

ANÁLISIS DEL RIESGO ASOCIADO A LAS MÁXIMAS CRECIDAS

AGUAS ABAJO DE LA PRESA RUMICANCHA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

1.1. Problema.

1.1.1. Planteamiento del problema.

En el mundo, hoy en día donde la población está creciendo y generándose o nucleándose en grandes urbes, que tiene su problema en cuanto al manejo de agua, donde también requieren seguir desarrollándose económicamente. Entonces existe una realidad, es el crecimiento poblacional y el desarrollo necesario, el impacto más grande que ha tenido el medio ambiente es el ser humano, la gente necesita alimentos, consumir, etc. y sin agua a disposición esto no se puede hacer. (Pujol y Marengo, 2020).

Pero debido al impacto del cambio climático provoca cambios, como las precipitaciones extremas y esto se está viviendo en distintas regiones. Donde afecta a la regulación de los embalses a medida que la hidrología vaya cambiando. La distribución de agua será más irregular y se agravaran los desastres como inundaciones, lluvias intensas, etc. (Pujol y Marengo, 2020).

A nivel nacional, como en el departamento de Tarija, el problema de los desbordamientos de ríos o crecidas de ríos con su consecuente inundación por las lluvias intensas, es común, debido a diversos factores entre ellos la variabilidad climática, el impacto del cambio climático, la falta de prevención y la falta de conciencia de los pobladores de que se encuentran en zonas peligrosas no se toman las precauciones del caso ya sea por falta de economía o de conocimiento. Por lo general las personas se asentaban cerca de ríos, suelos fértiles aptos para la agricultura, etc., para su aprovechamiento que sea de beneficio, garantizar su supervivencia humana y también desarrollarse económicamente; las construcciones de sus propiedades se realizaron sin ninguna dirección técnica.

Por otro lado, se han presentado numerosas fallas de presas a nivel mundial, en el departamento de Tarija no se han registrado desastres por fallas en presas, sin embargo, es un evento de poca probabilidad de ocurrencia, pero este evento está asociado directamente a las consecuencias desastrosas que produciría aguas abajo, una amenaza durante todo el funcionamiento en la vida

útil de la estructura. Además de la crecida generada por la descarga violenta del embalse por la rotura de la presa.

La preocupación social respecto a este aspecto con el riesgo impuesto por esta amenaza a pesar que las infraestructuras han evolucionado, actualmente, en la Presa Rumicancha existe una demanda creciente por la seguridad en el territorio situado aguas abajo de la presa, donde existen comunidades cercanas entre ellas: Sella Cercado y Sella Méndez, asentamientos, lotes, cultivos en desniveles de la superficie del terreno y cerca de la llanura de inundación y se pueden encontrarse expuestos a los peligros y vulnerables ante la amenaza de origen natural o antrópico, con posibles consecuencias de bienes e inmuebles, de materiales, vida de personas.

Por tal razón, para prevenir el desastre se necesita analizar y tener el conocimiento del nivel de riesgo asociado a las máximas crecidas de origen natural o antrópico, que se pueden presentar en la zona de aguas abajo de la presa Rumicacha, así también conocer las zonas que están propensas a la inundación y reducir los efectos del desastre.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Cómo es el nivel de riesgo por las máximas crecidas que pueden manifestarse de origen natural o antrópica, en la zona de aguas abajo de la presa Rumicancha, donde existen asentamientos, propiedades de terrenos o lotes y cultivos?

1.1.3. Sistematización del problema.

¿Dependiendo del origen, cuál será los posibles escenarios y cuál es el caudal máximo, que provocará máximas crecidas en la zona aguas abajo de la presa Rumicancha?

¿Cómo es el nivel de peligrosidad por máximas crecidas y su consecuente inundación en el área de interés?

¿Cómo es la vulnerabilidad física en el área de influencia?

¿De qué manera se debe implementar y ejecutar acciones para mitigar o reducir los efectos causados por máximas crecidas y sus inundaciones?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Analizar el riesgo asociado a las máximas crecidas, en la zona de aguas abajo de la presa Rumicancha, para estimar el nivel del riesgo y proponer medidas de prevención y/o mitigación.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Definir escenarios hipotéticos que cause o genere una máxima crecida, basado principalmente en su origen.
- Analizar y estimar los niveles de peligro, de vulnerabilidad física, en el área de interés, para así la integración de ambos estimar los niveles de riesgo.
- Elaborar el mapa de peligro, mapa de vulnerabilidad física y mapa de riesgo.
- Proponer, sugerir las medidas y acciones a seguir para prevención y reducción de riesgo.

1.3. Justificación.

El impacto del cambio climático nos afecta directamente al incrementarse los fenómenos hidrometeorológicos, precipitaciones más intensas, escurrimientos más caudalosos.

El aumento de riesgos hidrológicos va tener que ser estudiado debido al cambio climático durante, manejo de cuencas, el diseño, planificación, proyecto, la construcción, gestión, y operación de presas, embalses. (Pujol y Marengo, 2020).

En nuestro medio las cantidades medias de precipitación han sufrido cambios sostenidos y significativos en distintas zonas de Tarija. También se han observado alteraciones muy importantes en la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, lluvias muy intensas ocurridas en poco tiempo. En muchos sectores rurales del departamento, las inundaciones por desbordamiento de los ríos se han convertido en una problemática recurrente con considerables impactos sobre la vida de los ciudadanos y el sistema socio-económico en su conjunto.

El crecimiento desordenado de las áreas rurales es un problema latente en todas las regiones del país, esto provoca la invasión de los cauces naturales del agua reduciendo así su área hidráulica y poniendo en riesgo sus vidas y las infraestructuras que construyen.

1.3.1. Justificación práctica.

La presencia del embalse de la presa de Rumicancha, una vez puesta en funcionamiento, conlleva un incremento en el crecimiento poblacional y asentamientos tanto como aguas abajo y aguas arriba, por su función de almacenar y regular el recurso del agua que beneficia y aprovecha los pobladores en sus actividades de desarrollo.

A pesar que la presa es una medida estructural para atenuar y reducir sus efectos de las crecidas en épocas de lluvia, se cree que no hay peligro o amenaza alguno, pero debido al impacto del cambio climático se incrementa los fenómenos hidrológicos y de manera que se aumente los asentamientos de los pobladores con el tiempo, generan cambios de uso del suelo en los sectores de aguas arriba como aguas abajo de la presa, donde pueden poner en riesgo en cuanto a su estructura.

En el sector de aguas abajo de la presa existe asentamiento poblacional: terrenos o lotes de propiedad de personas, para uso de vivienda, cultivo, y otros, algunos cercanos al río Sella. Que desconoce o no tienen el conocimiento del riesgo impuesto por crecidas, con posibles impactos en sus terrenos o lotes.

Las personas del lugar, como se encuentran lugares donde los ríos que en su mayor parte del año son secos, solo se ve escurrimiento mayor con la estación lluviosa, y que se construye una presa, depositan su confianza que no existe la posibilidad que se presente una máxima crecida, pero eso no es cierto.

Entonces el trabajo tiene la finalidad de aportar con información técnica que permita analizar el riesgo, estimando el nivel del mismo para conocer los posibles resultados de un desbordamiento del río por máximas crecidas que se pueden presentar o manifestarse con su consecuente inundación en la zona aguas abajo de la presa.

También el aporte de la investigación, luego de estimar el nivel de riesgo que cuenta en la zona de aguas abajo de la presa, se plantearán las acciones de solución estructural y no estructural con la finalidad de prevenir, reducir, que luego deberán cuantificarse y plasmarse en otro estudio definitivo.

La identificación de las zonas de riesgo, así como las zonas vulnerables nos muestra un esquema que nos permite adoptar medidas preventivas y de mitigación o facilitar a los diferentes usuarios

una fuente de información que permita mejorar la planificación del territorio y reducir los riesgos por desbordamientos de ríos.

1.3.2. Justificación metodológica.

Con el fin de contar información del nivel de riesgo y que permita plantear medidas de prevención, reducción de riesgo asociado a crecidas, aguas abajo de la presa de Rumicancha, identificando una posible área de influencia donde pueda ser afectado por la amenaza como los terrenos o lotes cercanos del río Sella, se plantea, simplifica una metodología con base de criterios técnicos de análisis del riesgo, teoría y conocimiento de ingeniería específicamente que tiene relación con la hidrología, modelos numéricos y herramientas de sistema de información geográfica (SIG), que permitan visualizar las zonas de mayor riesgo dentro del área de estudio.

El análisis del riesgo por crecidas y su consecuente inundación fluvial, como el de cualquier otro riesgo natural, requiere la descomposición del riesgo en sus componentes principales: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad; para posteriormente proceder a su integración y estudio conjunto.

El aporte de esta investigación es determinar una metodología propia de obtención de nivel de riesgo aplicable a este objeto de estudio, con el cual se puede utilizar, determinar también valores de riesgo a investigaciones semejantes o específicas.

También la investigación se justifica porque se considera un aporte en los siguientes aspectos:

1.3.3. Justificación social.

El resultado de la investigación será útil sobre todo para aquellas instituciones públicas y privadas que están dedicadas a la gestión de riesgo, por lo que la presente investigación se justifica porque contribuye con el bienestar de la sociedad de la zona y para el departamento de Tarija en su conjunto a largo plazo, para la toma de decisiones, al identificar el nivel de riesgo asociado a crecidas puede justificar una inversión en prevención o reducción de su impacto.

1.4. Hipótesis.

Aplicando criterios técnicos de análisis de riesgo y base teóricas de ingeniería civil, permitirá estimar y representar adecuadamente el nivel de riesgo por crecidas máximas en el sector aguas abajo de la presa Rumicancha.

1.5. Marco espacial.

1.5.1. Ubicación.

El área del trabajo, la zona aguas abajo de la presa, se encuentra en el departamento de Tarija, del Estado Plurinacional de Bolivia. entre las provincias, municipio y comunidades que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Ubicación del área de trabajo.

Provincia	Municipio	Comunidad
Cercado	Tarija	Sella Quebradas Sella Cercado Rumicancha
Méndez	San Lorenzo	Sella Méndez

Fuente: Elaboración propia

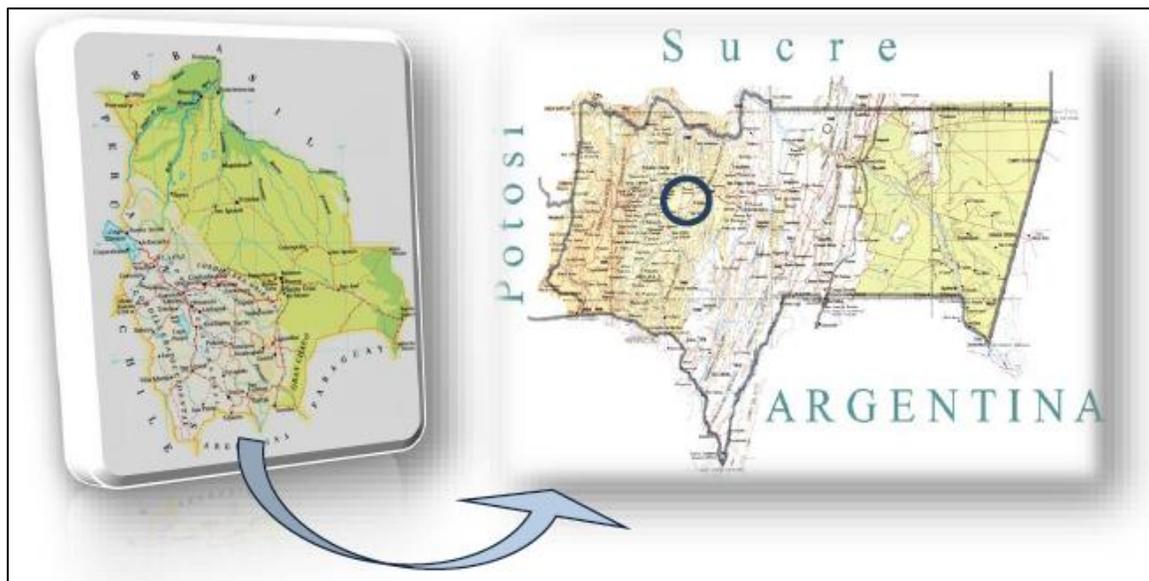


Figura 1.1: Ubicación geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia



Figura 1.2: Ubicación de la zona.

Fuente: Elaboración propia

Específicamente la zona donde se ubica la presa de Rumicancha, se encuentra entre las siguientes coordenadas: 327187,62 E, 7633243,73 N, (En el sistema WGS 84 zona 20S), cuya cota en el lecho del río es de 2154 m.s.n.m.

Coordenadas geográficas 21°23' de latitud sur, y 64°40' de longitud oeste, a una altitud aproximado promedio de 2173 m.s.n.m.

A continuación, se visualiza la ubicación de la presa Rumicancha y zona de aguas debajo de la misma, en imágenes satelitales que se obtiene con ayuda de la herramienta del google earth, ver la figura 1.3 y 1.4.

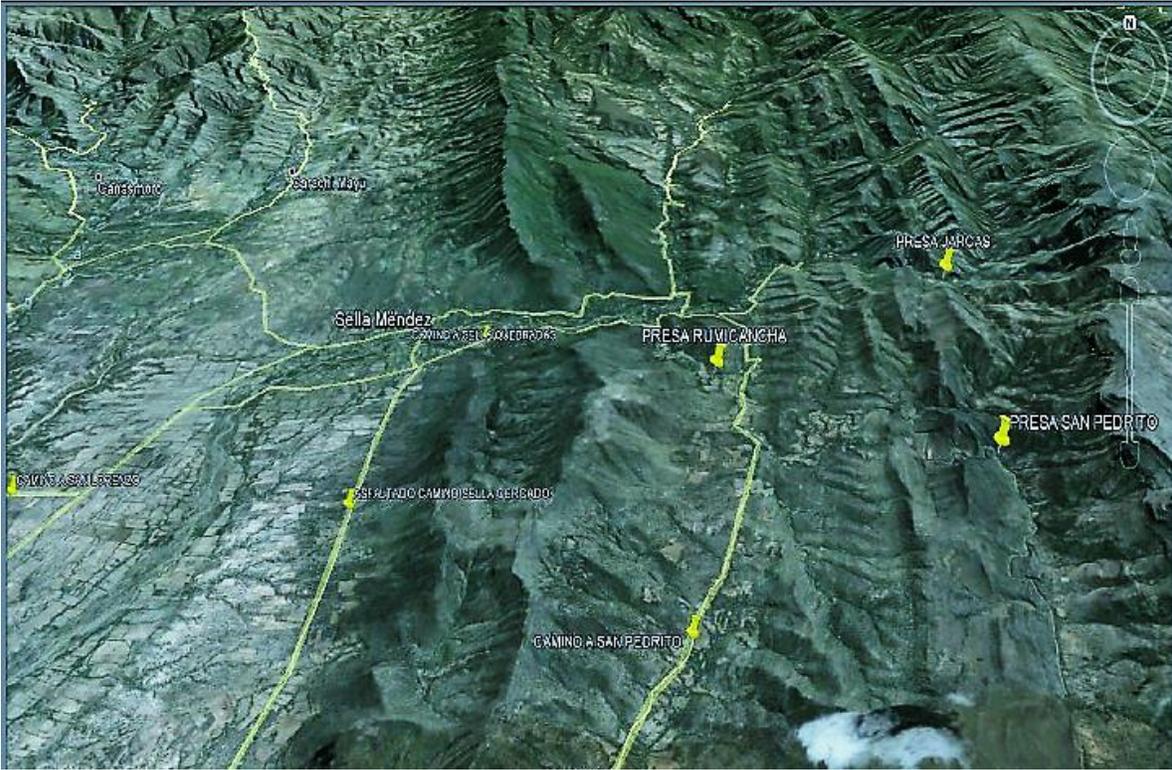


Figura 1.3: Ubicación de la presa Rumicancha.

Fuente: Elaboración propia

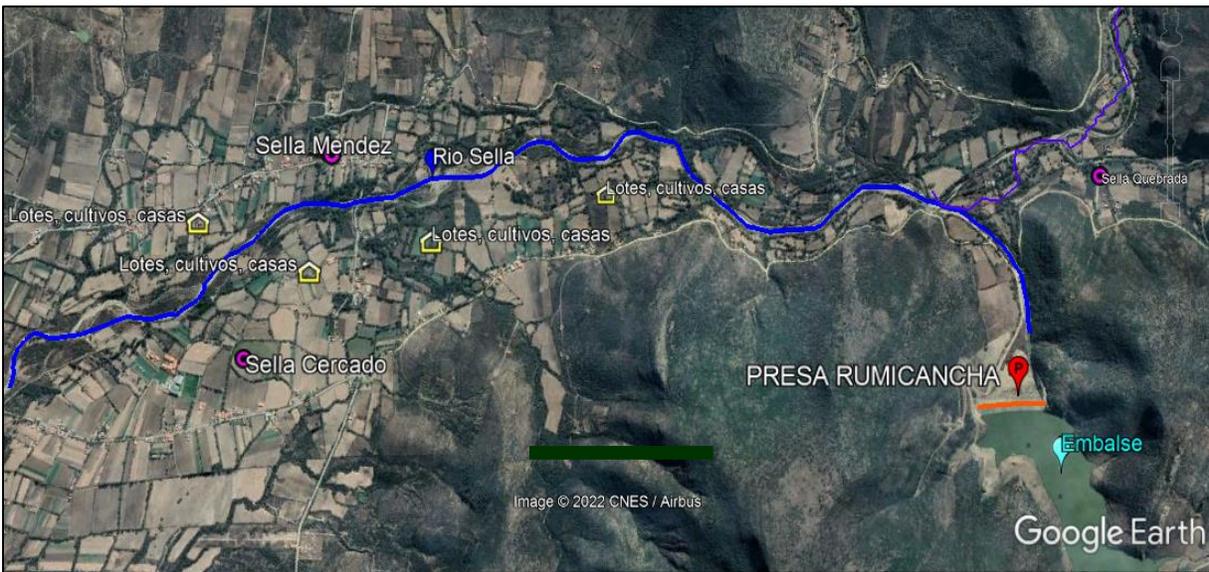


Figura 1.4: Sector aguas abajo de la presa Rumicancha.

