

Estudio Técnico, Hidrológico e Hidráulico de la Subcuenca del Río Huayñajahuira

Adriano Dorelo Vila, José Ugarte Vega y Adriana Romecín Mollinedo

Dirección Especial de Gestión Integral de Riesgos (DEGIR). Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, Bolivia

E-mail: adrianodorelo@gmail.com, jose.ugarte.vega@gmail.com, adriana.romecin@lapaz.bo

RESUMEN: La subcuenca Huayñajahuira pertenece a la cuenca del río La Paz es parte de la cuenca mayor del río Beni. Se extiende a través del Sur del Municipio de La Paz, en su extensión media e inferior se encuentran zonas urbanizadas residenciales, contrastando en sus cuencas altas con zonas agrícolas de cobertura natural.

Presenta una topografía abrupta con pendientes variables, quebradas profundas y cambios de sección en toda su longitud. En cuanto a obras hidráulicas se tienen tramos canalizados que se extienden en su mayoría en el área urbana y tramos de cauce natural que corresponde a las partes altas de la cuenca.

Las características morfológicas y geológicas de la subcuenca influyen en gran manera en los desbordes producidos durante época de lluvias afectando en áreas urbanas a puentes y avenidas aledañas al canal.

El Estudio Técnico, Hidrológico e Hidráulico de la Subcuenca del Río Huayñajahuira es una aplicación de Sistemas de Información Geográfica, métodos estadísticos y modelos hidrológicos e hidráulicos, que permiten representar el comportamiento de la subcuenca en eventos de precipitación extrema para identificar con antelación las zonas propensas a inundaciones y finalmente fortalecer el Sistema de Alerta Temprana para los próximos años.

El estudio permite generar un fundamento técnico para los aires de río, fundamental para los asentamientos futuros y al mismo tiempo impulsar a nuevos estudios en la subcuenca Huayñajahuira, por esta razón está sujeto a cambios tanto de actualización como de rectificación y retroalimentación.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de La Paz está asentada a las riberas del río Choqueyapu; a lo largo de un estrecho valle que cruza de noroeste a sudeste; por el cual drenan aproximadamente 364 ríos, entre riachuelos superficiales y subterráneos.

El centro de la ciudad está aproximadamente a 3650 msnm y forma, junto con la ciudad de El Alto, el primer núcleo urbano más grande y poblado de Bolivia.

ANTECEDENTES

La primera gestión riesgos realizada en la ciudad en el año 1962 por el Servicio Geológico de Bolivia, alertó sobre futuros desastres por asentamientos urbanos en laderas. Más de una década después, se elaboró el Plan

de Desarrollo Urbano de la ciudad, en el cual se estableció que el 62% del área urbana estaba comprometida en terrenos no aptos para construcción, y recomendó tomar en cuenta criterios geotécnicos en la futura planificación urbana. Aun así, la urbanización en áreas de alto riesgo continuó durante aproximadamente 10 años. En la década de 1980 se llevó a cabo una evaluación cuantitativa de la relevancia socioeconómica de los fenómenos más peligrosos; implicando aproximadamente 20 fenómenos; entre inundaciones, deslizamientos y deslaves.

La repentina inundación del 19 de febrero del 2002, provocó el fallecimiento de 68 personas, 14 desaparecidas y 130 personas heridas; este evento produjo una pérdida económica directa de infraestructura urbana valuada en alrededor de diez millones de dólares.

Detrás del desastre, el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) implementó dos importantes medidas; la primera fue la formación del Comité Permanente de Desastres y Atención de Emergencias; y la segunda medida establecer con apoyo técnico internacional el Programa de Manejo de Riesgos con el objetivo de proteger la ciudad y la comunidad.

Para fortalecer el manejo político de riesgos se implementó el Sistema de Alerta Temprana ante inundaciones y deslizamientos para el Municipio de La Paz (SAT), con el objetivo de proporcionar alerta oportuna en caso de eventos adversos.

La vulnerabilidad de la ciudad, particularmente en época de lluvias (de noviembre a marzo), incrementa debido a dos componentes; asentamientos urbanos en laderas y zonas geológicamente inestables, conjunto a áreas propensas a inundación incrementadas por el bloqueo de cursos naturales de agua y el inapropiado manejo de desechos sólidos y líquidos.

Debido al crecimiento no planificado de la mancha urbana en las diferentes zonas de la ciudad de La Paz, los asentamientos urbanos se acercaron peligrosamente a los cauces naturales y canalizados del río, incrementando la probabilidad de desastres frente a eventos de precipitación. Pese a que las instituciones han tratado de establecer algún tipo de control, no ha sido posible realizar restricciones estrictas en las zonas aledañas, debido a los continuos avasallamientos y expropiaciones por parte de los habitantes de la urbe paceña. Por esta razón en el año 2009 se crea una normativa de aires de río y se generan franjas de uso en función al orden del río.

OBJETIVO

El objetivo principal del estudio realizado fue el de evaluar la respuesta dinámica hidrológica e hidráulica en los drenajes de mayor orden ante eventos de precipitación extrema, simulados a través de métodos estadísticos, basados en información hidrología; reconocimiento de áreas por percepción remota, identificación de unidades geológicas, fotointerpretación y modelamientos.

DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del río La Paz es parte de la cuenca mayor del río Beni que forma parte de uno de los afluentes del río Amazonas. Los principales ríos aportantes de la cuenca del Río La Paz son el Orkojahuirá, Irpavi, Achumani, Huayñajahuira, Cotahuma y Achocalla.

El río Huayñajahuira nace en los cerros Patarani y Pachajaya con el nombre de quebrada Negra, fluye en dirección oeste y recibe los aportes de las zonas de Ovejuyo, Cota Cota, Los Pinos, San Miguel y La Florida, limitadas por los cerros Zapatuni, Mamani y Chipaña.

Al atravesar la zona de Cota Cota este río se canaliza hasta el sector de La Florida donde confluye con el río Choqueyapu. Su alto potencial de transporte de material sólido que cambia continuamente el perfil del lecho del río; en conjunto con la abrupta pendiente magnifican la fuerza y el tipo de flujo que genera fenómenos de resaltos hidráulicos que superan la altura de la sección.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

La subcuenca Huayñajahuira fue categorizada para su estudio como cuenca mixta endorreica, por ser compuesta, en su parte media e inferior por zonas urbanizadas residenciales; y en sus partes altas y bordes por zonas periurbanas, agrícolas y de cobertura natural, tanto vegetal como suelos desnudos.

