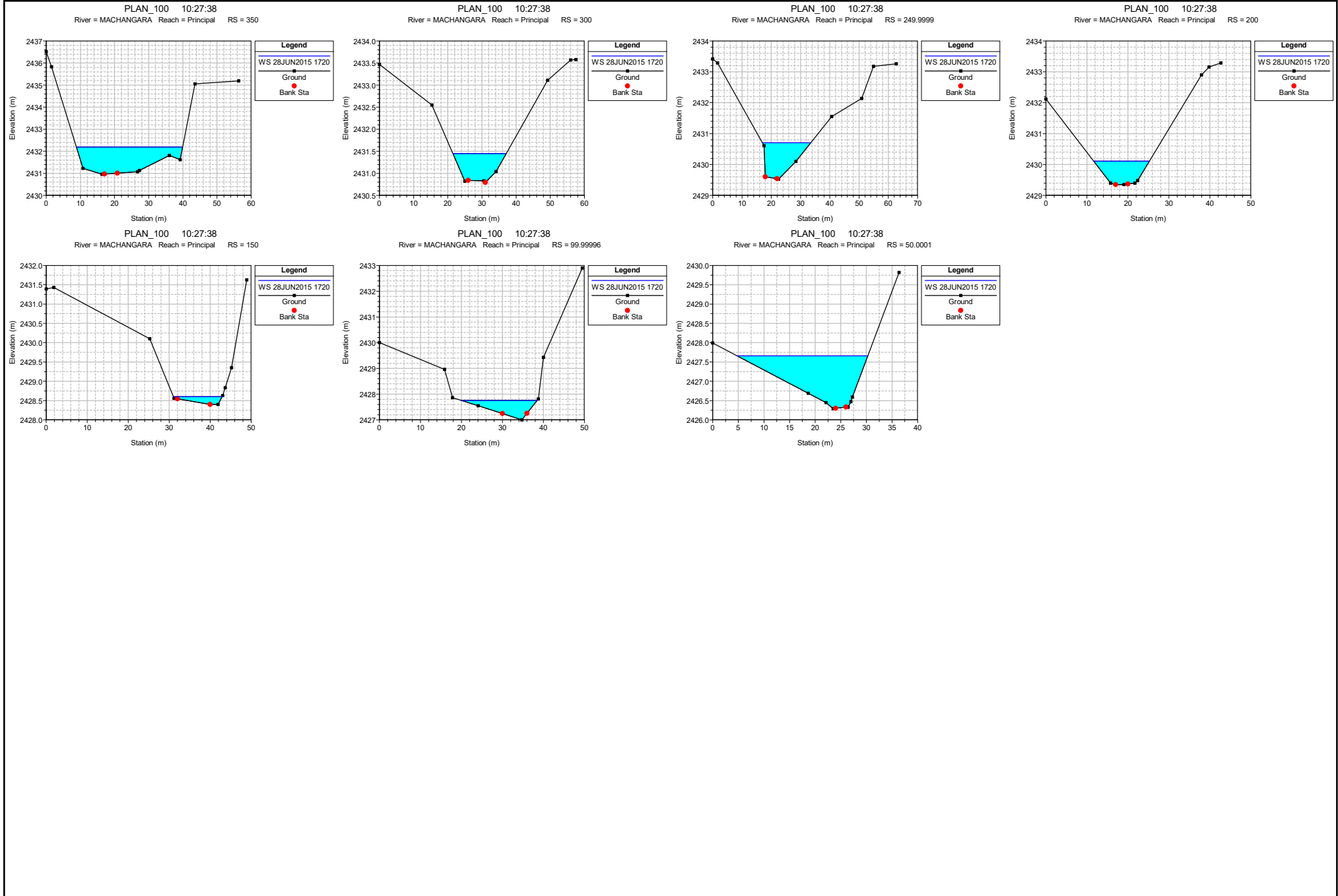
ANEXO 37



ANEXO 38



ANEXO 39



AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros(a)s, **Cesar David Méndez Palacios** y **Geovanny David Vásquez Coronel** portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N.º 0106548795 y 0106081136. En calidad de autore(a)s y titulare(a)s de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **14 de septiembre de 2021**



F:
Cesar David Méndez Palacios
0106548795



F:
Geovanny David Vásquez Coronel
0106081136