Fuente: Elaboración propia

1.5.2. Vías de acceso.

Se encuentra al Norte de la ciudad de Tarija, aproximadamente a 17 Km. sobre el camino vecinal Tarija – Sella Cercado que cuenta con camino asfaltado y el tramo hasta Sella Quebradas, Sella Candelaria, son caminos vecinales de tierra transitables todo el año.

1.6. Marco temporal.

Debido a que es un trabajo que depende en gran parte de condiciones que varían con el tiempo, los resultados del análisis estarán vigentes mientras que las condiciones del estudio no varíen significativamente.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1. CONCEPTOS PRELIMINARES.

2.1.1. Fenómeno natural.

Es entendido como toda manifestación de la naturaleza, se refiere a cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno. Las condiciones de regularidad (lluvias en los meses de verano, la llovizna en los meses de invierno) o de aparición extraordinaria y sorprendente (una lluvia torrencial) son las que diferencian y pueden dar lugar a la ocurrencia de un desastre. Un fenómeno natural se convierte en peligroso cuando adquiere determinado grado de magnitud, intensidad, ocurrencia o extensión del impacto (lluvias torrenciales continuas en zonas ordinariamente secas, etc. pueden ser considerados peligrosos). (Renda et al., 2017, p.13).

2.1.2. Evento adverso.

Es una situación, suceso o hecho que produce alteración en la vida de las personas, economía, sistemas sociales y el ambiente, causado por fenómenos de orígenes naturales o provocados por los seres humanos. (Renda et al., 2017, p.13).

2.1.3. Emergencia.

Se entiende como una situación, un daño provocado por un evento adverso de origen natural o provocado por los seres humanos que, por su magnitud, puede ser atendida por los medios disponibles localmente. (Renda et al., 2017, p.13).

2.1.4. Desastre.

Es la interacción entre una amenaza y una población vulnerable que, por su magnitud, crea una interrupción en el funcionamiento de una sociedad y/o sistema a partir de una desproporción entre los medios necesarios para superarla y aquellos medios a disposición de la comunidad afectada. Cabe aclarar que muchas veces Emergencia y Desastre se toman como sinónimos. Sin embargo, entre ellos hay una importante diferencia.

Desastre, se crea una desproporción entre los medios necesarios para dar respuesta a las necesidades de la comunidad afectada y los medios disponibles en la misma. Emergencia, los medios disponibles localmente bastan para dar satisfacción a la demanda producida por el evento adverso. (Renda et al., 2017, p.13).

2.2. TIPOS Y CAUSAS DE CRECIDAS.

2.2.1. Definiciones.

Existen numerosas definiciones provenientes de varias fuentes tanto nacionales como internacionales. Por uniformidad se recomienda el empleo del Glosario Hidrológico Internacional de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)/ UNESCO, en el cual los términos están definidos en varios idiomas.

En dicho glosario, la definición de “crecida” es la siguiente:

- Elevación, generalmente rápida, del nivel del agua en un curso hasta un máximo, a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.
- Flujo relativamente alto medido como nivel o caudal.
- Marea ascendente. (OMM, 2011, p.4).

Una crecida es cualquier caudal relativamente alto que sobrepasa la margen natural o artificial en cualquier tramo de una corriente de agua. Cuando las márgenes son sobrepasadas, el agua se extiende sobre la planicie de inundación y, generalmente, entra en conflicto con el hombre (Chow, et al, 1944, p.506).

“Inundación”, refiriéndose a los efectos de una crecida, a diferencia de la propia crecida, se define como: Desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, o acumulación de agua procedente de drenajes, en zonas que normalmente no se encuentran anegadas. (OMM, 2011, p.4).

2.2.2. Tipos de crecidas.

2.2.2.1. Crecidas repentinas.

Estas crecidas están frecuentemente asociadas con tormentas convectivas violentas de corta duración que afectan un área pequeña. Las crecidas repentinas pueden presentarse en casi cualquier zona donde se tengan pendientes escarpadas, pero es más común en lugares montañosos sometidos a tormentas severas frecuentes con descargas eléctricas. Las crecidas repentinas son a menudo el resultado de fuertes lluvias de corta duración. Este tipo particular de inundación es común que arrastre casas, caminos y puentes que cruzan riachuelos y por ello tienen un impacto severo en comunidades y transporte en estas áreas generalmente remotas.

Las crecidas repentinas también pueden ocurrir en áreas localizadas donde el suelo se ha endurecido debido a un largo periodo de sequía. (OMM, 2011, p.4)

2.2.2.2. Crecidas fluviales.

Las inundaciones fluviales tienen lugar en una amplia gama de sistemas de ríos y de cuencas hidrográficas. Las crecidas en los valles fluviales ocurren mayormente en planicies de inundación o en terrenos de arrastre cuando el caudal excede la capacidad de los canales naturales y se derrama sobre las márgenes naturales o bordos artificiales. Las crecidas repentinas son generalmente más perjudiciales y ocurren en valles estrechos, escarpados y confinados, y se caracterizan como su nombre lo indica por la rapidez con que se generan, a raíz de precipitaciones pluviales y de altas velocidades de flujo. Esa rapidez las hace particularmente peligrosas para la vida humana. (OMM, 2011, p.4)

2.2.2.3. Crecidas de un solo evento.

Éste es el tipo más común de inundaciones, en que las lluvias intensas generalizadas, con duración desde varias horas hasta unos cuantos días, caen sobre una cuenca de drenaje y producen crecidas severas. Típicamente, estas lluvias intensas están asociadas a perturbaciones ciclónicas, a depresiones de latitudes intermedias y a tempestades, con sistemas frontales de escala sinóptica muy marcados. (OMM, 2011, p.4)

2.2.2.4. Crecidas estacionales.

Corresponden a crecidas que, en general tienen lugar con regularidad, como resultado de precipitaciones pluviales estacionales intensas. Las regiones del mundo sujetas a climas de tipo monzónico son típicamente las áreas más afectadas, en las que surgen situaciones críticas cuando las inundaciones “normales” son sustituidas por crecidas extendidas o crecidas producto de grandes escorrentías. La inundación es frecuentemente una situación en toda la cuenca, que puede durar por periodos de varias semanas.

En condiciones de monzones frecuentes, pueden ocurrir una serie de eventos con picos individuales durante una estación de crecidas. Las crecidas estacionales también pueden producirse debido a niveles altos en los lagos en la cabecera de una cuenca hidrográfica, por ejemplo, el lago Victoria y el río Nilo (el más largo de África). Otro tipo de crecida estacional puede darse a partir de condiciones húmedas en la parte alta de una cuenca hidrográfica, que

experimenta un régimen climático diferente al que ocurre en las áreas más bajas afectadas. Los ríos Nilo y Yangtsé (más largo de Asia) constituyen buenos ejemplos. (OMM, 2011, p.5)

2.3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO: TIPOLOGÍA Y FORMAS DE MANIFESTACIÓN.

2.3.1. Inundación.

La Directiva 2007/60/EC de la Unión Europea define inundación como el cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta. Por lo tanto, se incluyen las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras.

Las inundaciones se producen cuando lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de retención e infiltración del suelo, la capacidad máxima de transporte del río o arroyo es superada y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos cercanos a los propios cursos de agua. Las inundaciones son un evento natural y recurrente para un río.

Las inundaciones pueden clasificarse según su: Duración y Mecanismo de generación. (INETER/COSUDE 2005, p.12).

2.3.1.1. Según su duración.

Inundaciones rápidas o dinámicas: Suele producirse en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas vertientes presentan fuertes pendientes, por efecto de lluvias intensas. Las crecidas son repentinas y de corta duración. Son éstas las que suelen producir los mayores estragos en la población, sobre todo porque el tiempo de reacción es prácticamente nulo.

Inundaciones lentas o estáticas: Se produce cuando lluvias persistentes y generalizadas, producen un aumento paulatino del caudal del río hasta superar su capacidad máxima de transporte. Entonces el río se sale de su cauce, inundando áreas planas cercanas al mismo. Las zonas que periódicamente suelen quedar inundadas se denominan *Llanuras de inundación*. (INETER/COSUDE 2005, p.12).

2.3.1.2. Según el mecanismo de generación.

Inundaciones pluviales: Es la que se produce por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce fluvial. Este tipo de inundación se genera tras un régimen de

precipitaciones intensas o persistentes, es decir, por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio período de tiempo sobre un suelo poco permeable.

Inundaciones fluviales o por desbordamientos de los ríos: Causadas por el desbordamiento de los ríos y los arroyos es atribuida al aumento brusco del volumen de agua más allá de lo que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse, durante lo que se denomina como crecida. (Consecuencia de exceso de lluvias).

Inundaciones por rotura u operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica: La rotura de una presa, por pequeña que ésta sea, puede llegar a causar una serie de estragos no sólo a la población sino también a sus bienes, a las infraestructuras y al medioambiente. La propagación de la onda de agua en ese caso resultará tanto más dañina cuanto mayor sea el caudal circulante, menor sea el tiempo de propagación y más importante sean los elementos existentes en la zona de afectación (infraestructuras de servicios esenciales para la comunidad, núcleos de población, espacios naturales protegidos, explotaciones agropecuarias, etc.). (INETER/COSUDE 2005, p.13).

2.4. PELIGRO.

2.4.1. Definiciones.

El peligro, es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la actividad del hombre, potencialmente dañino, de una magnitud dada, en una zona o localidad conocida, que puede afectar un área poblada, infraestructura física y/o el medio ambiente. (INDECI, 2006, p.13).

El peligro, es la probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos. En otros países los documentos técnicos referidos al estudio de los fenómenos de origen natural utilizan el término amenaza, para referirse al peligro. (CENEPRED, 2014, p.20).

Factor externo asociado a un fenómeno de origen natural o antropogénico que tiene influencia sobre un ente o sistema. Cuenta con características específicas que lo describen: magnitud o

intensidad, duración, tiempo, ubicación y frecuencia (periodo de retorno, Tr), ésta última permite asociarlo a una probabilidad de ocurrencia ($1/Tr$) (CEPAL, 2007, p.18).

Se puede considerar como la probabilidad de ocurrencia de un evento físico, un fenómeno o una actividad humana con el potencial de causar daño con cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. (Vega Serratos, 2017, p.21).

2.4.2. Clasificación de peligros.

El peligro, según su origen, puede ser de dos clases: los generados por fenómenos de origen natural; y, los inducidos por la acción humana.

2.4.2.1. De origen natural: Hidrológicos, Meteorológicos.

Inundación, es el desborde lateral del agua de los ríos, lagos, mares y/o represas, cubriendo temporalmente los terrenos bajos, adyacentes a sus riberas, llamadas zonas inundables. Suelen ocurrir en épocas de grandes precipitaciones, marejadas y maremotos (tsunami).

Viento, es el movimiento del aire en sentido horizontal, debido a las diferencias de temperaturas existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la Tierra.

Para una determinada región existe una velocidad de viento promedio, cuando supera dicho promedio y genera daños, se tipifica como un viento fuerte o de alta intensidad.

Lluvia, es la precipitación de partículas de agua, en forma líquida, que cae de la nube.

Para una determinada región existe una precipitación promedio, cuando supera dicho promedio y genera daños, se tipifica como una lluvia intensa.

Helada, se produce cuando la temperatura ambiental disminuye a valores cercanos o debajo de cero grados.

Se genera por un exceso de enfriamiento del suelo y por ende las primeras capas de aire adyacentes a él, durante cielos claros y secos en el día

Sequía, es considerada como un fenómeno climático cíclico provocado por una reducción en la precipitación, que se manifiesta en forma lenta y afecta a personas, actividades económicas, a la agricultura, al ambiente e incluso puede interferir en el desarrollo social y económico de los pueblos.

Existen varias definiciones de sequía, las cuales se sustentan en los tipos de impacto que este fenómeno trae como consecuencia.

Granizada, es el agua congelada que cae en forma de granos de hielo translucidos, de estructura hojosa en capas concéntricas. Se originan en las nubes y constituye un fenómeno de ámbito local y de corta duración, que acostumbra a resolverse en lluvia. (INDECI, 2006, p.15).

2.4.3. Criterios de peligro.

- a) Criterio del Gobierno de Francia. Oficina Federal de la Economía de las Aguas, Office Fédéral de l'Économie des Eaux (OFEE, por sus siglas en francés).

La OFEE desarrolló un criterio para evaluar los peligros generados por las inundaciones basado en tres niveles: alto, medio y bajo, por Loat y Petrascheck en 1997. Se define al nivel alto cuando la población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas; en el nivel medio, la población está en riesgo fuera de las viviendas y las edificaciones pueden sufrir daños; para el nivel bajo, las edificaciones pueden sufrir daños leves, y la inundación o el arrastre de sedimentos pueden llegar a afectar el interior de las edificaciones (ver figura 2.1). (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016, p.35).

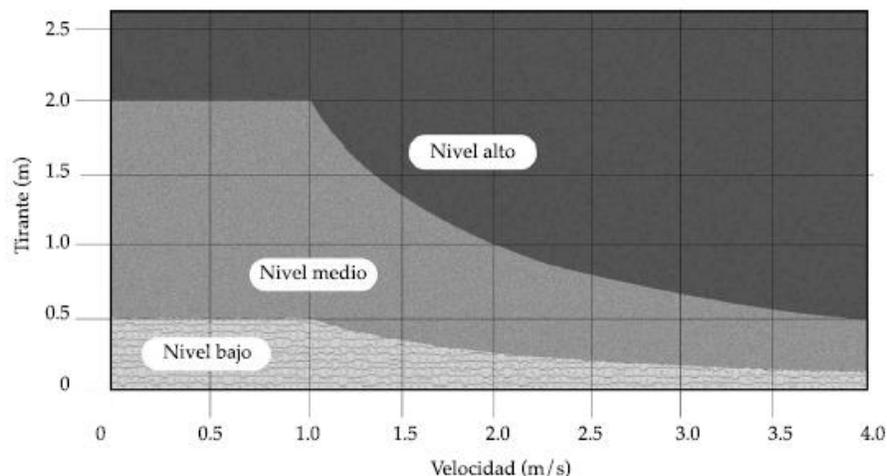


Figura 2.1: Nivel de peligro para inundaciones.

Fuente: Alcocer-Yamanaka, et al., 2016

- b) Criterio de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, Federal Emergency Management Agency (FEMA).

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) desarrolló un criterio para la generación de mapas de peligro, en el que relacionan el tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua v (m/s) (ver figura 2.2). Con base en estas relaciones establece tres rangos de peligro: zona de nivel bajo, amenaza moderada y alto nivel de amenaza. Para la zona de alto nivel de amenaza, la vida de las personas puede estar en peligro y las edificaciones pueden tener fallas estructurales. En la zona de precaución (moderada) se tienen daños a la integridad de las personas y afectaciones en las edificaciones; la zona de bajo peligro no representa una afectación a la población, pero las edificaciones pueden sufrir daños ligeros. (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016, p.35).

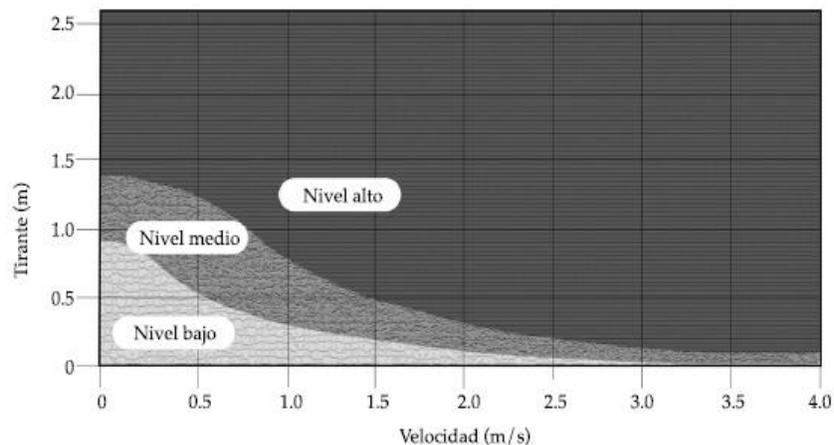


Figura 2.2: Niveles de peligro que relacionan tirante del agua (m) y velocidad (m/s).