El cálculo de las variables básicas se realizó con el uso de herramientas de análisis del Modelo de elevación Digital (MED) a resolución de 20 m, el resultado de este análisis se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1.- Parámetros Morfométricos de la subcuenca Huayñajahuira

Símbolo	Parámetro	Valor Calculado	Fórmula Utilizada
Parámetros Generales			
A	Área	18.56 km ²	-
P	Perímetro	26.87 km	-
L	Longitud del curso principal	10.59 km	-
W	Ancho	1.75 km	$W = \frac{A}{L} \quad (1)$
HM	Cota más alta de la cuenca	4253 msnm	-
Hm	Cota más baja de la cuenca	3035 msnm	-
DA	Desnivel altitudinal	1218 msnm	$DA = HM - Hm \quad (2)$
Parámetros de Forma			
Cg	Coefficiente de Gravelius	1.76	$Cg = \frac{P}{2.5W} \quad (3)$

HL	Altura equivalente	11.99 km	$HL = \frac{(Q_{cauce})^2}{1.48} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.48}{Q_{cauce}} \right)^2} \right)$ (4)
Bl	Base equivalente	1,55 km	$Bl = \frac{(Q_{cauce})^2}{1.48} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.48}{Q_{cauce}} \right)^2} \right)$ (5)
Parámetros de Relieve			
j	Pendiente media del cauce	11.18 %	$j = \frac{HL}{L} \quad (6)$
J	Pendiente promedio de la subcuenca	29 %	$J = \frac{HL - Bl}{L} \quad (7)$

MAPA DE DRENAJES

Se realizó una actualización del curso principal y de los afluentes en base al Mapa de Drenaje (PMD, 2007), relevando el cauce principal con un equipo de GeoPosicionamiento Global (GPS) de doble frecuencia.

La interpretación de la información se realizó mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográficos (SIG). En base a los resultados analizados se ajustó la información vectorial en base a una imagen satelital de 0,50 m de resolución espacial, la misma data del año 2012.

En base a la optimización realizada se llevó a cabo el hidropcesamiento y acumulación de flujo con un umbral de 50 metros, al cual se le realizó un proceso de corrección geométrica en base a la imagen satelital; que posteriormente recibieron una reclasificación jerárquica de todo el sistema de drenajes digitalizado, utilizando dos sistemas: el de Horton (1945) y el de Strahler (1952).

MAPA GEOLÓGICO

Regionalmente la geología en la subcuenca Huayñajahuirá y sus alrededores, está conformada por una serie compleja de unidades geológicas, las más antiguas fueron datadas con edades paleozoicas, como la formación Sica Sica y la formación Belén que está constituida por una intercalación de limolitas, lutitas y areniscas gris a marrón amarillentas.

Continuando esta secuencia estratigráfica sobre las anteriores rocas sedimentarias, se sobreponen otras unidades formacionales del Cenozoico (anteriormente denominado Terciario), que en la actualidad han sido incluidos dentro el Neógeno, existe también un intrusivo subvolcánico (Muela del Diablo) por la parte sur que en gran parte está compuesta por rocas Andesíticas shoshoníticas.

Las unidades litológicas más recientes, comprendidas entre el Plioceno – Holoceno, se encuentran conformadas a partir de la denominada Formación La Paz, cuya base está constituida por depósitos

conglomerádicos. Esta unidad formacional tiene su origen a partir del desarrollo de los sedimentos fluvio-lacustres altioplánicos y cordilleranos; de manera general se compone de una serie de intercalaciones de arcillas, arenas y lentes de gravillas todas semiconsolidadas.

Hacia fines del Plioceno también se deposita el primer nivel de ceniza volcánica, el cual cierra el ciclo de sedimentación de la Formación La Paz.

Sobre esta unidad formacional se tienen varias otras unidades sedimentarias cuaternarias: depósitos fluvio-glaciales y depósitos de terraza; estando los primeros compuestos por bloques, gravas, arenas y arcillas que afloran al sur del área en estudio y los segundos compuestos por cantos, arenas, gravas, limos y arcillas reconocidos cerca a los principales afluentes del río Huayñajhuira (Tabla 2).

Tabla 2.- Unidades Geológicas

Unidades	Descripción
D-BI	Formación Belen, Limolitas con intercalación de lutitas y areniscas de grano medio-fino
D-SS	Formación Sica Sica, Lutitas y cuarcitas gris marrón oscuras en capas muy delgadas y fracturadas
N-hu	Formación Huallaconi, Gravas consolidadas con clastos y guijas angulosas de rocas paleozoicas intercaladas con niveles de conglomerados poco consolidados
N-Md	Subvolcánico Muela del Diablo, Intrusión subvolcánica compuesta de rocas andesitas a shoshoníticas
N-Lp	Formación La Paz, Limos, arcillas y arenas bien estratificadas, con niveles lenticulares de gravas y delgadas capas de cinerita volcánica
N-Pp	Formación Purapurani, Gravas y arenas con niveles arenosos y limosos discontinuados caracterizados por la presencia de rocas graníticas bien redondeadas
Qtb-Pa	Torrente de barro Peña Azul, Cantos y bloques sustentados intercalados con limos y arcillas masivas compactas
Qfb	Flujo de barro, Mezcla heterogénea de detritos redondeados a subangulosos con matrix predominante limoarcillosa
Qtb	Torrente de barro
Qtb-Pa	Torrente de barro Peña Azul, Cantos y bloques sustentados intercalados con limos y arcillas masivas compactas
Qt-a	Terraza antigua, Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas pertenecientes a un antiguo nivel de erosión del río
Qt-la	Depósito lacustre, Arcillas limosas de granulometría fina con pequeños niveles arcillosos de estratificación subhorizontal, típica de ambientes lacustres locales
Qt-r	terrazza reciente, Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas pertenecientes a un reciente nivel de erosión del río
Qco	Depósito coluvial, Gravas gruesas, heterogéneas, subangulosas, localmente acompañadas de material fino con poco grado de consolidación
Qaa	Abanico Aluvial, Gravas heterogéneas con bloques aislados de matrix areno-gravosa
Qa	Llanura aluvial, Gravas y arenas torrenciales o fluviales con matrix arenosa ocasionalmente con bloques que conforman lechos de río
Qdz-an	Deslizamiento antiguo, Material heterogéneo que ha sufrido movimiento hace algún tiempo atrás (más de 50 años); susceptibles de volver a moverse en la actualidad; compuesto por gravas, arenas, limos, arcillas que ocurren en terrenos de relieve abrupto y pendiente elevada
Qdz-r	Deslizamiento reciente, Material heterogéneo que ha sufrido movimiento recientemente (en los últimos 50 años), compuesto por gravas, arenas, limos, arcillas que ocurren en terrenos de relieve abrupto y pendiente elevada.
Qdr	Derrumbe, Bloques removidos o caídos, compuestos por cantos, gravas, arenas, limos y arcillas
Qr	Material de relleno, Material removido artificialmente, incluye demoliciones, escombros y materias orgánicas de suelos heterogéneos finos a gruesos

MAPA DE COBERTURA

A fin de realizar la modelación se definió una escala de 1:5000, escogida debido a la compleja estructura urbana con cambios bruscos, la expansión antrópica y las actividades agrícolas mixtas que se desarrollan en el área periurbana.

Para la realización del mapa de cobertura se eligió la utilización de la base de datos de CLC (CORINE Land Cover) que permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra. El proyecto CORINE (Programa de Coordinación de Información del Medio Ambiente), fue desarrollado en Europa, en la década de los 90, con el fin de estandarizar las nomenclaturas de las coberturas terrestres para todos los países de la región europea (Corredor, et al., 2011).

Adaptación de Unidades

El método CLC se basa en la diferenciación de cinco clases principales, de las cuales se divide y separa, según la escala requerida por el proyecto en niveles y subniveles. Los primeros tres niveles fueron extraídos de la metodología de CLC (Cover, C.L., 2000), con sus respectivos criterios y lineamientos básicos que los definen.

Se creó y adaptó un nivel nuevo, característico de la subcuenca del río Huayñajahuira y zonas circundantes, la definición de unidades se realizó en base a visitas a campo y reconocimiento con un inventario básico de especies vegetales características de la región, lo cual ayudó a la generalización de 22 unidades de cobertura. La adaptación del método se halla descrita en la Tabla 3, con las unidades específicas generadas y el mapa generado se observa en Figura 3.