Fuente: Alcocer-Yamanaka, et al., 2016

- c) Criterio del Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Government.

El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia, donde se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua, como el que se muestra en la figura 2.3, en el que se definen tres rangos de peligro. En el nivel alto se especifica que la evacuación por vehículos es difícil; además, los adultos tienen problemas para cruzar las calles con seguridad y existe un potencial daño

estructural a las construcciones; la zona de transición depende de las condiciones del lugar; en el nivel bajo se establece que, en caso necesario, los vehículos pueden evacuar a las personas y sus posesiones, y los adultos tendrían inconvenientes para cruzar las avenidas con seguridad. (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016, p.35).

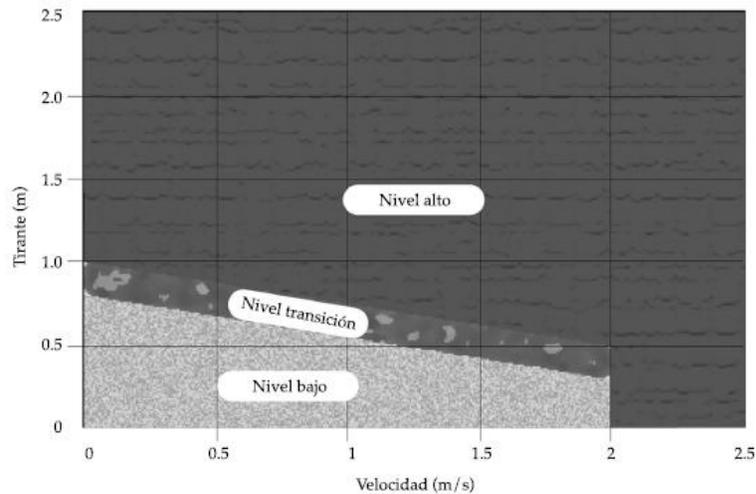


Figura 2.3: Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005).

Fuente: Alcocer-Yamanaka, et al., 2016

d) Criterio propuesto por el IMTA (2015)

Los mapas de peligro propuestos por el IMTA están fundados en investigaciones de Alcocer- Yamanaka et al. 2012, que definen como base para el manejo del agua de las aguas pluviales cuatro componentes: el primero corresponde a la identificación de la problemática de las inundaciones, que puede derivarse de diversos factores; el segundo, a los análisis hidrológicos e hidrográficos en el que se identifican las lluvias que ocasionan inundaciones y la generación de lluvias de diseño, así como la identificación de los usos de suelo, cuencas y microcuencas; el tercero, a la utilización de diversas herramientas de cálculo, que permiten la construcción del modelo de simulación; por último, el cuarto, a la generación de diversos escenarios con los cuales se evaluará el impacto del fenómeno hidrometeorológico. (Alcocer-Yamanaka, et al., 2016, p.36).

2.5. VULNERABILIDAD.

2.5.1. Definiciones.

La vulnerabilidad es la susceptibilidad de la población, sus bienes o sus actividades sociales y económicas de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza. (INDECI, 2016, p.17).

La vulnerabilidad, es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Es la facilidad como un elemento (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta y desarrollo políticoinstitucional, entre otros), pueda sufrir daños humanos y materiales. (INDECI, 2006, p.18)

Es el factor interno de una comunidad o sistema. Comprende las características de la sociedad acorde a su contexto que la hacen susceptibles de sufrir un daño o pérdida grave en caso que se concrete una amenaza (Renda et al., 2017, p.15).

Las vulnerabilidades es el sistema de condiciones y procesos resultado de los factores físicos, sociales, económicos, culturales y ambientales, que aumentan o disminuyen la susceptibilidad de una comunidad o infraestructura al impacto de las amenazas. (INETER/COSUDE 2005, p.11).

2.5.2. Factores de vulnerabilidad.

Exposición

Esta referida a las decisiones y prácticas que ubican al ser humano y sus medios de vida en la zona de impacto de un peligro. La exposición se genera por una relación no apropiada con el ambiente, que se puede deber a procesos no planificados de crecimiento demográfico, a un proceso migratorio desordenado, al proceso de urbanización sin un adecuado manejo del territorio y/o a políticas de desarrollo económico no sostenible. A mayor exposición, mayor vulnerabilidad. (CENEPRED, 2014, p. 122).

Fragilidad

Esta referida a las condiciones de desventaja o debilidad relativa del ser humano y sus medios de vida frente a un peligro. En general, está centrada en las condiciones físicas de una comunidad o sociedad y es de origen interno, por ejemplo: formas de construcción y/o materiales, entre otros. A mayor fragilidad, mayor vulnerabilidad. (CENEPRED, 2014, p. 122).

Resiliencia

Esta referida al nivel de asimilación o capacidad de recuperación del ser humano y sus medios de vida frente a la ocurrencia de un peligro. Está asociada a condiciones sociales y de organización de la población. A mayor resiliencia, menor vulnerabilidad. (CENEPRED, 2014, p. 123)

2.5.3. Vulnerabilidad física.

Se refiere a la localización de los asentamientos humanos en zonas de peligro y a las deficiencias de la estructura física (infraestructura crítica y viviendas) para absorber los efectos de las amenazas. La vulnerabilidad física se conoce también como exposición y puede estar determinada por aspectos como la densidad de población, la localización, el sitio, el diseño y los materiales usados en la construcción.

Tanto la localización física como las deficiencias en la infraestructura (equivalente a la resistencia al impacto negativo por el tipo de construcción) pueden provenir en parte de las condiciones de precariedad y la falta de opciones para una ubicación menos peligrosa, y por otra, debido a la gran extensión territorial que ocupan las múltiples amenazas en un territorio. (Renda et al., 2017, p.15).

Está relacionada con la calidad o tipo de material utilizado y el tipo de construcción de las viviendas, establecimientos económicos (comerciales e industriales) y de servicios (salud, educación, sede de instituciones públicas), e infraestructura socioeconómica (central hidroeléctrica, carretera, puente y canales de riego), para asimilar los efectos del peligro. (INDECI, 2006, p.19).

2.5.4. Análisis de la Vulnerabilidad física.

La vulnerabilidad física se expresa también en la localización de los centros poblados en zonas expuestas al peligro en cuestión. El problema está en que quienes construyen sus viviendas en zonas inundables o deleznales, lo han hecho por carecer de opciones y por tanto, al haber sido empujados a tal decisión por las circunstancias económicas y sociales, difícilmente se podrían apartar de estos riesgos.

Para el respectivo análisis, es importante elaborar un cuadro que contenga las principales variables e indicadores, según los materiales de construcción utilizados en las viviendas y

establecimientos, así como de riesgos existentes; su localización; características geológicas donde están asentadas (INDECI, 2016, p. 20).

2.6. RIESGO.

A continuación, daremos varias apreciaciones o conceptos sobre el riesgo:

- El riesgo es la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas a consecuencia de su condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro. (INDECI, 2016, p. 23)
- La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Tales como muertes, lesiones, propiedad, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental, como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o antropogénicas y las condiciones de vulnerabilidad. (FAO, 2009, p.7)
- Es la probabilidad de que se produzcan pérdidas socio-económicas en un determinado momento y en un área del territorio determinada, a causa de una amenaza. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. (INETER/COSUDE, 2005, p.11).
- El riesgo es el resultado de la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento. (CEPAL, 2007, p.18).

Genéricamente, el riesgo se interpreta como la interacción entre peligro o amenaza y la vulnerabilidad.

2.6.1. Estimación o Cálculo del riesgo.

Una vez identificado los peligros (P) a la que está expuesta el centro poblado y realizado el análisis de vulnerabilidad (V), se procede a una evaluación conjunta, para calcular el riesgo (R), (personas, bienes materiales, etc.) ante la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o tecnológico.

El cálculo del riesgo corresponde a un análisis y una combinación de datos teóricos y empíricos con respecto a la probabilidad del peligro identificado, es decir la fuerza e intensidad de

ocurrencia; así como el análisis de vulnerabilidad de los elementos expuestos al peligro (población, viviendas, infraestructura, etc.), dentro de una determinada área geográfica.

Existen diversos criterios o métodos para el cálculo del riesgo, por un lado, el analítico o matemático; y por otro, el descriptivo.

El criterio analítico, llamado también matemático, se basa fundamentalmente en la aplicación o el uso de la ecuación siguiente:

$$R = P \times V$$

Donde:

- R = Riesgo
- P = Peligro
- V = Vulnerabilidad

Esta ecuación es la referencia básica para la estimación del riesgo.

El criterio descriptivo, se basa en el uso de una matriz de doble entrada: “Matriz de Peligro y Vulnerabilidad”. Para tal efecto, se requiere que previamente se hayan determinado los niveles de probabilidad de ocurrencia del peligro identificado y del análisis de vulnerabilidad, respectivamente.

En la intersección de ambos valores se podrá estimar el nivel de riesgo esperado y por la experiencia acumulada en estos últimos años, este es el criterio que se utilizará para determinar el cálculo del riesgo (INDECI, 2016, p. 26).

2.7. BASES TEÓRICAS.

2.7.1. Características de la Cuenca.

a) Características de geométricas y de forma.

- **Delimitación:** Línea imaginaria que divide cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento producido por la precipitación, que, en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca (Villón Béjar, 2002, p.21).
- **Área de la cuenca (A):** Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca. (Villón Béjar, 2002, p.23).

Tabla 2.1: Clasificación de tamaños de cuencas.

Rangos de áreas (km ²)	Clasificación
< 25	Muy Pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia- pequeña
500 a 2500	Intermedia-grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: Campos Aranda, 1992

- **Perímetro de la cuenca (P):** Se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca. (Villón Béjar, 2002, p.32).
- **Longitud de la cuenca (Lc):** Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca. (Gaspari, et al., 2013, p.51).
- **Ancho promedio de la cuenca (Ap):** Es la relación entre la superficie de la cuenca (A) con Longitud de la cuenca (Lc). (Gaspari, et al., 2013, p.51).

$$Ap = \frac{A}{Lc}$$

- **Factor de Forma o Índice de Horton (IF):** Este factor adimensional que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial. Se expresa como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca (Ap) y la longitud de la cuenca (Lc). (Gaspari, et al., 2013, p.51).

$$IF = \frac{Ap}{Lc}$$

Tabla 2.2: Valores interpretativos del factor de forma.

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,300	Alargada
0,300 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,450	Ni alargada ni ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,20	Muy Ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: Citado en Delgadillo y Moreno, 2012

- **Índice Gravelius o Compacidad (Kc):** Es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca. Se expresa como una relación entre P (perímetro (km)) y A (superficie (km²)) de la cuenca. (Gaspari, et al., 2013, p.51).

$$Kc = \frac{P}{Po} = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A}} = 0,282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

Tabla 2.3: Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius.

Kc	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga
1,5 a 1,75	oval oblonga a rectangular oblonga
>1,75	Rectangular

Fuente: Gaspari, et al., 2013

b) Características de relieve.

- **Pendiente de la cuenca (Sc):** La pendiente de una cuenca, es un parámetro muy importante en el estudio de toda cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo. Es uno de los factores, que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a la magnitud de las crecidas. (Villón Béjar, 2002, p.49).

Dicho parámetro brinda información de la velocidad de escorrentía como así también de las características de los hidrogramas. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales. (Camino, et al.,2018, p.9).

La pendiente refleja los diferentes tipos de relieve, considerándose muy plano a un relieve menor del 0.5 %; plano a 0.5 a 1 %, de 1 a 3 % suave; de 3 a 12 % presenta lomadas; 12 a 20 % relieve accidentado; 20 a 50% muy fuerte; escarpado cuando se distribuye entre 50 y 75 %, y mayor al 75 % se corresponde a un relieve muy escarpado. (Gaspari, et al., 2013, p.54).

- **Curva hipsométrica (CH):** Representa la distribución del área de acuerdo a su elevación. La lectura de la curva hipsométrica de una cuenca permite establecer las áreas comprendidas entre diferentes cotas. (Gaspari, et al., 2013, p.52).

Es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. El gráfico 3.9 muestra tres curvas hipsométricas, confeccionadas por Strahler correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos. La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Las fases de la vida de los ríos quedarían representadas por: curva A que representa la fase de juventud, la curva B que indica la fase de madurez y la curva C que expresa la fase de vejez. (Gaspari, et al., 2013, p.53).

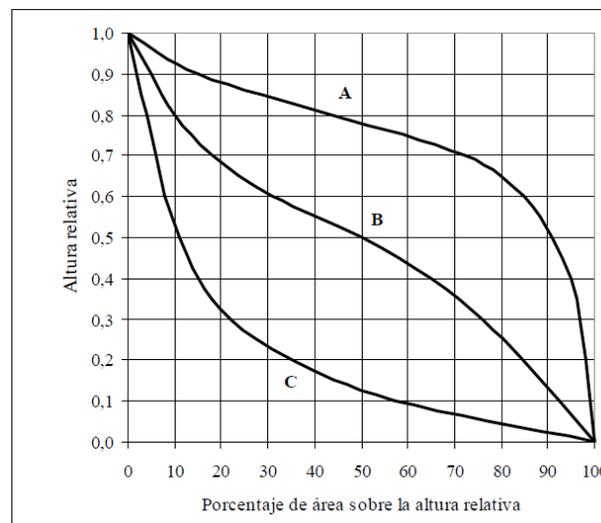


Figura 2.4: Curvas hipsométricas adimensional características del ciclo de erosión.

Fuente: Gaspari, et al., 2013

- **Altitud o elevación media (Em):** es la ordenada media de la curva hipsométrica, en ella, el 50 % del área de la cuenca, está situado por encima de esa altitud y el 50 % está situado por debajo de ella. Numéricamente la elevación media de la cuenca se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Em = \Sigma (a * e) / A$$

donde:

Em = elevación media. (m.s.n.m.)

a = área entre dos contornos. (km^2)

e = elevación media entre dos contornos. ($\text{km}^2/\text{m.s.n.m.}$)

A = área total de la cuenca. (km^2)

(Villón Béjar, 2002, p.37).

- **Pendiente y perfil del cauce principal (S):** El conocimiento de la pendiente del cauce principal de una cuenca, es un parámetro importante, en el estudio del comportamiento del recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación de las características óptimas de su aprovechamiento hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones. En general, la pendiente de un tramo de un cauce de un río, se puede considerar como el cociente, que resulta de dividir, el desnivel de los extremos del tramo, entre la longitud horizontal de dicho tramo. (Villón Béjar, 2002, p.54).

Si se plotea la proyección horizontal de la longitud de un cauce versus su altitud, se obtiene el perfil longitudinal del curso de agua. (Villón Béjar, 2002, p.53).

c) Características de la Red de drenaje.

- **Número de Orden de los cursos de agua:** Es un número que tiene relación estrecha con la cantidad de ramificaciones de la red de drenaje.

Se asigna el primer orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determina o dan origen a otro de orden inmediatamente superior y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor y así sucesivamente hasta llegar al orden de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca. Se ordenan y numeran los afluentes desde las nacientes de una cuenca hacia su cierre o desembocadura. (Gaspari, et al., 2013, p.56).

- **Densidad de drenaje (Dd):** Está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. (Gaspari, et al., 2013, p.54).

En un principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota

deberá recorrer una menor longitud de ladera, con una mayor velocidad de escurrimiento. (Gaspari, et al., 2013, p.55).

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Dónde:

Dd = densidad de drenaje. (km/km²).

Lt : Σ longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km.

A : superficie de la cuenca en km².

Tabla 2.4: Clasificación de la red de drenaje de las cuencas.

Rangos (km/km ²)	Clases	Rangos (km/km ²)	Clases
Junco (2004)		Delgadillo y Páez (2008)	
0,1-1,8	Baja	<1	Baja
1,9-3,6	Moderada	1-2	Moderada
3,7-5,6	Alta	2-3	Alta
		>3	Muy alta

Fuente: Camino, et al.,2018

2.7.2. Tiempo de concentración (Tc).

Se denomina tiempo de concentración (Tc), al tiempo transcurrido, desde que una gota de agua cae, en el punto más alejado de la cuenca hasta que llega a la salida de ésta (estación de aforo). Este tiempo es función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca. (Villón Béjar, 2002, p.251).

Según Kirpich, la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$Tc = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Dónde:

Tc = tiempo de concentración, en min.

L = máxima longitud del recorrido, en m.

H = diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal, en m.

2.7.3. Método Número de curva.

Los hidrólogos del Soil Conservation Service dependiente del U.S. Department of Agriculture, han desarrollado, durante las tres últimas décadas, un método para la estimación de la lluvia en exceso ocasionada por una tormenta. Este método es la consolidación de diversos procedimientos y se aplica principalmente en los estudios de avenidas máximas en cuencas sin aforos.

En el método del Soil Conservation Service una combinación específica de suelo, uso del terreno y su tratamiento, se denomina: complejo hidrológico suelo cobertura y se designa con la letra N. El valor de N es un parámetro hidrológico de una cuenca o zona determinada e indica el potencial para generar escurrimiento cuando los suelos no están congelados, de manera que un alto valor de N producirá gran escurrimiento y viceversa.

Grupos Hidrológicos de suelos.

Las propiedades de un suelo son un factor esencial en el proceso de generación del escurrimiento a partir de la lluvia y, por lo tanto, los suelos deberán ser clasificados por medio de un parámetro hidrológico: *“la velocidad de infiltración mínima obtenida para un suelo desnudo (sin vegetación) después de estar mojado suficiente tiempo”*. Además, las influencias de la superficie y de los horizontes del suelo deben ser incluidas, lo cual conduce a tomar en cuenta dos velocidades: velocidad de infiltración, que es la velocidad con la cual el agua penetra en un suelo por su superficie y es controlada por sus condiciones exteriores; velocidad de transmisión, es la velocidad con la cual el agua se desplaza en el suelo y es controlada por los horizontes del mismo.

El parámetro velocidad de infiltración descrito es un indicador del potencial de escurrimiento del suelo y es la base de clasificación del Soil Conservation Service, en los cuatro grupos hidrológicos de suelos, que son:

GRUPO A: (Bajo potencial de escurrimiento). Suelos que tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de arenas y gravas profundas, con bueno a excesivo drenaje. Estos suelos tienen altas velocidades de transmisión del agua.

GRUPO B: Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas - finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos. Son básicamente suelos arenosos.

GRUPO C: Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estrato que impide el flujo del agua, son suelos con texturas finas. Estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión.

GRUPO D: (Alto potencial de escurrimiento). Suelos que tienen muy bajas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de suelos arcillosos con alto potencial en hinchamiento, suelos con nivel freático alto y permanente, suelos con estratos arcillosos cerca de su superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables. Estos suelos tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua. (Campos Aranda, 1992, p. D-1).

Clases de uso del terreno y tratamientos.

Uso del terreno: Es la cobertura del terreno o cuenca, incluye cualquier tipo de vegetación, arroyo y humus e mantillo y el barbecho (suelo desnudo), así como los usos no agrícolas como son aguas superficiales (lagos, embalses, pantanos, etc.) y superficies impermeables (caminos, techos, etc.).

Tratamiento del terreno: Se aplica principalmente a los usos agrícolas del terreno e influye las prácticas mecánicas como el contorno o terraceo y las prácticas de manejo tales como el control del pastoreo o la rotación de cultivos. (Campos Aranda, 1992, p. D-2).

Estimación de las pérdidas iniciales: Se definen a las pérdidas iniciales o Abstracciones Iniciales, como la cantidad máxima de lluvia que puede ser absorbida bajo condiciones específicas sin que se produzca escurrimiento.

El U.S. Soil Conservation Service, designa a las pérdidas iniciales como detención Inicial (Ia) indicando que abarca los tres conceptos siguientes: intercepción, almacenamiento superficial e infiltración, todos los cuales ocurren antes de que el escurrimiento empiece, basándose en los

registros de lluvia y escurrimiento de un número considerable de pequeñas cuencas experimentales, este organismo encontró la siguiente relación:

$$I_a = 0,20 (S)$$

La cual indica que en promedio el 80% del potencial de retención es infiltración que ocurre después que el escurrimiento comenzó. (Campos Aranda, 1992, p. D-7).

S es la llamada infiltración Potencial, en milímetros, se determina con la ecuación siguiente, en función del parámetro N denominado número de la curva de escurrimiento del complejo hidrológico suelo-cobertura. (Campos Aranda, 1992, p. 6-22).

$$S = \frac{25400}{N} - 254$$

la ecuación está en sistema métrico, es decir, S en milímetros.

Estimación de la lluvia en exceso: De acuerdo al U.S. Soil Conservation Service, el escurrimiento superficial acumulado Q en milímetros (igual a la lluvia en exceso Pe) tiene la expresión siguiente: (Campos Aranda, 1992, p. 6-28).

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

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Donde las ecuaciones están en sistema métrico, es decir, con Q, P y S en milímetros.

siendo:

Q = Pe = escurrimiento (lluvia en exceso).

P = precipitación de la tormenta.

Ia= pérdidas iniciales de la tormenta.

S = infiltración potencial o potencial de retención.

Lógicamente el valor de S y por lo tanto, la magnitud de Q dependerán de la humedad que contenga el suelo en el instante en que se presenta la tormenta; lo anterior, se define tomando

en cuenta la llamada: condición de humedad antecedente (CHA), para la cual se tienen tres niveles, de acuerdo a la cantidad de lluvia ocurrida en los cinco días previos al de ocurrencia de la tormenta, tales niveles son:

CHA - I (seca): Bajo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están secos, pero en buen estado para ararse y cultivarse.

CHA - II (media): Condición promedio.

CHA - III (húmeda): Alto potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por las lluvias antecedentes. (Campos Aranda, 1992, p. D-9).

2.7.4. Hidrogramas unitarios sintéticos.

El hidrograma unitario (HU) de una cuenca. se define como el hidrograma de escurrimiento debido a una precipitación con altura en exceso (h_{pe}) unitaria (un mm, un cm. una pulg, etc.). repartida uniformemente sobre la cuenca, con una intensidad constante durante un período específico de tiempo (duración en exceso d_e). (Villón Béjar, 2002, p.210).

Para usar el método del hidrograma unitario, siempre es necesario contar con al menos un hidrograma medido a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, la mayor parte de las cuencas, no cuentan con una estación hidrométrica o bien con los registros pluviográficos necesarios.

Por ello, es conveniente contar con métodos con los que se puedan obtener hidrogramas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca. Los hidrogramas unitarios así obtenidos se denominan sintéticos.

Debido a su importancia, se ha desarrollado una gran cantidad de hidrogramas unitarios sintéticos; a continuación, se explicarán uno de ellos:

Hidrograma unitario triangular

Mockus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular, como se muestra en la figura, que lo usa el SCS (Soil Conservation Service), la cual a pesar de su simplicidad

proporciona los parámetros fundamentales del hidrograma: caudal punta (Q_p), tiempo base (t_b) y el tiempo en que se produce la punta (t_p). (Villón Béjar, 2002, p.224).

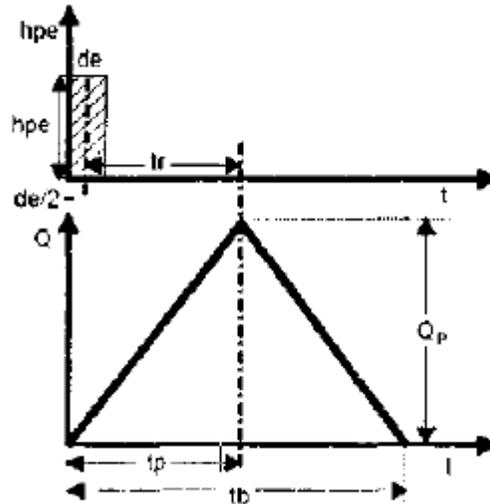


Figura 2.5: Hidrograma unitario sintético (forma triangular).

Fuente: Villón Béjar, 2002, p.225

Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2,67 t_p$$

A su vez, el tiempo pico se expresa como (figura 3.23)

$$t_p = (de/2) + t_r$$

donde:

t_b = tiempo base, en horas(h).

t_p = tiempo pico, en horas(h).

t_r = tiempo de retraso, en horas(h).

de = duración en exceso, en horas(h).

El tiempo de retraso, se estima mediante el tiempo de concentración t_c , de la forma:

$$t_r = 0,6 t_c$$

donde:

t_r = tiempo de retraso, en horas(h).

t_c = tiempo de concentración, en horas(h). (Villón Béjar, 2002, p.226).

Además, la duración en exceso con la que se tiene mayor gasto de pico, a falta de mejores datos, se puede calcular aproximadamente para cuencas grandes, como:

$$d_e = 2 \sqrt{t_c}$$

o bien, para cuencas pequeñas, como:

$$d_e = t_c$$

donde:

d_e = duración en exceso, en horas.

t_c = tiempo de concentración, en horas. (Villón Béjar, 2002, p.227).

El caudal pico o máximo se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{0.208 * A * P_e}{t_p}$$

Donde:

Q_p = caudal punta, en m^3/s

P_e = precipitación en exceso, en mm

2.7.5. Análisis de frecuencia.

El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. (Chow et al, 1994, p.391).

Cuando la amplitud del registro en años es menor que los períodos de retorno que tendrán las lluvias máximas en 24 horas, se ajusta a los datos una distribución de probabilidades, para

estimar a partir de ella los valores probables de lluvia máxima diaria para los períodos de retorno requeridos. (Campos Aranda, 1992, p. 4-49).

Las pruebas de bondad de ajuste consisten en comprobar estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada se ajusta a una determinada función de probabilidades teóricas seleccionadas a priori, con los parámetros estimados en base a los valores muestrales. (Villón Béjar, 2002, p.171).

La incertidumbre debida al desconocimiento de la distribución de probabilidades de los datos es un tema de controversia y en realidad los métodos estadísticos no resuelven el problema, pues, aunque los tests de Kolmogorov-Smirnov son de uso frecuente en hidrología. (Campos Aranda, 1992, p. B-2).

La prueba de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo. (Villón Béjar, 2002, p.181).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y APLICACIÓN.

3.1. Variables.

3.1.1. Variables independientes.

Una variable independiente es la causa que genera el cambio en una variable dependiente. En este caso se toma la variable independiente como tratamiento o intervención para manipularla y obtener cambios en la variable dependiente (Arias Gonzales, 2020, p. 35).

Cuando desempeña el rol de causa mayoritaria, cuya magnitud o característica se relaciona con otra a la cual afectar, en el presente caso son: topografía, caudal máximo (velocidad de tránsito, tirante de la sección), exposición de las viviendas.

3.1.2. Variables dependientes.

Son aquellas que se modifican o cambian a causa de la intervención de la variable independiente, es decir, “efecto” (Arias Gonzales, 2020, p. 35).

Cuando desempeña el rol de efecto o consecuencia, dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. En el presente caso son: vulnerabilidad, peligro.

3.1.3. Variables intervinientes.

Son variables que el investigador no puede controlar, pero que pueden estar presentes e intervenir en los resultados de la investigación (Arias Gonzales, 2020, p. 35).

No son causas ni efectos, pero tienen importancia en el estudio ya que podrían servir de explicación parcial a determinadas características consecuentes o porque son reguladoras del efecto de la variable independiente. Entre estas variables identificadas para la presente investigación se tienen: uso de suelo, vegetación.

3.2. Tipo de investigación.

Este trabajo de investigación tiene por finalidad la búsqueda y consolidación del saber y la aplicación de los conocimientos en el área de gestión de riesgos y conocimientos adquiridos de ingeniería. En este sentido este trabajo de investigación es del tipo: **Investigación aplicada.**

Este tipo de investigación se abastece por el tipo básico o puro, ya que mediante la teoría se encarga de resolver problemas prácticos, se basa en los hallazgos, descubrimientos y soluciones

que se planteó en el objetivo del estudio, normalmente este tipo de investigación se utiliza en la medicina o ingenierías (Arias Gonzales, 2020, p. 43).

La ciencia aplicada se basa en el sistema de conocimientos descubiertos por la ciencia básica para poder resolver sus problemas.

3.3. Nivel de la investigación.

El nivel o alcance se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto del estudio (citado en Arias Gonzales, 2020, p. 44)

Los estudios descriptivos permiten la posibilidad de predecir un evento, aunque sean de forma rudimentaria, sin embargo, se debe tener la base teórica correcta (Arias Gonzales, 2020, p. 44). En este tipo de estudio se observa, describe y fundamentan varios aspectos del fenómeno. Tienen como principal función especificar las propiedades, características, perfiles de grupos, comunidades, objeto o cualquier fenómeno, se recolectan datos de la variable de estudio y se miden (Citado en Arias Gonzales, 2020, p. 44).

Por lo tanto, el nivel de investigación en este trabajo es de: **Descriptivo**.

3.4. Diseño de la investigación.

Cuando se habla del diseño, se refiere a las estrategias, procedimientos y pasos que se debe tener para abordar la investigación, lo que encierra un conjunto de procedimientos racionales y sistemáticos llevados a cumplir con la solución del problema general (Arias Gonzales, 2020, p. 46).

En el presente trabajo de investigación se pretende analizar el nivel de riesgo a través de la velocidad, tirante, geometría del río y la exposición de las viviendas. Por lo tanto, el presente trabajo de investigación tiene un diseño: **mixto cuantitativo-cualitativo**.

Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio. (Hernández Sampieri, et al., 2014, p. 534).

A continuación, se presentará los procedimientos y pasos que aborda el trabajo.

3.5. Metodología para el análisis del riesgo.

Se han desarrollado a nivel internacional diversas metodologías para el análisis del riesgo para diferentes tipos de amenazas naturales o antrópicas, pocas metodologías permiten realizar un análisis a nivel país, departamental y región, por dos razones principales: primero, la falta de información detallada que impide la conformación de bases de datos y, segundo, la falta de metodologías que permitan modelar de manera integrada las amenazas, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el riesgo que se deriva de su respectiva integración y convolución.

El análisis de riesgo es un procedimiento técnico que permite la estimación del riesgo, que este último es un proceso que se realiza para generar el conocimiento del peligro o amenaza, analizar la vulnerabilidad y establecer los niveles de riesgo que permiten la toma de decisiones.

El análisis del peligro o amenaza comprende una serie de criterios mínimos:

- El origen; el factor desencadenante del proceso.
- La zona afectada; el área susceptible de sufrir los efectos.
- La causa o causas; cuales son las acciones que provocan el problema.
- Las consecuencias; que efectos resultan del problema.

Se establecerán y seleccionarán aquellos atributos de valorización que permitan jerarquizar y ponderar los efectos que generan las distintas situaciones de riesgo. Se evaluará la magnitud, la probabilidad de ocurrencia, entre otras variables.

El análisis de la vulnerabilidad debe relacionar los factores de exposición, y fragilidad de los elementos expuestos al peligro. Cada uno de estos factores contiene información del elemento expuesto, la cual debe ser clasificada en sus dimensiones. Abarca diferentes dimensiones que se vinculan a las características de una comunidad expuesta a determinada amenaza. Si bien existen múltiples dimensiones (física, social, ambiental, institucional, cultural, política entre otras), que se vinculan entre sí, en el presente trabajo se enfatizará el análisis particular de la dimensión física.

La estimación del riesgo debe ser prospectiva, anticipando eventos posibles que pueden ocurrir en el futuro.

A continuación, se presenta en forma de esquema la metodología de análisis de riesgo por máximas crecidas con su consecuente inundación adoptada para el presente trabajo.

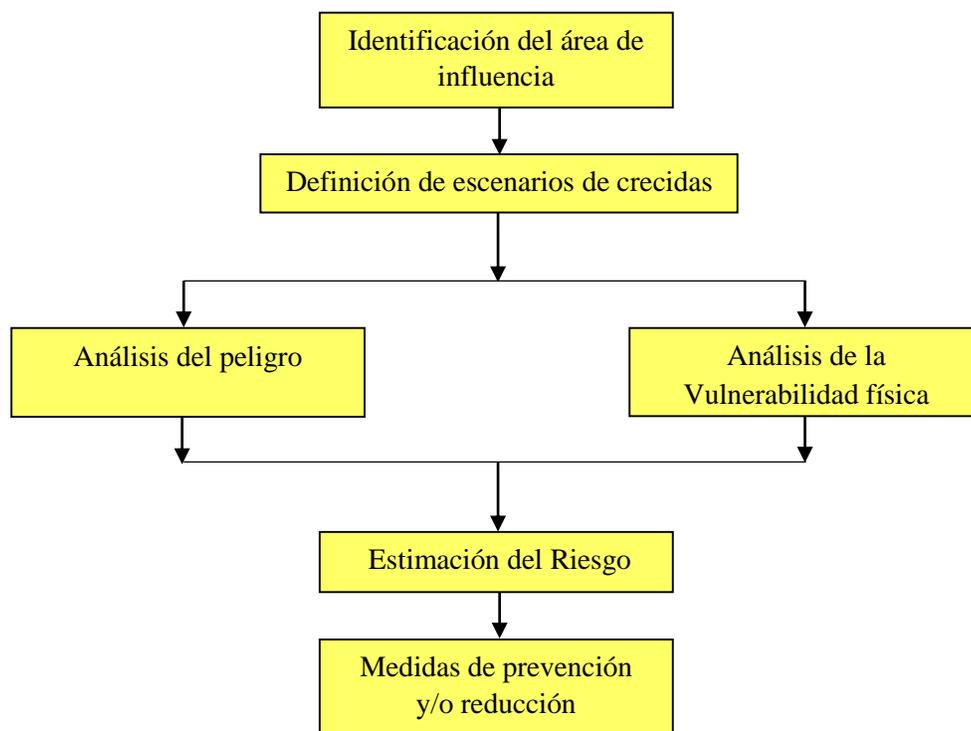


Figura 3.1: Esquema general para el análisis del riesgo.