La digitalización de las mismas se realizó en base a colecta de puntos GPS en visitas a campo y a fotointerpretación de una imagen satelital de 0,50 m de resolución espacial. Se utilizó como unidad de mapeo 0,5 Ha. Se consideraron diferentes condiciones y límites para la caracterización de cada una de las unidades.

Consideraciones

Durante la etapa de digitalización y reconocimiento en campo se encontraron zonas de muy difícil acceso, en estos lugares se tomó en cuenta únicamente la información proveniente a la imagen satelital, previa comparación de zonas más accesibles de similares características.

Se realizó un inventario y reconocimiento básico de especies existentes en la zona, a fin de realizar una generalización válida.

Tabla 3.- Unidades de Cobertura adaptadas para el estudio

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4
1. Superficies artificiales	1.1. Tejido urbano	1.1.1. Tejido urbano continuo	1.1.1.1. Manzanos Tipo A
			1.1.1.2. Red de transporte
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	1.1.2.1. Manzanos Tipo B
			1.1.2.2. Manzanos Tipo C
	1.1.2.3. Manzanos Tipo D		
1.4. Zonas verdes artificiales, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	
		1.4.2. Zonas recreativas	
2. Áreas de cultivo	2.4. Áreas de agricultura heterogénea	2.4.3. Terrenos principalmente agrícolas, con espacios significativos de vegetación natural	2.4.3.1. Cultivos Tipo A
			2.4.3.2. Cultivos Tipo B
3. Bosque y áreas seminaturales	3.1. Bosques	3.1.3. Bosque mixto	3.1.3.1. Rodal de eucaliptos
			3.1.3.2. Rodal de pinos
			3.1.3.3. Rodal mixto
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Pastizal Natural	3.2.1.1. Pajonales
			3.2.1.2. Pajonales mixtos
		3.2.4. Arbusto arbolado de transición	3.2.4.1. Matorrales bajos
	3.2.4.2. Matorrales altos		
	3.3. Espacios abiertos con poca o sin vegetación	3.3.2. Afloramiento rocoso	
		3.3.3. Áreas con vegetación escasa	3.3.3.1. Suelo desnudo
3.3.3.2. Cárcavas			
5. Cuerpos de agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Cursos de agua	5.1.1.1. Lecho fluvial Tipo A
			5.1.1.2. Lecho fluvial Tipo B
		5.1.2. Cuerpos de agua	

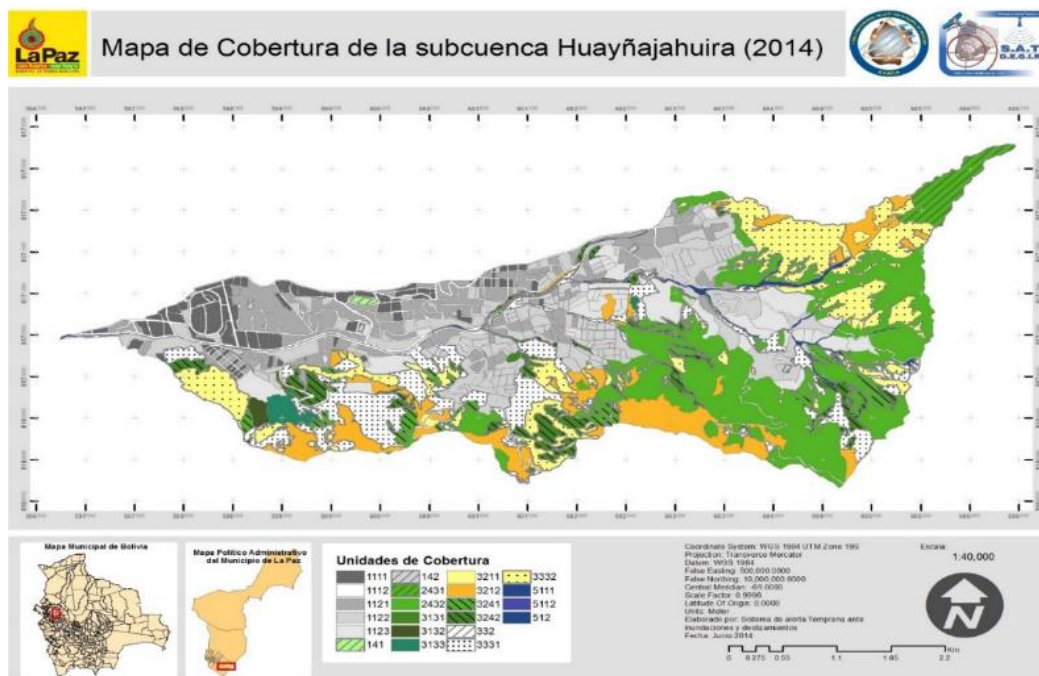


Figura 1.- Mapa de cobertura - Subcuenca Huayñajahuira

Durante la digitalización de la información se realizó una reclasificación de las zonas urbanizadas, a fin de tener una mejor representación de las características existentes para la posterior modelación. El mapeo e inventario de datos se realizó en la gestión 2012-2013 durante varias épocas del año, por tanto el estado de marchitez de la vegetación no fue tomado en cuenta, sin embargo los cambios en el tipo de unidad de cobertura no fueron significativos

MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Se trabajó en base a un MED a una resolución de 20 metros, delimitando la zona de estudio en las coordenadas (68°5'40.875"O, 16°31'26.088"S) y (68°0'9.862"W, 16°33'47.515"S) en el datum WGS 84.

Posteriormente se generó otro MED a resolución de un metro, interpolado de un TIN derivado de las curvas de nivel con separación de un metro, provenientes de la revisión y actualización del Plan Maestro de Drenaje (PMD) para el área urbana de La Paz del año 2007; se actualizó el levantamiento del canal en Marzo del 2013 y de las zonas aledañas a los lechos del río en Calacoto, Alto Calacoto, Colinas de Santa Rita, Almendros, Pedregal, Los Rosales, Chasquipampa y Ovejuyo en febrero del 2014; utilizando un GPS de doble frecuencia en modo RTK enlazado a la red geodésica del GAMLP.

El MED (Figura 2) lleva cierto sesgo considerable en sus valores altitudinales, se optimizó para la actual red de drenaje, bajo los siguientes parámetros de: profundidad de canalización de 3 metros, área de influencia de 25 metros y suavizado de pendientes de 2 metros.