Fuente: Elaboración propia

Se describe la metodología a detalle que se aprecia el esquema general para el análisis del riesgo para el presente trabajo:

1. Identificación del área de influencia.

Se identifica, ubica y delimita el área geográfica, con la ayuda de imagen satelital obtenida de google earth o de un mapa cartográfico, donde se presenta las máximas crecidas, el posible impacto en las áreas o zonas de la comunidad y lotes de las personas cerca al río, podría ser la más afectada por la ocurrencia de un evento adverso, como la pérdida de bienes materiales, la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua y destrucción de sus cultivos.

2. Definición de escenarios de crecidas.

Un escenario no es una predicción de un pronóstico específico por sí mismo; es una plausible descripción de lo que puede ocurrir. Los escenarios describen eventos, tendencias y su

evolución misma, lo que ayuda a indicar recomendaciones en lo referente a la ejecución y/o implementación de medidas estructurales y no estructurales de prevención y/o reducción de riesgos. (CENEPRED, 2014, p.27).

Según la bibliografía que se consulta, se estima el riesgo antes de que ocurra el desastre. En este caso se plantea y define escenarios u peligros hipotético, para necesariamente reconocer los elementos detonantes de la amenaza, los agentes causales, así como detectar el origen y tipo de la amenaza principal que se evalúa, que para este caso es la máxima crecida.

3. Análisis del peligro.

Se tiene identificado el área de influencia y la definición de los escenarios generados por origen natural o antrópica que da una crecida máxima, se necesita analizar los parámetros que intervienen en la génesis (mecanismo generador) del fenómeno y la caracterización de la manifestación de la amenaza. Las cuáles serán la magnitud, frecuencia, periodo de retorno, extensión, severidad, entre otras variables de análisis que permiten entender el comportamiento de la amenaza de una máxima crecida.

En la siguiente figura se muestra y detalla el proceso para el análisis de peligro para el trabajo:

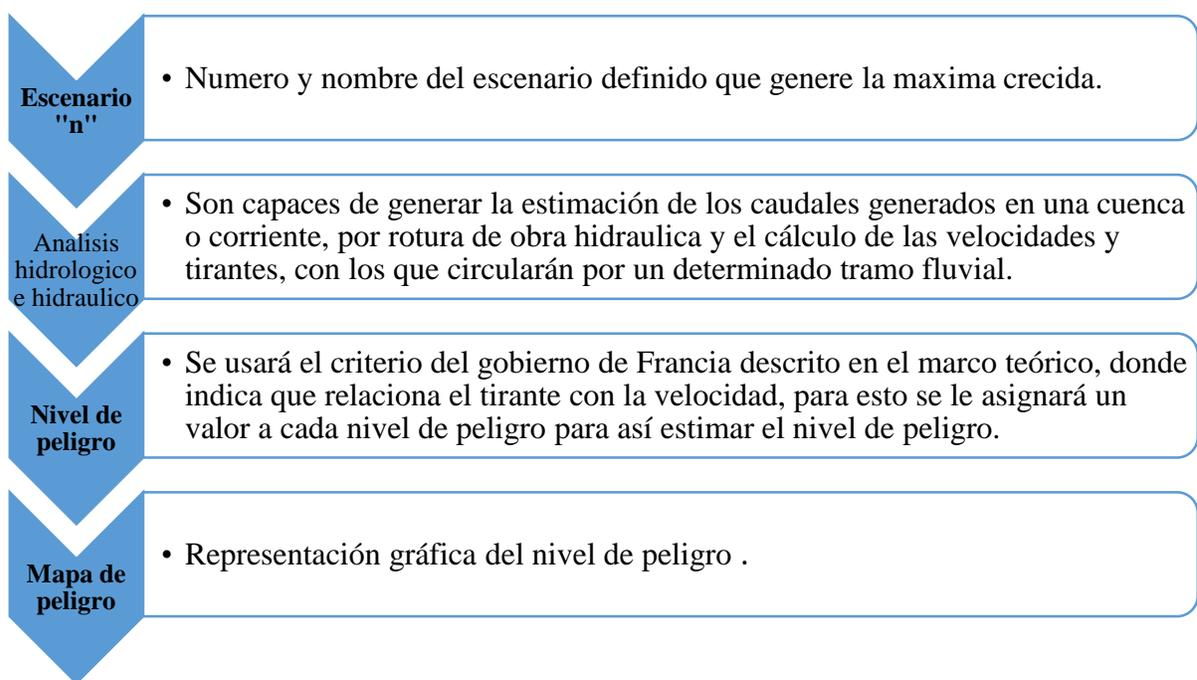


Figura 3.2: Descripción del procedimiento para el análisis del peligro.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.3: Procedimiento para el análisis del peligro para cada escenario definido.

Fuente: Elaboración propia

4. Análisis de la Vulnerabilidad física.

A continuación, se presenta el procedimiento del análisis de la vulnerabilidad para el trabajo:

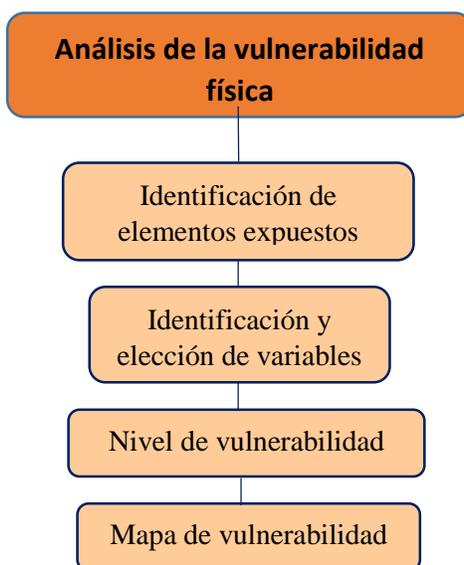


Figura 3.4: Procedimiento para el análisis de la vulnerabilidad física.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe a detalle el procedimiento del análisis de la vulnerabilidad física para el presente trabajo.

➤ **Identificación de elementos expuestos:** Este proceso consiste en identificar los lotes que se encuentran expuestos al peligro que se está evaluando en la zona aguas debajo de la presa Rumicancha.

➤ **Identificación y elección de variables:** Indica las condiciones de desventaja o debilidad del elemento en análisis expuesto al peligro. En donde se cumple que, a mayor fragilidad, mayor será vulnerabilidad.

Se define el parámetro de medición o evaluación como ser: material predominante en paredes, techos, pisos, antigüedad, conservación de edificación, etc.

➤ **Nivel de vulnerabilidad:** Con la identificación y elección de las variables más representativas de vulnerabilidad física las cuales se indicaron anteriormente. Se procede la asignación de un peso (ponderación), de acuerdo a su incidencia. A mayor peso, mayor incidencia. tiene mayor incidencia.

Asignación de un valor a cada uno de los indicadores (nivel de vulnerabilidad) de cada variable. Mayor valor al que tiene mayor incidencia. Con los valores anteriores se crea la matriz.

Mediante el SIG, se multiplica la ponderación de la variable con el valor del indicador.

De esta forma se obtiene un puntaje para cada lote, de la sumatoria resultante.

Para establecer los rangos de vulnerabilidad se realiza la diferencia entre el valor mayor posible y el menor posible, el resultado se lo divide entre 3 y obtenemos los valores que indica los niveles de vulnerabilidad física.

➤ **Mapa de vulnerabilidad:** Representación gráfica del nivel de la vulnerabilidad física de cada elemento expuesto al peligro dentro del área de influencia.

5. Estimación del Riesgo.

Identificado y analizado el peligro a lo que está expuesta el ámbito geográfico de estudio mediante la evaluación de los parámetros: la magnitud, la frecuencia o periodo de recurrencia, y el factores desencadenante, condicionantes de las máximas crecidas de origen natural o antrópica, y realizado el respectivo análisis de los componentes que inciden en la vulnerabilidad

explicada por la exposición, fragilidad, la identificación de los elementos potencialmente vulnerables, el tipo y nivel que se puedan presentar, se procede a la conjunción de éstos para calcular el nivel de riesgo del área en estudio. Siendo el riesgo el resultado de relacionar el peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias.

6. Medidas de prevención y/o reducción.

Se reconocen, en general, como medidas de prevención y reducción del riesgo asociadas a las máximas crecidas a aquellas que se realizan con anterioridad a la ocurrencia de desastres con el fin de evitar que dichos desastres se presenten y/o para disminuir sus efectos, Es decir, la reducción del riesgo es una acción antes del suceso.

3.6. Aplicación.

3.6.1. Identificación del área de influencia.

La identificación del área de influencia en el sector de aguas abajo de la presa, ha sido especificada en consideración el espacio territorial de los lotes, que corresponde a aquellas áreas físicas donde pueden ser potencialmente afectadas, por el impacto de crecidas que se desborden del Rio Sella. En las siguientes imágenes se muestra delimitado con color rojo el área de influencia. El área delimitada es de 3,24 km²



Figura 3.5: Imagen satelital del área de influencia.

Fuente: Elaboración propia

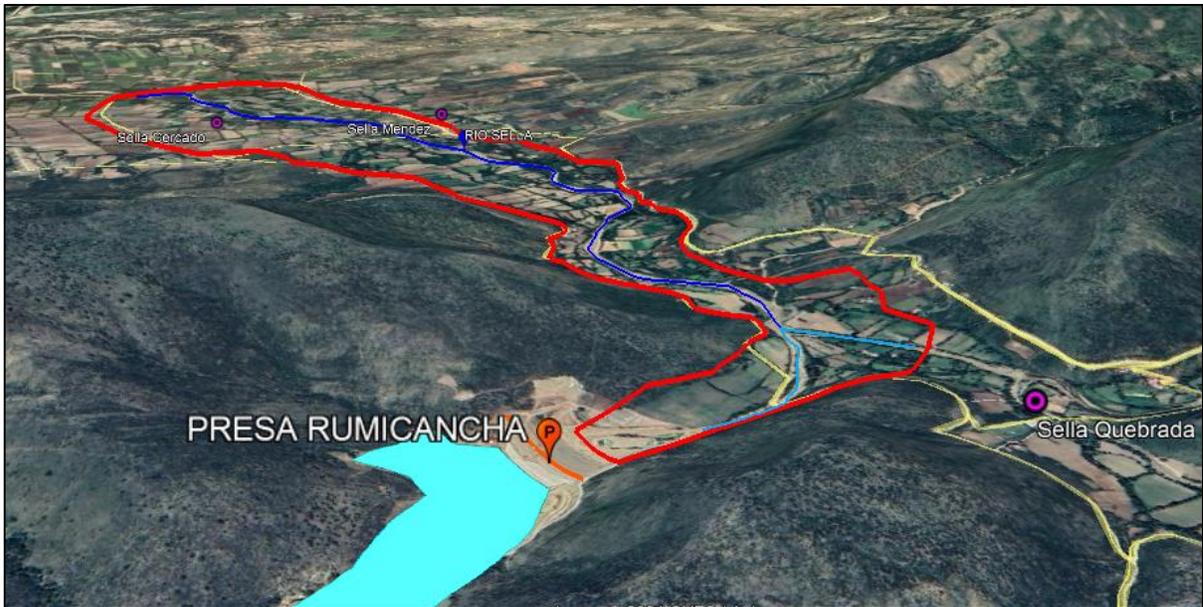


Figura 3.6: Imagen satelital del área de influencia aguas abajo de la presa.

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Definición de escenarios de crecidas.

Considerando la presencia del embalse y presa, aguas arriba del río Sella, como también su afluente el río Chaupicancha, se ha definido los siguientes escenarios:

Escenario 1: Crecida a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.

Para periodos de retorno (T) de:

T = 500 años

T = 1000 años

T = 5000 años

T = 10 000 años

Las crecidas e inundaciones en ríos o quebradas están determinadas principalmente por la fuerte lluvia. A veces, la lluvia aporta tanta agua, que rebasa la capacidad de los cauces, y se derraman, afectando los terrenos donde los suelos no logran absorber toda el agua que llega hasta dicho lugar.

La temporada lluviosa en el medio dura aproximadamente seis meses, de octubre a marzo. El mes más lluvioso suele ser enero, pero, a veces, hay un incremento de la precipitación en los meses de enero a marzo. Es en los tres meses cuando normalmente ocurren las máximas crecidas y su consecuente inundación.

Las crecidas son parte del comportamiento natural del río durante la época lluviosa. Sin embargo, lo mejor es estar en alerta y la protección a tiempo. La única manera es el conocimiento preliminar de la caracterización del posible impacto que tendrá en la zona de interés.

El escenario 1 manifestará un tipo de crecida fluvial y su consecuente inundación aguas abajo, que según su mecanismo generación será la inundación fluvial o por desbordamiento de río.

Escenario 2: Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha.

El escenario 2 tendrá el propósito de simular el comportamiento del caudal máximo de crecida generada por la rotura de la presa de Rumicancha (materiales sueltos), en función al volumen del embalse y altura de agua, con la consideración del caso de rotura no coincide de caudales entrantes en el embalse, es decir, el embalse lleno hasta su máximo nivel normal de explotación.

De manera preliminar se tendrá el conocimiento de su impacto y sus consecuencias por la descarga del caudal máximo en la zona aguas abajo de la presa.

El escenario 2 manifestará un tipo de crecida fluvial y su consecuente inundación aguas abajo, que según su mecanismo generación será la inundación por rotura u operación incorrecta de obra de infraestructura hidráulica.

Escenario 3: Crecida a partir por el sobrevertimiento y consecuente rotura de la presa Rumicancha.

Una de las causas más importantes de la falla es a causa del sobrevertimiento del embalse que se debe a la incertidumbre del comportamiento de la cuenca hidrográfica y la determinación de sus máximos aportes que se deben a la escasez de datos y registros hidrometeorológicos.

A nivel mundial se han registrado fallas por estas causas, debido a la incertidumbre que existe sobre el comportamiento de la cuenca hidrográfica y la influencia que representa los cambios climáticos que experimenta el planeta en los últimos años.

De forma preliminar se tendrá el conocimiento de su impacto y sus consecuencias en la zona aguas abajo de la presa.

El escenario 3 manifestará una crecida fluvial y su consecuente inundación aguas abajo, que según su mecanismo generación será la inundación por rotura u operación incorrecta de obra de infraestructura hidráulica.

3.6.3. Análisis Del Peligro.

3.6.3.1. Análisis hidrológico e hidráulico.

3.6.3.1.1 ESCENARIO 1.

Crecida a causa de esorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.

El análisis hidrológico e hidráulico para el escenario 1 es de la siguiente manera:

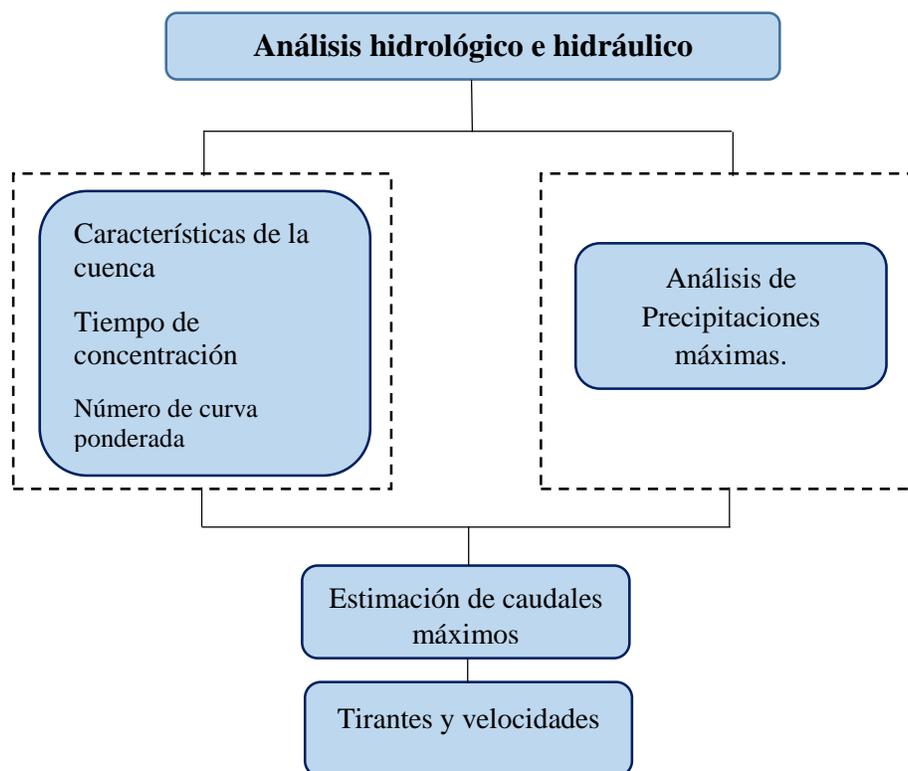


Figura 3.7: Procedimiento para el análisis hidrológico e hidráulico.

Fuente: Elaboración propia

a) Características de la Cuenca.

Posteriormente, se determinó las características de geometría, de forma, de relieve, y red de drenaje de las subcuencas para cada escenario, a través del ArcGIS, ArcView y fórmulas matemáticas de la literatura.

Características de geométricas y de forma.

Para la delimitación de la subcuenca, se utiliza el programa ArcGIS en base de un modelo de elevación digital (DEM), en formato raster de resolución de 12,5 metros.

Los valores de geometría y de forma se obtuvieron mediante el uso del programa ArcGIS y formulas empíricas de bibliografía.

Para el escenario 1, se determina los siguientes valores de geometría y forma:

El área de la cuenca de **67,24 km²** (Cuenca pequeña).

El perímetro de la subcuenca Chaupicancha es **46 km**

La longitud de la subcuenca Chaupicancha es de **15,63 km**.

El ancho promedio de la subcuenca Chaupicancha es:

$$Ap = \frac{67,24}{15,63} = \mathbf{4,30 \text{ km}}$$

Para la subcuenca chaupicancha el factor de forma es:

$$IF = \frac{Ap}{Lc} = \frac{4,30}{15,63} = \mathbf{0,28}$$

Para la subcuenca Chaupicancha el índice de compacidad es:

$$Kc = 0,282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) = 0,282 * \left(\frac{46}{\sqrt{67,24}} \right) = \mathbf{1,58}$$

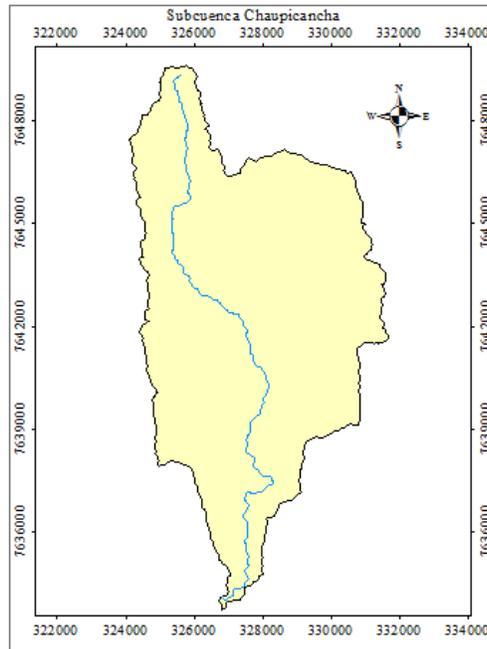


Figura 3.8: Delimitación Subcuenca Chaupicancha con ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

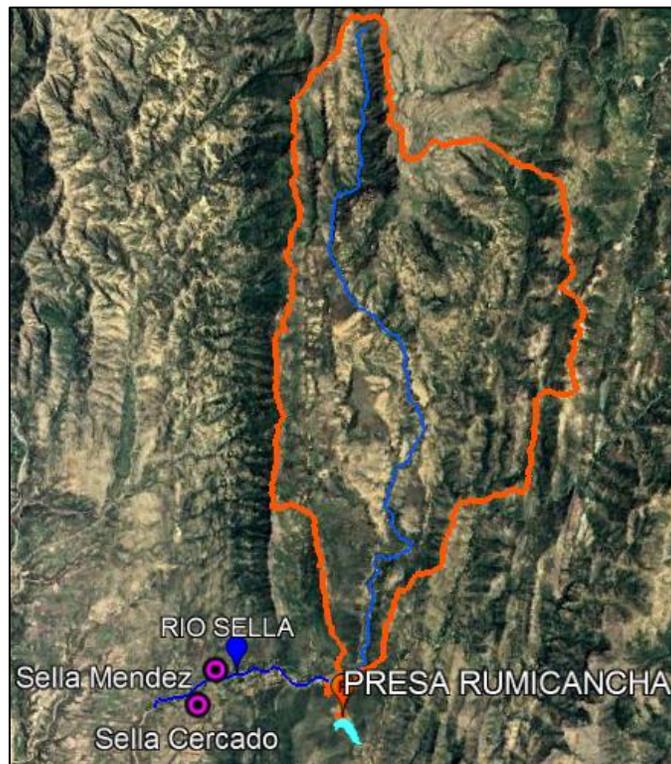


Figura 3.9: Delimitación Subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

Características de relieve.

Para determinar la pendiente de una cuenca se utilizó el modelo digital de elevación, la delimitación de cada subcuenca y con el uso del programa ArcView.

La subcuenca Chaupicancha tiene una pendiente de: **Sc = 42 %**

Tabla 3.1: Cálculos para la obtención de la curva hipsométrica de subcuenca Chaupicancha.

		A	B	A*B	C	D	(A/ A _{Total})* 100	(D/ A _{Total})* 100
Cota más Baja (m.s.n.m.)	Cota más Alta (m.s.n.m.)	Área Parcial (km ²) (Si)	Altitud media de cada área parcial (m.s.n.m.) (Hi)	(Si)*(Hi)	Áreas acumuladas (km ²)	Áreas que quedan sobre las altitudes (km ²)	% del Total	% Total que queda sobre la altitud
2182	2200	0,211	2191	461,34	0,21	67,03	0,31	99,7
2200	2300	1,693	2250	3809,49	1,90	65,33	2,52	97,2
2300	2400	4,470	2350	10503,71	6,37	60,86	6,65	90,5
2400	2500	7,285	2450	17849	13,66	53,58	10,84	79,7
2500	2600	10,075	2550	25691,16	23,73	43,50	14,98	64,7
2600	2700	9,392	2650	24888,08	33,13	34,11	13,97	50,7
2700	2800	9,000	2750	24751	42,13	25,11	13,39	37,3
2800	2900	7,632	2850	21752,56	49,76	17,48	11,35	26,0
2900	3000	5,660	2950	16696,52	55,42	11,82	8,42	17,6
3000	3100	3,844	3050	11723,02	59,26	7,98	5,72	11,9
3100	3200	2,645	3150	8330,98	61,91	5,33	3,93	7,9
3200	3300	2,045	3250	6646,35	63,95	3,29	3,04	4,9
3300	3400	1,665	3350	5579,34	65,62	1,62	2,48	2,4
3400	3500	1,137	3450	3921,74	66,75	0,48	1,69	0,7
3500	3600	0,463	3550	1643,77	67,22	0,02	0,69	0,0
3600	3681	0,021	3640,5	75,77	67,24	0,00	0,03	0,0
		67,24		184 323,8			100	

Fuente: Elaboración propia

La curva hipsométrica se determina con apoyo de un modelo digital de elevación con Sistema de Información Geográfica (ArcGis).

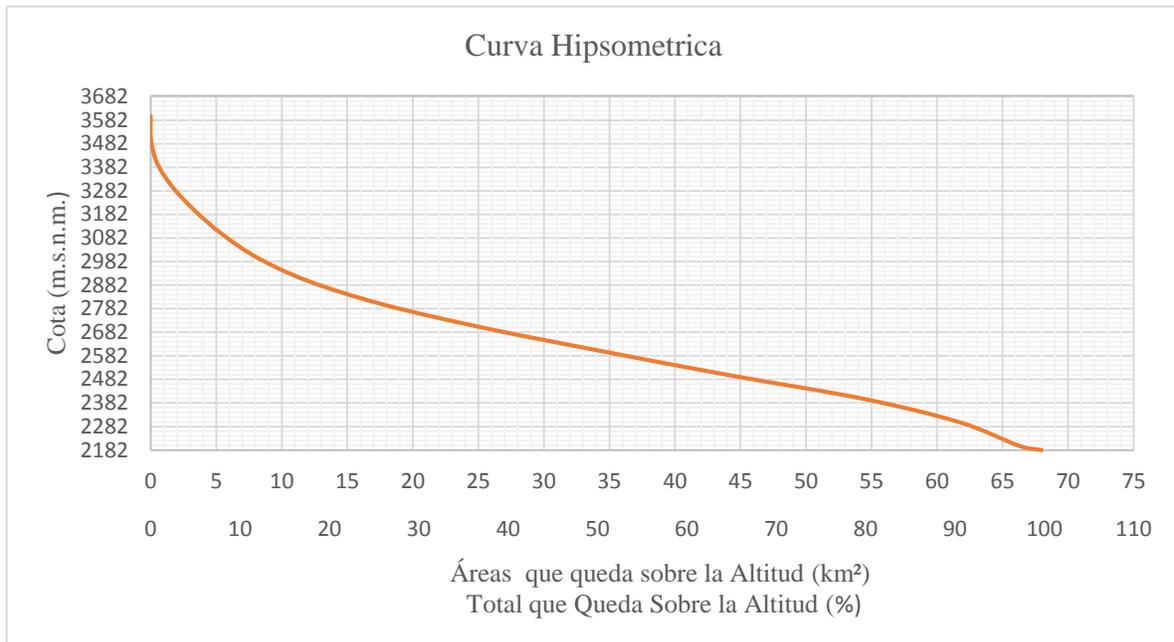


Figura 3.10: Curva hipsométricas de la subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

De las curvas hipsométricas obtenida se puede decir que según la figura 3.9:

La subcuenca Chaupicancha se asemeja a una curva **B**.

La subcuenca Chaupicancha tiene una elevación media:

$$\Sigma (a * e) = 184\,323,8 \text{ km}^2/\text{m.s.n.m. (dato de la tabla 3.4)}$$

$$A = 67,24 \text{ km}^2$$

$$Em = \frac{\Sigma (a * e)}{A} = \frac{184\,323,8}{67,24} = \mathbf{2741 \text{ m. s. n. m.}}$$

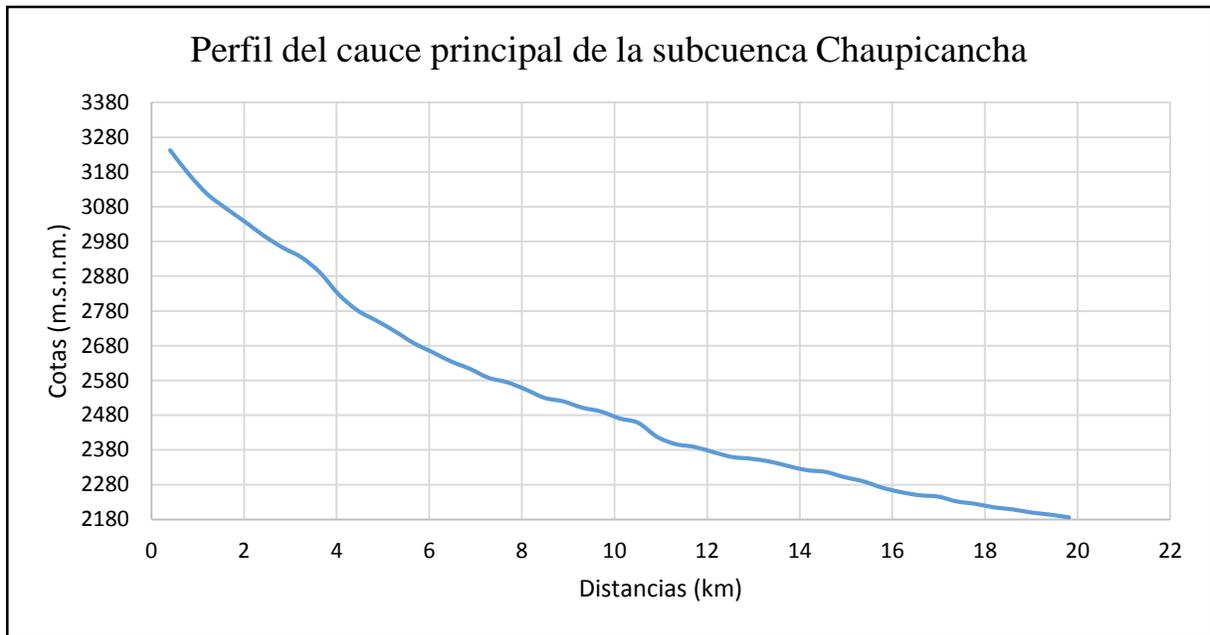


Figura 3.11: Perfil del cauce principal de la subcuenca de la Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

La pendiente del cauce principal de la subcuenca de la Chaupicancha:

Hmax = 3243 m.s.n.m. Cota máxima

Hmin = 2186 m.s.n.m. Cota mínima

L = 20,00 km Longitud del cauce principal

$$S = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} = \frac{3243 - 2186}{(20 * 1000)} = 0,053 \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$S = 0,053 * 100 = 5,3 \%$$

Características de la Red de drenaje.

Se presenta a continuación en la figura 3.14 el número de orden de los cursos de agua de cada subcuenca.

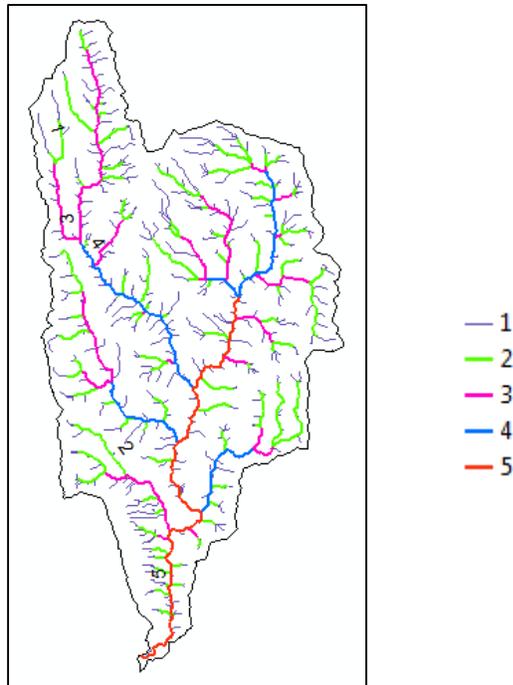


Figura 3.12: Número de Orden de los cursos de agua de la subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

La densidad de drenaje de la subcuenca de la Chaupicancha:

$$A = 67,24 \text{ km}^2$$

$$L_t = 218,71 \text{ km}$$

$$Dd = \frac{L_t}{A} = \frac{218,71}{67,24} = 3,25 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

b) Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración de la subcuenca Chaupicancha:

$$L = 20 \text{ km}$$

$$\text{Cota máxima} = 3243 \text{ m.s.n.m.}$$

$$\text{Cota mínima} = 2186 \text{ m.s.n.m.}$$

$$H = 1057 \text{ m.s.n.m.}$$

$$T_c = 0,0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} = 0,0195 * \left(\frac{(20 * 1000)^3}{1057} \right)^{0,385} = 127 \text{ minutos}$$

c) Número de curva ponderada.

Para determinar el número de curva ponderada de las cuencas se necesita la cobertura del suelo o el uso del suelo, el tipo de suelo y las condiciones hidrológicas. Para ello se extrajeron información de cobertura vegetal y textura de suelos de la base de datos del ZONISIG (Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia), de todo el departamento de Tarija que están en archivos shapefile.

Se procede a extraer solo la información para la subcuenca Chaupicancha y de la presa Rumicancha, para identificar y representar el tipo de cobertura y textura de cada una, con sus respectivas áreas, donde también se hizo la combinación de ambos todo mediante la utilización del software ArcGIS, para luego asignar el número de curva para cada área según sus características mencionada, sacada de tablas (bibliografía) y con apoyo de hoja Excel realizar operaciones para obtener el número de curva ponderado de cada subcuenca.

Subcuenca Chaupicancha.

Suelos de la Subcuenca Chaupicancha.

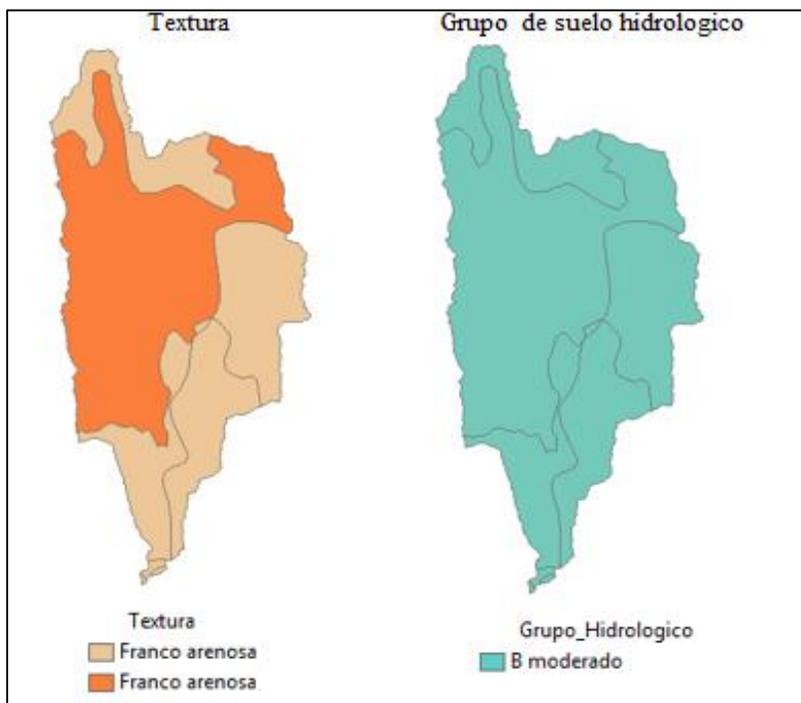


Figura 3.13: Textura y grupo hidrológico de la Subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Textura y grupo hidrológico con sus respectivas áreas de la Subcuenca Chaupicancha.