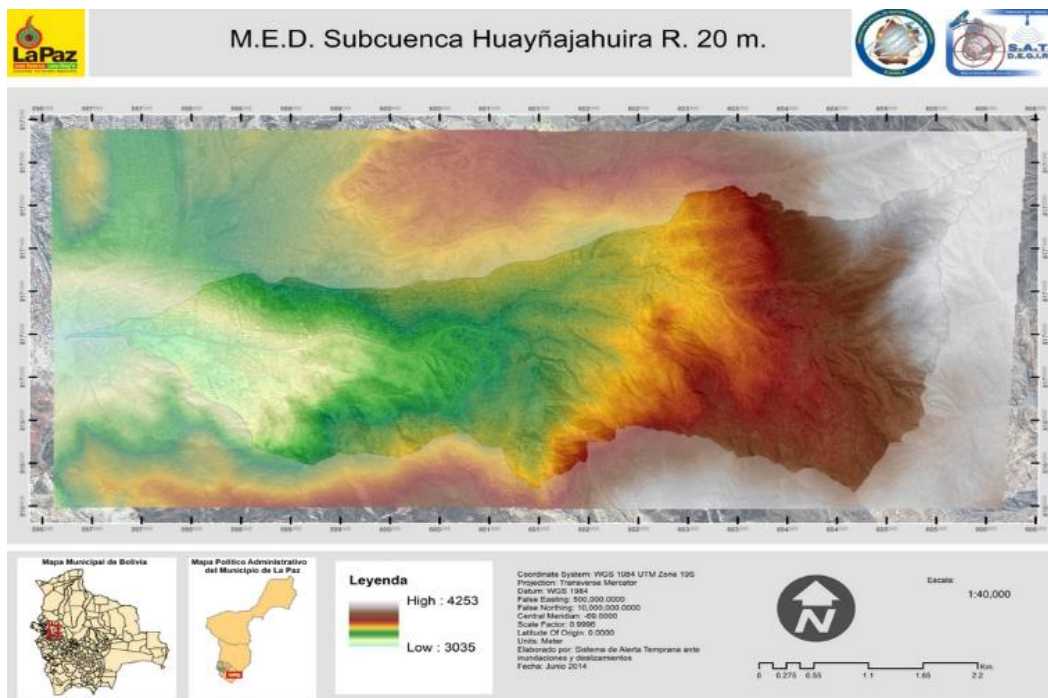


Figura 2.- MED Subcuenca Huayñajahuira

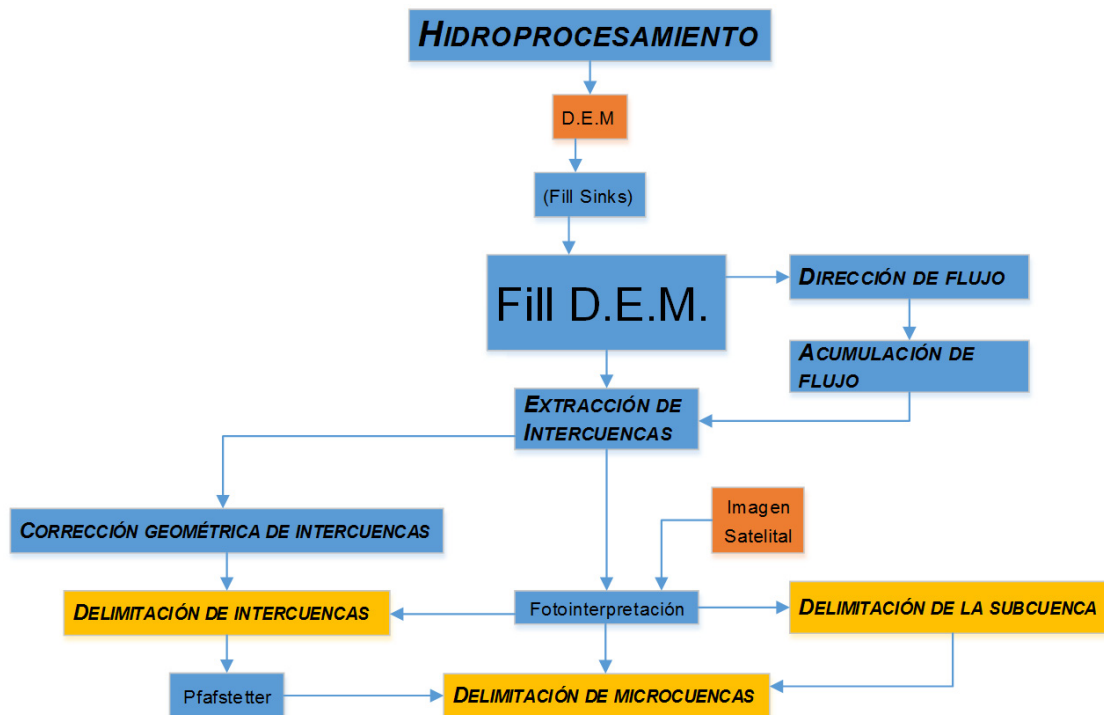


Figura 3.- Flujograma del Hidroprocesamiento

HIDROPROCESAMIENTO

El hidroprocesamiento se realizó en base al MED de 20 metros. A este se aplicó un “llenado de depresiones” (Fill sinks), posterior a esto se determinó la dirección de flujo y se realizó un conteo acumulativo del número de pixeles que naturalmente drenan a un pixel de salida.

Para la determinación de la red de drenaje de la subcuenca Huayñajahuira se usó un umbral definido de 20 pixeles, lo que indica que los drenajes que se presentan en el mapa fueron disgregados en base a la condicional que deben ser mayores a dicho umbral (Koolhoven Et. Al., 2007). Todo el proceso del Hidroprocesamiento se halla descrito en la Figura 3.

Extracción de subcuenca, microcuencas e intercuencas

La extracción de subcuencas se realizó en base a dos operaciones: la extracción digital por medio del hidroprocesamiento y la corrección mediante fotointerpretación de la imagen satelital de alta resolución.

Para la delimitación de la subcuenca se tomó como antecedente la información del PMD, realizando una corrección mediante fotointerpretación de los puntos topográficos más altos y en base al mapa de drenajes generado. En el área urbana se trazan divisorias, en el tope de escurrimiento de la calle o avenida, recorriendo desde la cota de altitud más alta, hasta la salida del punto de drenaje de la cuenca.

Por medio de las herramientas de hidroprocesamiento se extrajeron y denominaron intercuenas hidrográficas, en función al modelo de elevación digital, estas representan un aproximado a la realidad sujeto a calibración, manteniendo el sesgo del error del MED. La metodología utilizada fue la de captación de áreas de drenaje en función a la pendiente, según el umbral de 50 metros para el mapa de acumulación de flujo.

Se realizó una corrección geométrica de los polígonos, en base a fotointerpretación de la imagen satelital bajo el concepto de cuenca hidrográfica (Asensio, 2006).

Para la codificación de microcuencas se utilizó la metodología de Pfafstetter, donde se hace una distinción entre río principal y tributario, en función del criterio del área drenada. Se subdividió las intercuenas determinándose los nueve mayores afluentes del río principal, en términos de área de sus cuencas hidrográficas asignando un número según su drenaje principal desde el 1 hasta el 9, respectivamente, se reclasificó las 40 intercuenas según su microcuenca principal. (Figura 4)

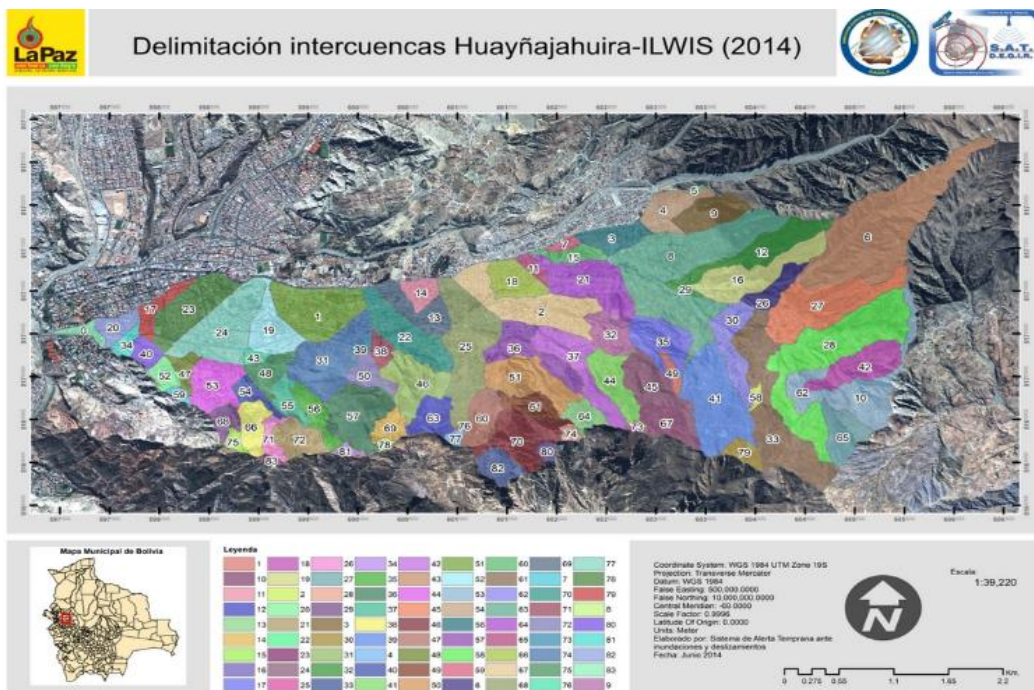


Figura 4.- Delimitación de intercuenas

ANÁLISIS PLUVIOMÉTRICO

Para la subcuenca Huayñajahuira se tiene específicamente precipitación orográfica, resultante de los mecanismos de levantamiento de masas de aire sobre cadenas montañosas. Los datos de precipitación histórica máxima diaria anual en 24 horas fueron extraídos de la página web oficial del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI) de la estación Ovejuyo (Figura 5) ubicada a 16° 32'17" S, y a 68° 03'03" O a una altura de 3550 msnm, que se encuentra dentro del área de estudio de la Subcuenca.

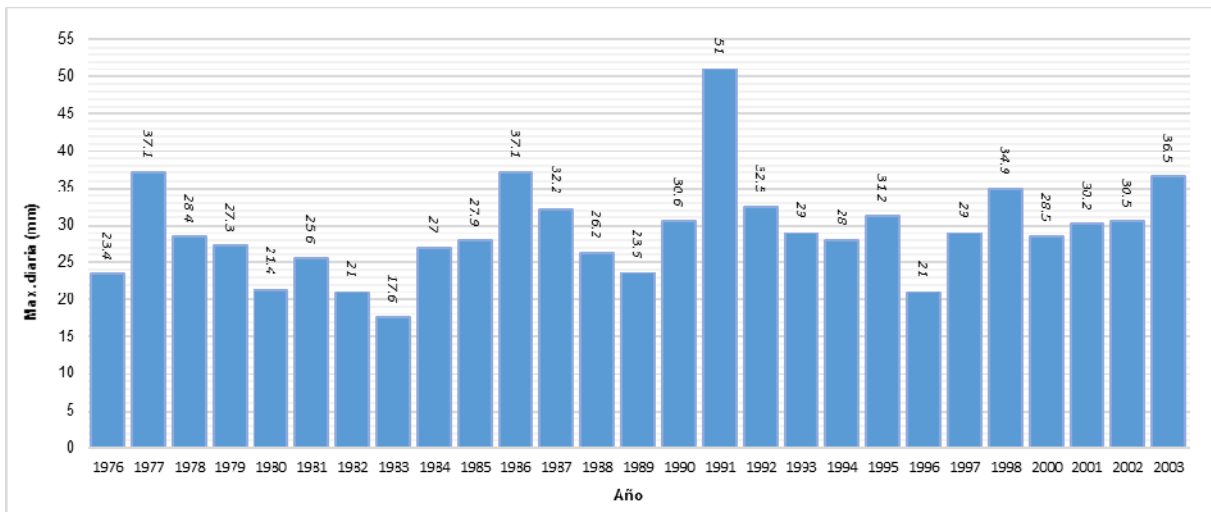


Figura 5.- Precipitaciones máx. anuales en estación Ovejuyo

La selección de los periodos de retorno T_r , se realizó según los datos de la NB 688 (Norma Boliviana para el Diseño de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial), se utilizaron para el proyecto periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Para la desagregación de la precipitación se utilizó el método de distribución de probabilidad hidrológica de Gumbel en base a los coeficientes de desagregación del SENAMHI

Tabla 4.- Coeficientes de desagregación del SENAMHI

		Coeficientes de desagregación									
		15 min	20 min	30 min	45 min	1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr
Periodo de retorno T_r	10	0.184	0.229	0.306	0.394	0.461	0.621	0.706	0.828	0.921	1.000
	25	0.188	0.235	0.313	0.404	0.472	0.635	0.722	0.845	0.939	1.000
	50	0.189	0.237	0.306	0.410	0.480	0.650	0.739	0.861	0.949	1.000
	100	0.191	0.239	0.383	0.414	0.485	0.657	0.746	0.870	0.958	1.000

Posteriormente se determinaron cuatro tormentas de diseño para sus respectivos periodos de retorno en función a la metodología de bloques alternos.

DETERMINACIÓN DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

Para el análisis de la infiltración se utilizó el método del SCS (Soil Conservation Service / Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU), a través de la determinación del número de curva (NC), realizar evaluaciones y análisis aplicados en modelaciones (Suphunvorranop, 1985). Para esto se toma en cuenta como unidad mínima de análisis la Unidad de Respuesta Hidrológica, URH (Figura 6), misma que toma en cuenta un área donde las condiciones son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo-climáticas (Cabrera, 2006). Se tomó como parámetros principales el tipo de cobertura y el grupo hidrológico.

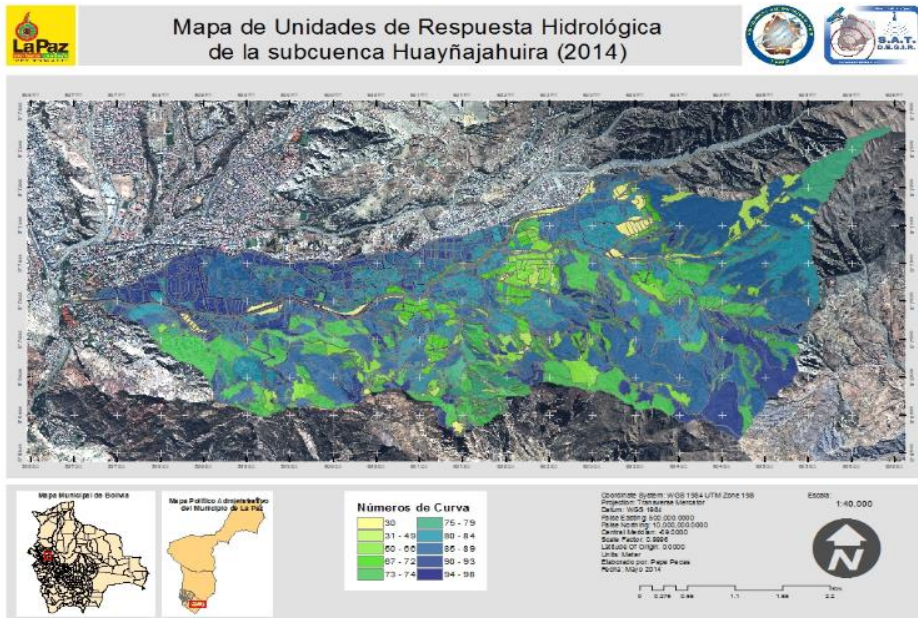


Figura 6.- Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica - Subcuenca Huayñajahuira