Textura	Grupo Hidrológico	Área (km²)
Franco arenosa	B moderado	34,52
Franco arenosa	B moderado	7,56
Franco arenosa	B moderado	0,18
Franco arenosa	B moderado	6,86
Franco arenosa	B moderado	10,18
Franco arenosa	B moderado	7,94
		67,24

Fuente: Elaboración propia

Vegetación de la Subcuenca Chaupicancha.

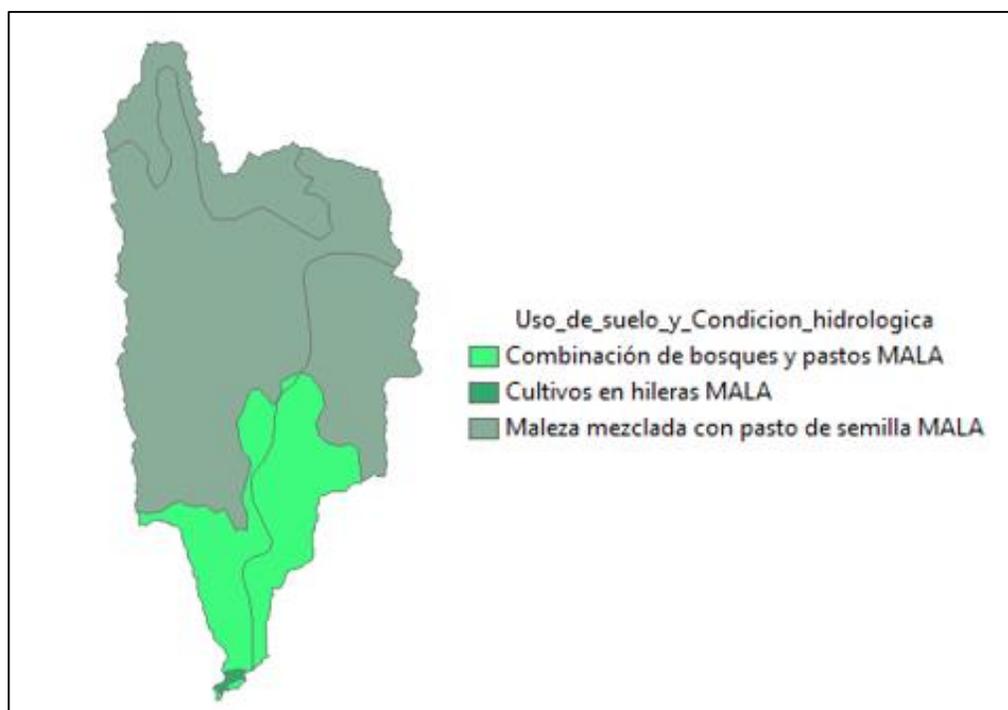


Figura 3.14: Uso de suelo y condición hidrológica de la Subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3: Uso de suelo y condición hidrológica con sus respectivas áreas.

Uso de Suelo y condición hidrológica	Área (km ²)
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	34,52
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	7,56
Cultivos en hileras MALA	0,18
Combinación de bosques y pastos MALA	6,86
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	10,18
Combinación de bosques y pastos MALA	7,94
	67,24

Fuente: Elaboración propia

Número de curva, asignado de tabla, de la combinación y de acuerdo al uso de suelo, condición hidrológica y grupo hidrológico de la subcuenca Chaupicancha.

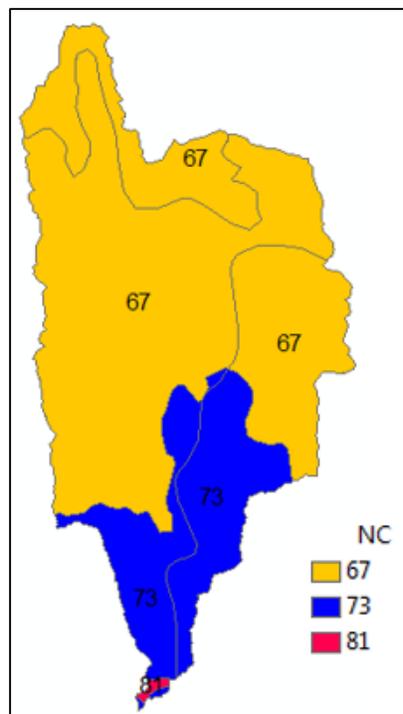


Figura 3.15: Valores de número de curva de la subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Valores de número de curva con sus respectivas áreas de la Subcuenca Chaupicancha.

Uso de Suelo y condición hidrológica	Grupo Hidrológico	NC	Área (km ²)
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	B moderado	67	34,52
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	B moderado	67	7,56
Cultivos en hileras MALA	B moderado	81	0,18
Combinación de bosques y pastos MALA	B moderado	73	6,86
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	B moderado	67	10,18
Combinación de bosques y pastos MALA	B moderado	73	7,94
			67,24

Fuente: Elaboración propia

Calculo de número de curva ponderado para la Subcuenca Chaupicancha.

Tabla 3.5: Valores disueltos de número de curva con sus respectivas áreas

Uso de Suelo y condición hidrológica	Grupo hidrológico del suelo	NC	Área (km ²)
Combinación de bosques y pastos MALA	B moderado	73	14,80
Cultivos en hileras MALA	B moderado	81	0,18
Maleza mezclada con pasto de semilla MALA	B moderado	67	52,26
			67,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Número de curva ponderado de la Subcuenca Chaupicancha.

Área (Ha)	Área* NC (ha)	NC ponderado
1480,14	108 050,13	68
18,11	1466,89	
5225,96	350 139,62	
suma =		
6724	459 656,64	

Fuente: Elaboración propia

d) Análisis de precipitaciones máximas.

d.1. Análisis de datos.

Para realizar el análisis se elige las estaciones más cercanas a la cuenca en estudio.

Tabla 3.7: Estaciones cerca del área de estudio.

Estaciones	Coordenadas		Altura m.s.n.m.	Periodo Observado
	Latitud S	Longitud O		
Sella Quebradas	21° 23' 11'	64°40' 52''	2,145	1985 – 2020
Yesera Norte	21° 22' 20''	64° 33' 03''	2,277	1977 – 2020
León Cancha	21° 10' 42"	64° 42' 55"	2,729	1974 – 2003
Canasmoro	21° 32'	64° 45'	2,080	1974 – 2003

Fuente: Elaboración propia

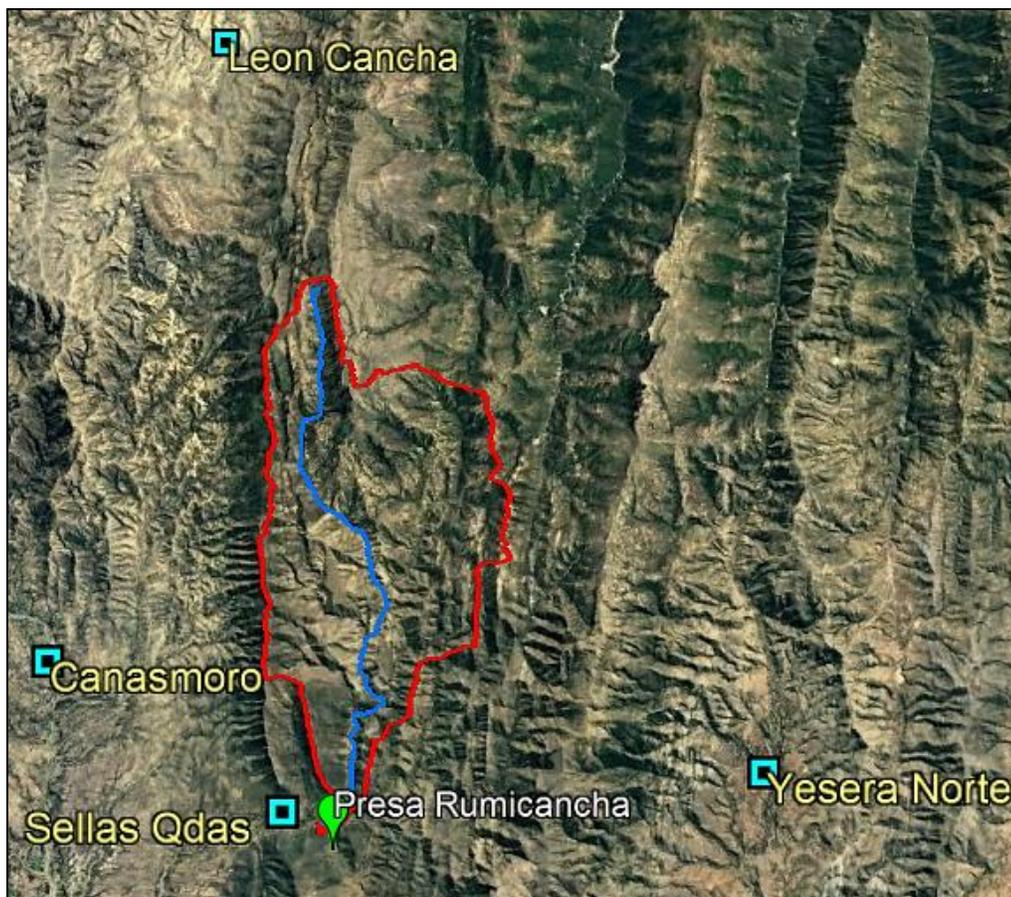


Figura 3.16: Estaciones cerca de la Subcuenca Chaupicancha.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de consistencia

Se usa el método de las curvas doble acumuladas, o de doble acumulación (CDA) o método de doble masa (MDM). Se utiliza las estaciones mencionadas y como estación patrón El Aeropuerto.

El procedimiento del análisis de consistencia a detalle se puede apreciar en el anexo A-1

A continuación, se muestra en la tabla 3.8, resumen de las consistencias de las estaciones utilizadas para el escenario 1.

Tabla 3.8: Resumen de análisis de consistencia.

Estación	Análisis De Consistencia	
	R²	Resultado
Sella Quebradas	0,9969	Consistente
Yesera Norte	0,9997	Consistente
León Cancha	0,9856	Consistente
Canasmoro	-	Inconsistente

Fuente: Elaboración propia

Se define que las estaciones Sella Quebradas, Yesera Norte, y León Cancha, son consistentes. Se descarta la utilización de la estación de Canasmoro por ser inconsistente, específicamente por no cumplir registro mínimo de 25 años que se recomienda para aplicar la curva doble masa.

Análisis de homogeneidad Test de Mann-Kendall.

Luego del análisis de la curva doble masa por lo tanto estas series de datos serán sujetas a un análisis de homogeneidad por el método de Mann Kendall.

El procedimiento del análisis de homogeneidad Test de Mann-Kendall a detalle se puede apreciar en el anexo A-1.

Seguidamente se muestra en la tabla 3.9, resumen de la homogeneidad del test de Mann-Kendall de las estaciones utilizadas para el escenario 1.

Tabla 3.9: Resumen de análisis de homogeneidad.

Estación	Resultado
Sella Quebradas	Serie Homogénea
Yesera Norte	Serie Homogénea
León Cancha	Serie Monótona

Fuente: Elaboración propia

De las estaciones analizadas se puede observar que solamente se puede utilizar la estación de Sella Quebradas, y, Yesera Norte.

Luego de que se realiza el análisis de datos de la información disponible se puede concluir en base, de las condiciones de vegetación y otras características de la subcuenca Chaupicancha, respaldado por un recorrido de campo, que la estación de Sella Quebradas que se encuentra ubicada sobre el río Sella afluente principal, se utilizará los datos pluviométricos, de esta estación para realizar la estimación de altura de precipitaciones máximas, posteriormente los caudales máximos.

d.2. Altura de lluvia máxima diaria para un determinado periodo de retorno (T).

Para estimar la altura de lluvia máxima diaria para determinado periodo de retorno, se utiliza los datos de precipitaciones máximas en 24 horas, de la estación Sella Quebradas. El desarrollo del proceso se aprecia con más detalle en el anexo A-2.

Primeramente, se realiza la prueba de bondad de ajuste para la Distribución de probabilidad. Que para el presente trabajo y el escenario 1, se aplica la prueba de Smirnov-Kolmogórov para la distribución a analizar que es de Gumbel, también llamado Valor Extremo Tipo I, Fisher-Tippett tipo I ó distribución doble exponencial.

El resultado de la prueba de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogórov, se concluye que los datos de precipitaciones máximas en 24 horas, se ajustan a la distribución Gumbel.

Posteriormente, se procede estimar la altura de lluvia máxima diaria para determinado periodo de retorno, con la aplicación de la distribución gumbel. A continuación, como ejemplo, considerando el periodo de retorno de 500 años, se aprecia el desarrollo de la estimación.

➤ Altura de lluvia máxima de para un T= 500 años:

$$T = \frac{1}{1 - P(Q \leq q)} \quad P(Q \leq q) = 1 - \frac{1}{T} \quad F(x) = \frac{T - 1}{T}$$

$$P(Q \leq q) = F(x) = 1 - \frac{1}{T} = 1 - \frac{1}{500} = \mathbf{0,998}$$

$$F(x) = e^{-e^{-z}}$$

$$\mathbf{Z = \ln\{\ln(F(x))\} * (-1)\} * (-1) = \ln\{\ln(0,998)\} * (-1)\} * (-1) = \mathbf{6,2136}$$

$$z = \alpha(x - \beta) \quad x = \frac{z}{\alpha} + \beta$$

El parámetro de escala (α), el parámetro de posición (μ) se calcularon mediante las fórmulas:

$$\beta = \bar{X} - 0,45 * S$$

$$\alpha = 1,2825 / S$$

n = Numero de datos	\bar{X} = Media (mm)	S = Desviación (mm)
35	60,35	18,86

$$\beta = 60,35 - 0,45 * 18,86 = \mathbf{51,86} \text{ mm}$$

$$\alpha = 1,2825 / 18,86 = \mathbf{0,07} \text{ mm}$$

$$X = (6,2136 / 0,07) + 51,86 = \mathbf{140,63} \text{ mm}$$

Sucesivamente se realiza el mismo proceso para cada determinado periodo de retorno, seguidamente se muestra en resumen las alturas de lluvia máxima para cada periodo de retorno.

Tabla 3.10: Altura de lluvia máxima diaria para un determinado periodo de retorno.

Periodo de retorno (T) [años]	Alturas de lluvia [mm]
500	140,63
1000	150,54
5000	173,53
10 000	183,44

Fuente: Elaboración propia

d.3. Altura de lluvia máxima inferior a las 24 horas y Precipitaciones máximas para el tiempo de concentración (Tc).

Luego de obtener valores de las precipitaciones máximas diarias se procedió a realizar la desagregación de la precipitación para el tiempo de duración de la tormenta (en este caso para el tiempo de concentración), para éste efecto se utilizaron los factores de desagregación disponible: factores de desagregación utilizados Estación AASANA Tarija.

Los índices de desagregación o coeficientes de desagregación permiten determinar valores de precipitación para distintas duraciones de tormentas menores a 24 horas, a partir de registros de duración diaria de 24 horas.

Cabe mencionar que el desarrollo a detalle y coeficientes que se utiliza se encuentran en anexos A-3.

Tabla 3.11: Altura de lluvia máxima inferior a las 24 horas.

Duración (h)	Duración (min)	Periodo de retorno (T) años / Precipitación en mm			
		500	1000	5000	10 000
0	0	0	0	0	0
0,08	5	38,74	41.47	47.80	50.53
0,17	10	46.40	49.67	57.25	60.52
0,25	15	51.56	55.20	63.63	67.26
0,33	20	55.57	59.49	68.57	72.49
0,42	25	58.90	63.05	72.68	76.83
0,50	30	61.76	66.11	76.21	80.56
1,00	60	73.97	79.18	91.28	96.49
1,50	90	82.21	88.00	101.44	107.23
2,00	120	88.60	94.84	109.32	115.57
3,00	180	98.46	105.40	121.49	128.43
5,00	300	112.46	120.39	138.77	146.70
6,00	360	121.16	129.69	149.50	158.04
8,00	480	129.68	138.81	160.01	169.15
10,00	600	135.59	145.15	167.32	176.87
12,00	720	140.63	150.54	173.53	183.44
24,00	1440	161.54	172.93	199.33	210.72

Fuente: Elaboración propia

Con la desagregación de lluvias máximas horarias a partir de las precipitaciones máximas diarias para diferentes periodos de retorno (T) se puede graficar las curvas Precipitación Duración y Frecuencia (PDF) las cuales ajustan a una ecuación que presente mayor correlación.

De las curvas PDF graficadas (ver anexos A-3), se ajustan ecuaciones para diferentes periodos de retorno que presente mayor correlación. Son las siguientes:

Para T = 500 años $P = 74,027 * (\text{Duración})^{0,2591}$

Para T = 1000 años $P = 79,244 * (\text{Duración})^{0,2591}$

Para T = 5000 años $P = 91,346 * (\text{Duración})^{0,2591}$

Para T = 10 000 años $P = 96,562 * (\text{Duración})^{0,2591}$

La duración de la lluvia se hace generalmente igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que cuando la lluvia alcanza esta duración, toda el área de la cuenca, está aportando al proceso de la escorrentía.