Para determinar el grupo hidrológico se procedió a realizar una reclasificación de las unidades geológicas según sus características geológicas. Con la combinación de los tipos de cobertura y el grupo hidrológico asignado se generó una tabla en dos dimensiones y se asignó valores de números de curva para cada uno de los valores. En base a esta tabla se realizó la asignación de los números de curva a cada una de las URH encontradas en la cuenca, para finalmente realizar una suma ponderada en función al área por cada microcuenca (Figura 6). Este análisis espacial se realizó en modo vectorial y raster, con diferentes herramientas para realizar una comparación, no encontrándose una alta variación entre las mismas (Tabla 5).

Tabla 5.- Tabla de asignación de Número de Curva por Intercuenca

Código de Intercuenca	NC	Código de Intercuenca	NC	Código de Intercuenca	NC
11	91.20	199	87.60	55	84.00
13	80.00	24	83.90	59	80.70
121	78.40	29	86.50	61	81.30
151	80.70	3	87.00	71	79.40
141	82.30	21	84.20	81	82.80
129	83.30	239	80.60	69	76.10
159	91.70	231	81.90	79	77.70
143	87.20	22	77.00	73	85.30
142	88.70	51	88.80	91	72.00
171	88.70	41	77.20	93	82.60
16	85.00	49	86.90	99	80.40
149	81.10	42	79.80	89	87.30
179	80.30	52	78.90	191	83.60
172	80.30	53	83.40		

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

El modelo representa el entorno físico y es categorizado como modelo determinístico porque resalta sus interacciones y vínculos en varios procesos que varían espacial y temporalmente.

Se desarrolló el modelo hidrológico adicionando y conectando los elementos hidrológicos; fueron utilizados los 40 elementos de intercuenca con sus respectivas características morfológicas y denominados según la clasificación de Pfafstetter; 22 elementos de tránsito y 23 elementos de confluencia. (Figura 7)



Figura 7.- Modelo hidrológico - Subcuenca Huayñajahuira

La principal limitante en el modelo de pérdidas es la falta de abstracciones iniciales e imprevistas, estos datos de ingreso no fueron determinados por la escasez de información de la subcuenca. Para la transformación de escurrimiento se utilizó la metodología del hidrograma sintético del SCS, en el cual se expresan los caudales en función al caudal pico utilizando como parámetro de cálculo del análisis pluviométrico el tiempo de retardo.

Otra limitante en el modelo fue la falta de información y la corta escala temporal en la que se realizó el presente proyecto considerando el mismo flujo base a lo largo de todo el año, se considera que mencionada estimación sirva para posterior calibración del mismo. Debido a los limitantes anteriormente mencionados el único dato de entrada es la precipitación obviando de esta manera, evapotranspiración y otros.

Inicialmente se realizó el cálculo de caudales líquidos a través del modelo de transformación de precipitación en escorrentía HEC-HMS, luego se calcularon los caudales de diseño amplificando los caudales líquidos, incorporando la incidencia del material en suspensión y del arrastre de material fino. (PMD, 2007)

La metodología utilizada para el cálculo de caudales resultantes asume que los eventos de transporte son generados por caudales pico de un determinado tiempo de retorno, independiente de las lluvias precedentes y de los volúmenes líquidos generados. Los caudales de diseño resultantes consideran el material en

suspensión según las formulas, el caudal líquido es un 52.63% del caudal total, resultantes en función a la distribución espacial y designación de código de la simulación hidrológica

Tabla 6.- Caudales de diseño resultantes mayorados y tiempos de concentración de la simulación hidrológica de la subcuenca del río Huayñajahuira

Código	Qd' (m3/s)				Tc (Hr)	Código	Qd' (m3/s)				Tc (Hr)
	10	25	50	100			10	25	50	100	
99	2.248	3.344	4.290	5.307	0,29	E14	18.002	21.339	24.117	27.041	
E4	2.248	3.344	4.290	5.307		T13	16.840	19.841	22.356	25.011	
T2	1.850	2.746	3.518	4.349		199	3.889	4.461	4.930	5.418	0,42
93	6.952	9.952	12.487	15.182	0,12	191	2.677	2.888	3.067	3.257	0,06
E5	7.211	10.312	12.936	15.726		E15	22.182	25.425	28.139	30.995	
T3	5.794	8.286	10.393	12.635		T14	20.897	23.769	26.188	28.749	
89	2.778	3.649	4.361	5.102	0,14	T10	6.186	7.606	8.771	9.985	
81	0.922	1.243	1.516	1.806	0,55	22	1.460	1.941	2.373	2.849	0,23
91	0.814	1.655	2.479	3.431	0,70	231	3.685	5.039	6.193	7.423	0,14
E6	8.335	11.610	14.368	17.295		E13	6.859	8.254	9.575	10.988	
T4	6.489	9.180	11.489	13.970		T11	6.816	7.809	8.598	9.505	
79	1.372	2.068	2.686	3.363	0,34	3	5.817	7.613	9.081	10.610	0,43
73	4.035	5.452	6.627	7.858	0,06	21	2.989	3.893	4.650	5.447	0,17
E3	7.078	9.842	12.231	14.804		E14	18.002	21.339	24.117	27.041	
T5	7.078	9.842	12.231	14.804		T13	16.840	19.841	22.356	25.011	
61	3.909	5.631	7.103	8.677	0,30	199	3.889	4.461	4.930	5.418	0,42
69	1.555	2.453	3.269	4.174	0,36	191	2.677	2.888	3.067	3.257	0,06
E1	1.555	2.453	3.269	4.174		E15	22.182	25.425	28.139	30.995	
T1	1.262	1.959	2.589	3.289		T14	20.897	23.769	26.188	28.749	
71	2.218	3.283	4.210	5.216	0,35	179	4.859	6.231	7.419	8.699	0,25
E2	10.075	14.005	17.406	21.076		172	2.911	3.292	3.624	3.980	0,30
T6	10.075	14.005	17.406	21.076		E16	23.923	26.166	28.027	30.140	
59	1.616	2.232	2.762	3.331	0,59	T15	23.496	25.893	27.922	30.074	
55	4.609	6.315	7.741	9.245	0,15	16	4.834	5.858	6.708	7.604	0,35
E7	10.393	14.246	17.592	21.211		171	8.749	10.803	12.463	14.174	0,11
T7	8.416	11.498	14.201	17.142		E17	30.015	32.844	35.165	37.585	
52	1.416	2.003	2.515	3.076	0,38	T16	29.155	31.810	34.003	36.301	
53	3.521	4.834	5.937	7.105	0,54	159	12.470	15.186	17.344	19.542	0,26
E8	7.858	10.012	12.115	14.415		E18	35.451	38.681	41.278	43.939	
T23	7.764	9.851	11.628	13.524		T19	33.122	35.715	37.806	39.939	
49	3.189	4.108	4.861	5.645	0,28	142	6.193	7.453	8.477	9.530	0,21
42	2.022	2.815	3.505	4.249	0,42	149	3.964	4.836	5.583	6.387	0,21
E9	5.143	6.832	8.257	9.763		E19	3.964	4.836	5.583	6.387	
T8	4.632	6.084	7.304	8.596		T17	3.964	4.836	5.583	6.387	
41	1.593	2.285	2.906	3.587	0,34	143	3.982	4.598	5.105	5.631	0,29
51	4.698	6.036	7.121	8.236	0,36	E20	12.104	13.952	15.457	17.013	
E10	10.559	13.067	15.193	17.452		T18	12.104	13.952	15.457	17.013	
T12	10.559	13.067	15.193	17.452		151	4.877	6.224	7.385	8.632	0,29
29	6.190	8.106	9.680	11.322	0,15	141	3.305	3.818	4.254	4.718	0,3
24	1.964	2.469	2.893	3.342	0,33	E21	45.194	48.396	50.950	53.567	
E11	8.070	10.465	12.445	14.510		T21	44.751	47.658	49.977	52.336	
T9	6.154	7.858	9.265	10.736		13	4.977	6.439	7.707	9.077	0,26
239	1.813	2.356	2.824	3.328	0,30	129	5.762	7.279	8.558	9.911	0,3
E12	6.186	7.606	8.771	9.985		E22	5.762	7.279	8.558	9.911	
T10	6.186	7.606	8.771	9.985		T20	5.011	6.215	7.227	8.301	
22	1.460	1.941	2.373	2.849	0,23	121	3.360	4.060	4.677	5.350	0,35
231	3.685	5.039	6.193	7.423	0,14	E23	50.644	53.277	55.336	57.393	
E13	6.859	8.254	9.575	10.988		T22	50.199	52.869	54.983	57.112	
T11	6.816	7.809	8.598	9.505		11	5.157	5.978	6.633	7.304	0,45
3	5.817	7.613	9.081	10.610	0,43	E24	51.351	53.782	55.704	57.638	
21	2.989	3.893	4.650	5.447	0,17						

SIMULACIÓN HIDRÁULICA

La aplicación del modelo HEC-RAS es la modelación hidráulica en régimen permanente y no permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales. (Cameron T. Ackerman, 2005)

Se asignaron diferentes coeficientes de rugosidad de acuerdo a los sugeridos por el Manual del programa HEC-RAS (Brunner, 2008). Se utilizaron caudales de diseño con periodos de retorno de 10-25-50-100 años, hallados en el modelo hidrológico.

En la simulación de la cuenca se realizó el cálculo para el régimen supercrítico, considerando que la velocidad que calculó el programa es distribuida en toda la sección de áreas inundadas y no inundadas, la velocidad no corresponde a la velocidad del flujo dentro del canal, sino de toda el área. Por esta razón se tienen datos de velocidades que no sobrepasan los 7.36 m/s. Por tanto se tomaron secciones de análisis (Figura 8) aproximadamente a cada 10 metros de manera transversal al canal, como se aprecia en la Figura 9.

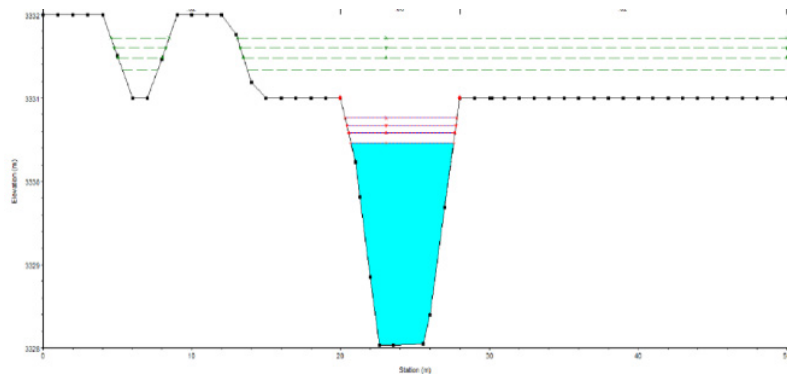


Figura 8.- Detalle de sección modelada en Hec-Ras

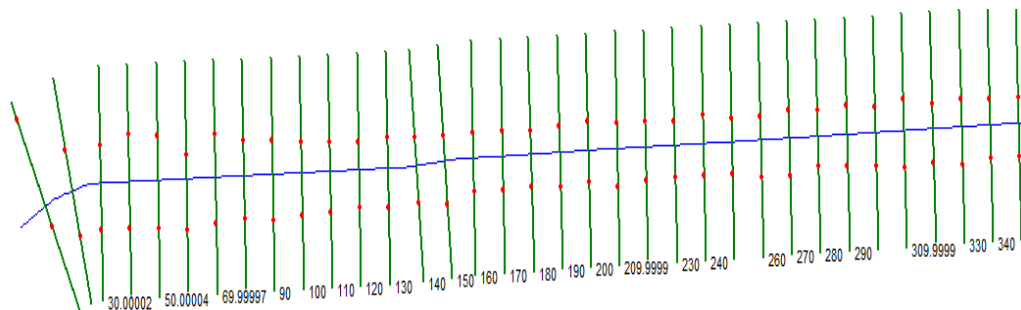


Figura 9.- Detalles en planta de secciones modeladas en Hec-Ras

PLANICIES DE INUNDACIÓN

Para algunos tramos del canal, el flujo cambia de continuo a pulsante. Al alcanzar este estado, se observa que el flujo permanece inalterado en el tramo superior del canal, generando olas pulsantes, las cuales se presentan como mezclas de agua, aire y material sedimentario.

El fenómeno se presenta en forma de trenes de ondas. El intervalo entre un tren de ondas y el siguiente es variable, así como entre las ondas que forman un mismo tren, aún para caudales casi constantes, por lo que el fenómeno puede considerarse no periódico. El agua desbordada se va acumulando aguas abajo, creando un flujo de agua paralelo al canal que erosiona las fundaciones de los muros laterales, transportan el material debajo de la carpeta asfáltica provocando socavaciones y causan inundaciones en las viviendas próximas.

Las planicies de inundación, difuminan los sobresaltos hidráulicos a lo largo de las avenidas o áreas aledañas (Figura 10), para la representación de las planicies de inundación se utilizó la reclasificación del periodo de retorno en función a la metodología de la Gobernación de Brisbane (Brisbane City Council, 2013), que define la incidencia de los periodos de retorno en el grado de riesgo al que los residentes se encuentran expuestos.

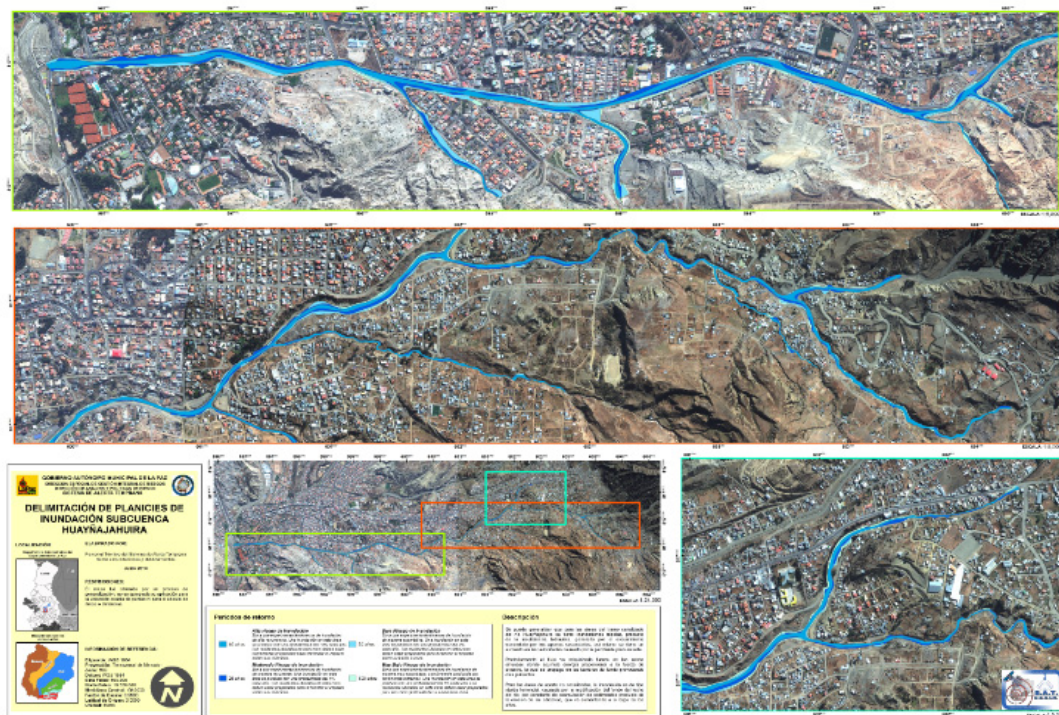


Figura 10.- Mapa de Planicies de Inundación - Subcuenca Huayñajahuira

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La función hipsométrica determina que la subcuenca está en un tránsito de desarrollo topográfico joven con tendencia de ingreso de edad madura, donde el área urbanizada se encuentra entre los 3300 msnm a 3400 msnm con expansión exponencial hacia cuenca alta, cerca de los drenajes de mayor aporte.

Se realizó la actualización del mapa de drenajes, en su mayoría verificados en campo y por fotointerpretación; reconociendo drenajes principales, secundarios, afluentes y aportes menores. La densidad

de drenajes de la subcuenca es de 0.13 lo cual indica la existencia de un kilómetro de drenaje cada 0.13 kilómetros cuadrados.

En el proceso de actualización del mapa geológico a mayor resolución espacial, se identificaron 20 unidades geológicas, determinando extensas áreas de aporte sedimentario por erosión. Se realizó también la actualización del mapa de cobertura según la metodología del CLC definiendo 22 unidades de cobertura, identificando como áreas mayores las de cultivos tipo B (19.32%), manzanos tipo C (12.84) y cárcavas (12.36%).

La elaboración del modelo de elevación digital con una resolución de un metro, se limitó a abarcar un 85% de la subcuenca sobre todo, sus alturas varían desde los 3219 msnm hasta los 4197 msnm; el mismo presenta distorsiones en el área urbanizada provocadas por la falta de información altimétrica de las edificaciones, por lo cual está enfocado al área canalizada del río Huayñajahuira.

Se optimizó el MED a resolución de 20 metros por medio del mapa de drenajes, adaptando depresiones y concavidades generadas por los drenajes identificados; en base al mismo se actualizó la delimitación de la subcuenca y sus unidades menores, determinando 9 microcuencas y 40 intercuencas; ambas reclasificadas por la metodología de Pfafstetter.

Se determinaron cuatro tormentas de diseño para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en base a los datos proporcionado por la estación de Ovejuyo de SENAMHI y distribuidas a lo largo de una hora, tiempo analizado como duración promedio de precipitaciones según los datos de los pluviómetros del SAT.

Se realizó el modelamiento hidrológico en base a la metodología del SCS, determinando caudales de diseño por intercuencas, considerando métodos empíricos del PMD para determinar el caudal de sedimentos en suspensión y el caudal sólido de arrastre de material granular, según las formulas el caudal liquido es un 52.63% del caudal total.

Se realizó la simulación hidráulica en base a los parámetros morfométricos, topográficos e hidrológicos determinados, dividiendo el curso principal en 10 tramos y considerando 9 afluentes principales para la modelación en régimen supercrítico, seleccionado por la rápida respuesta hidrológica existente por la topografía y cobertura. Como resultado de la simulación hidráulica se determinaron planicies de inundación para los eventos de precipitación extrema determinados en los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años; representando gráficamente áreas de mayor riesgo de inundación.

Se recomienda actualizar continuamente la información cartográfica en el MED, añadiendo intervenciones recurrentes antrópicas (ampliaciones de muros, canalizaciones nuevas, embovedados, movimientos de tierra) y modificaciones por erosión natural. También se recomienda actualizar y calibrar las variables utilizadas para la modelación hidráulica e hidrológica, por lo menos cada 5 años.

Se debe realizar un análisis de obras alternativas para contrarrestar la insuficiencia hidráulica determinada en las áreas donde se presenta mayor probabilidad de desborde la probabilidad de ocurrencia, emplazar obras para la reducción de la velocidad del flujo dentro del canal y realizar obras para la reducción de material de arrastre producidas por erosión de cuenca alta.

Es necesario utilizar los modelos hidrológicos para la simulación de escenarios de cambio de uso de suelo para determinar sectores a reforestar y simular continuamente las obras propuestas que puedan modificar el flujo del río para evitar posibles inconvenientes aguas abajo o mal funcionamiento de las mismas. También realizar un recalcu de las alturas de los dissipadores y colchones hidráulicos para que generen menores olas pulsantes.

Para futuros estudios se recomienda considerar realizar modelos de erosión y climatológicos, realizar campañas de aforo de caudal (líquido y sólido) mensuales en los tramos y afluentes principales y realizar estudios de granulometría y sedimentología en el lecho del río Huayñajahuira a fin de determinar el comportamiento y composición del caudal sólido.

REFERENCIAS

- Asensio, S. I., 2006. Morfología de las cuencas hidrográficas. Valencia, España: s.n.
- Auza, M., 2013. Global Digital Elevation Model From Aster. Cochabamba, Bolivia: CLAS-UMSS.
- Brisbane City Council, 2013. Flooding in Brisbane - An explanation of technical flood terms. Brisbane: s.n.
- Brunner, G. W., 2008. www.hec.usace.army.mil. [En línea] [Último acceso: Enero 2014].
- Cabrera, J., 2006. Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Cameron T. Ackerman, P., 2005. www.hec.usace.army.mil. [En línea] [Último acceso: Enero 2014].
- Corredor, L., Cárdenas, E. & Ordóñez, J. C., 2011. Aplicación de la metodología Corine Land Cover en la determinación de los cambios de cobertura en el parque natural Los Flamencos. s.l.:Ciencia e Ingeniería Neogranadina.
- Cover, C.L., 2000. Corine Land Cover. s.l.:European Environment Agency, Copenhagen.
- Koolhoven Et. Al., W., 2007. Ilwis Academic. s.l.:s.n.
- PMD, 2007. Revisión y actualización del Plan Maestro de Drenaje para el area urbana de La Paz. La Paz, Bolivia: Gobierno Autónomo Municipal de La Paz.
- Suphunvorranop, T., 1985. A Guide to SCS Runoff Procedures. Florida: s.n.