Se aplican las ecuaciones ajustadas de las curvas PDF, así se estima la precipitación máxima para un intervalo de tiempo de la duración de la lluvia.

Tabla 3.12: Precipitación máxima para el tiempo de concentración (Tc).

Valores de precipitación (mm) según Tiempo de concentración y periodo de retorno					
Duración	Duración	Periodo de retorno (T) / Precipitación (mm)			
(h)	(min)	500	1000	5000	10 000
2,12	127	89,90	96,24	110,93	117,27

Fuente: Elaboración propia

e) Estimación de caudales máximos.

La estimación de caudales máximos para el escenario 1:

Crecidas a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.

Se usan los siguientes métodos: se muestra en la siguiente tabla 3.13:

Tabla 3.13: Método de estimación de caudales máximos para el escenario 1.

Escenario 1: Crecidas a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha		
Tipo de modelo	Método	Descripción
Pérdidas o Abstracciones	Número de curva del S.C.S.	Estimación de la precipitación en exceso o efectiva (Pe)
Transformación Precipitación-Escurrimiento	Hidrograma triangular	A partir de la Pe estimación del caudal máximo (Qmax)

Fuente: elaboración propia

e.1. Estimación de la precipitación en exceso o efectiva (Pe).

Se estima la precipitación en exceso o efectiva, o el escurrimiento medio, utilizando el método número de curva del SCS–CN, mediante cantidad de precipitación y retención máxima potencial (S), utilizando valores de curvas numéricas. Las fórmulas y el desarrollo del método para obtener (Pe) y S se indican en anexo A-4.

A continuación, se muestra en resumen el escurrimiento medio por evento (mm).

Tabla 3.14: Precipitaciones en exceso para el escenario 1.

Periodo de retorno [años]	Altura de lluvia [mm]	Retención potencial máxima S [mm]	La precipitación exceso o efectiva Pe=Q [mm]
500	89,90	52	48,08
1000	96,24	52	53,47
5000	110,93	52	66,28
10 000	117,27	52	71,91

Fuente: Elaboración propia

e.2) Estimación caudales máximos.

Para la estimación del Caudal Máximo para cada periodo de retorno se utiliza el método de hidrograma triangular, y como ejemplo, para T=500 años, se realiza el siguiente procedimiento:

- Primero se tiene como dato, los parámetros de la cuenca: el área (A), el desnivel (H) no es más que la diferencia de la cota máxima y la cota mínima, la pendiente (S), la longitud del cauce (L), el tiempo de concentración (Tc), desarrolladas anteriormente.

$$A = 67,24 \text{ km}^2.$$

$$T_c = 2,12 \text{ h}$$

- Seguidamente se calcula la duración en exceso (de) mediante la fórmula:
Como se trata de una cuenca pequeña.

$$de = tc$$

$$de = 2,12 \text{ h}$$

- Luego se calcula el tiempo de retraso (tr) mediante la fórmula:

$$tr = 0,6 * T_c$$

$$tr = 0,6 * 2,12$$

$$tr = 1,27 \text{ h}$$

- Se calcula el tiempo de pico (tp) mediante la fórmula:

$$tp = de/2 + tr$$

$$tp = 2,12/2 + 1,27$$

$$tp = 2,33 \text{ h}$$

- Se calcula el tiempo base (tb) mediante la fórmula:

$$tb = 2,67 * T_p$$

$$tb = 2,67 * 2,33$$

$$tb = 6,22 \text{ h}$$

- Finalmente se estima el caudal máximo para periodo de retorno de 500 años, mediante la siguiente fórmula:

$$Qp = \frac{0,208 * A * P_e}{t_p}$$

$$Qp = \frac{0,208 * 67,24 * 48,08}{2,33}$$

$$Qp = 288,81 \text{ m}^3/\text{s}$$

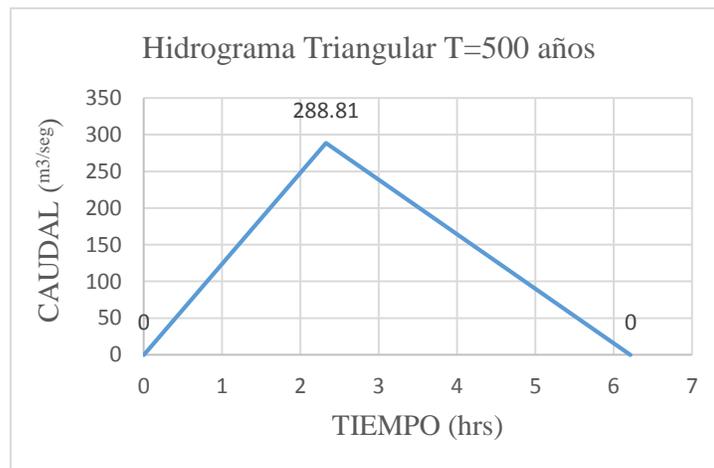


Figura 3.17: Hidrograma triangular para T=500 años.

Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar que el proceso a detalle de la estimación de los caudales máximos para los demás periodos de retorno, de 1000, 5000 y 10 000 años, del escenario 1, se aprecia en el anexo A-4.

Resumen de resultados de caudales máximos:

Tabla 3.15: Caudales máximos para el escenario 1.

Periodo de retorno T (años)	La precipitación exceso o efectiva Pe=Q [mm]	Caudales máximos (m³/s)
500	48,08	288,81
1000	53,47	321,20
5000	66,28	398,13
10 000	71,91	431,94

Fuente: Elaboración propia

f) Tirantes y velocidades.

Para determinar el tirante y la velocidad de agua, se hizo una modelación hidráulica, para eso se utilizó el programa de sistema de análisis de ríos HEC-RAS 5.0.6 desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica.

El proceso para la modelación fue de la siguiente manera como se explica en la siguiente tabla 3.16:

Tabla 3.16: Proceso de la modelación hidráulica.

Modelación hidráulica para inundaciones por máximas crecidas.		
Obtención de datos de entrada.	<ul style="list-style-type: none"> • Topografía del río aguas abajo. • curvas de nivel de la zona. • modelos de elevación de la zona. 	Creación del raster o TIN de la zona de interés.
Adecuación y procesamiento de datos.	Modelado geométrico de la zona aguas abajo.	<ul style="list-style-type: none"> • Corrección del TIN. • Dirección del flujo, Área de influencia, planicie, eje de río, secciones, etc.
Desarrollo del modelo.	Modelado hidráulico de la zona aguas abajo.	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de frontera (Asignación de caudales) • Rugosidad. • Condiciones de contorno.
Ejecución del modelo.	Simulación y visualización del modelado.	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de tirantes y velocidades de agua. • Generación de mapas de Inundación.
Exportar los resultados a un SIG.	En este caso se trabajó con el programa ArcGis.	<ul style="list-style-type: none"> • En función del tirante y velocidades estimar niveles de peligro. • Mejor visualización de los tirantes y velocidades.

Fuente: Elaboración propia

Levantamiento topográfico

Se realizó el levantamiento topográfico del área de estudio con la ayuda de una estación total del cual se obtuvieron nubes de puntos de las secciones del río Sella y otros dentro del área de interés, estos datos nos servirán para modelar la geometría en el programa HEC-RAS.

A partir de esta información de los puntos topográficos y ayuda del programa ArcGIS se creó una superficie en formato TIN para luego convertirlo en archivo raster donde este último sirve para exportarlo y trabajar en el Hec-Ras.

Procesamiento de datos

Se comienza por digitalizar la posición y la trayectoria del cauce utilizando como información de fondo mapas topográficos o imagen digital y superficie del levantamiento topográfico que se creó y se convirtió en archivo raster, Luego se dibujan líneas perpendiculares a la dirección del flujo indicando la posición de las secciones transversales, todo este primer proceso se le llama modelamiento geométrico del terreno.

Posteriormente se agregan y se eligen los parámetros de los cauces y de las planicies de inundación donde fue obtenido generalmente de forma empírica con base en los datos bibliográficos y con inspección visual de los tramos, este último con apoyo de imágenes tomadas de google earth y visita en campo. se indica la obtención del coeficiente de rugosidad en anexo C.

Luego de definir la geometría del modelo se introducen los datos de flujo necesarios para ejecutar las corridas con el modelo. Se especifican los caudales para los diferentes periodos de retorno que se estimó anteriormente y condiciones de borde. Por último, se fijan los parámetros de control y las opciones para las corridas o simulaciones. Después de eso los resultados de la simulación se lo exporta al ArcGIS en formato raster para una mejor visualización de los tirantes y velocidades, el cual nos servirá para estimar los niveles y crear mapas de peligro. Es un proceso iterativo que consume tiempo y requiere de gran cuidado.

Para el escenario 1:

Crecidas a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.

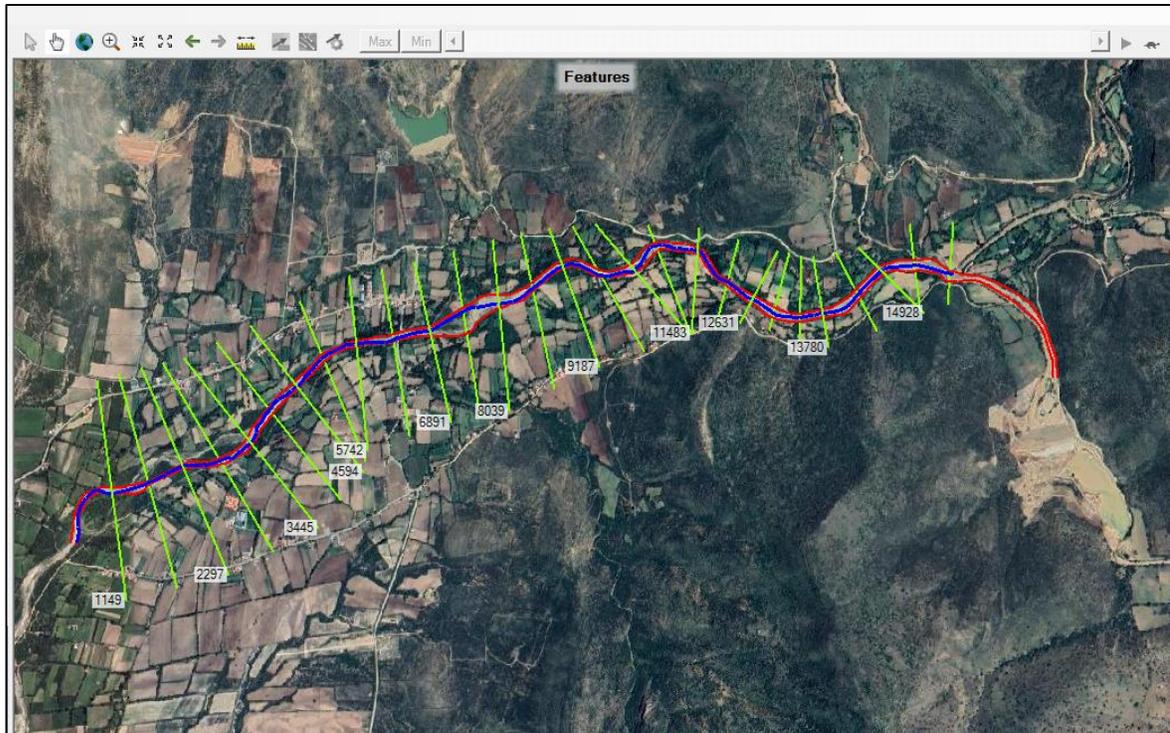


Figura 3.18: Proceso de modelamiento geométrico para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

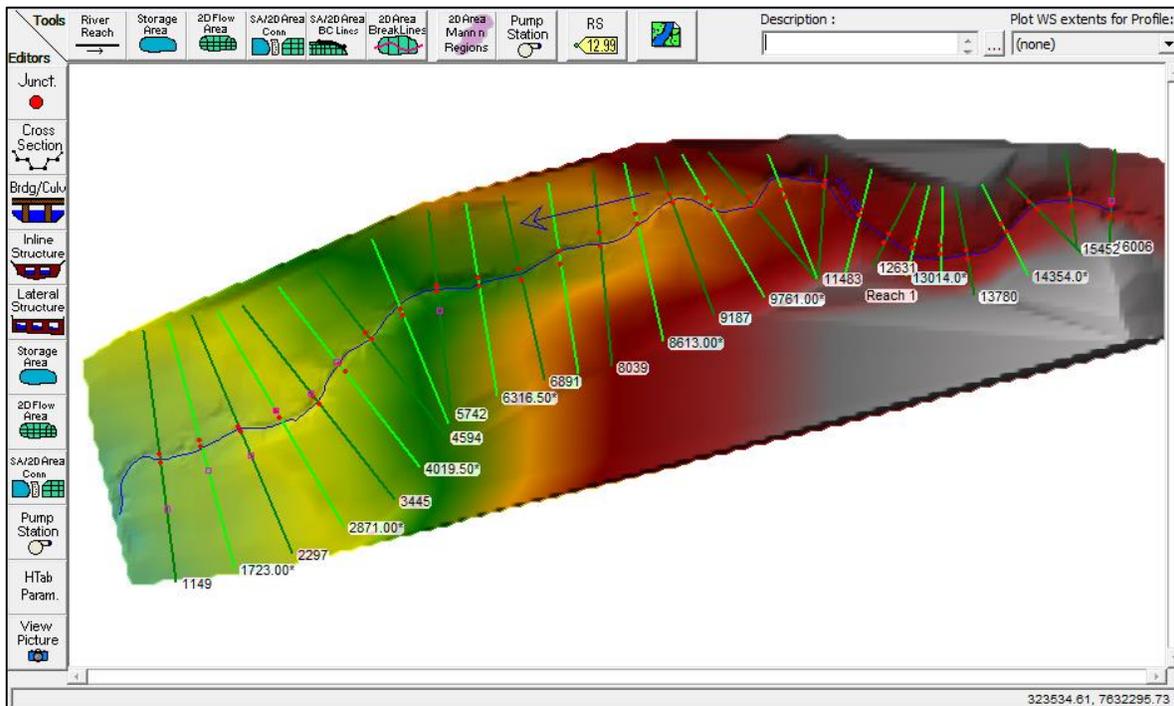


Figura 3.19: Modelo geométrico del terreno para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

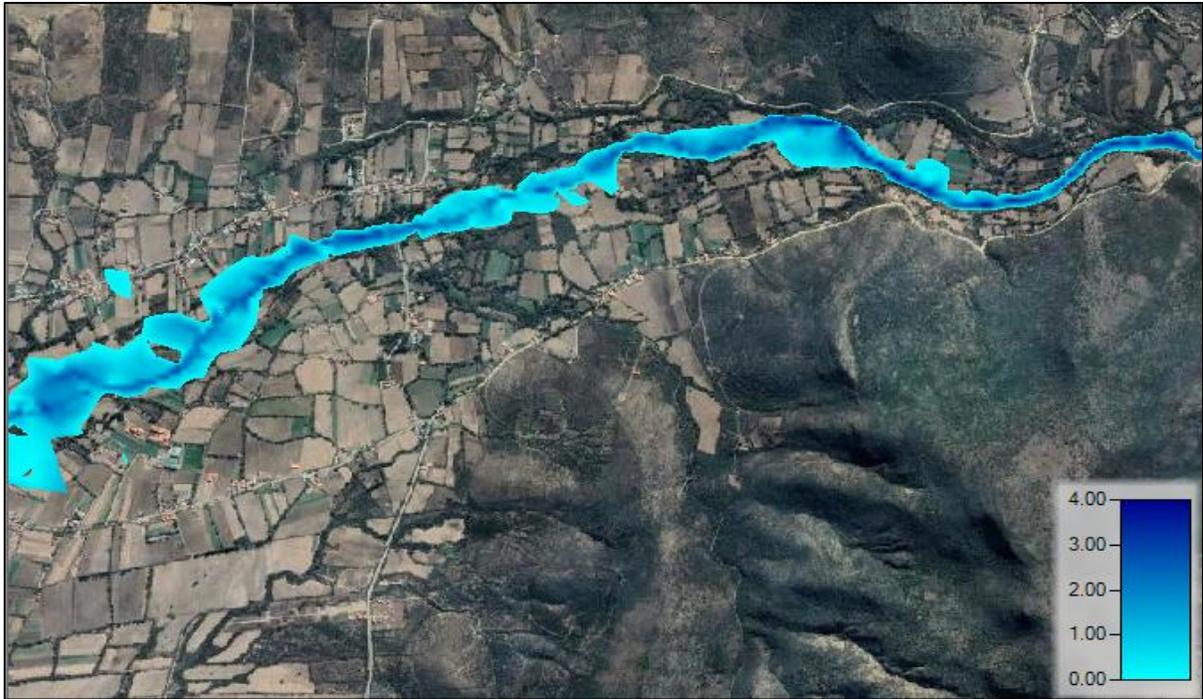


Figura 3.20: Tirantes para T= 500 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

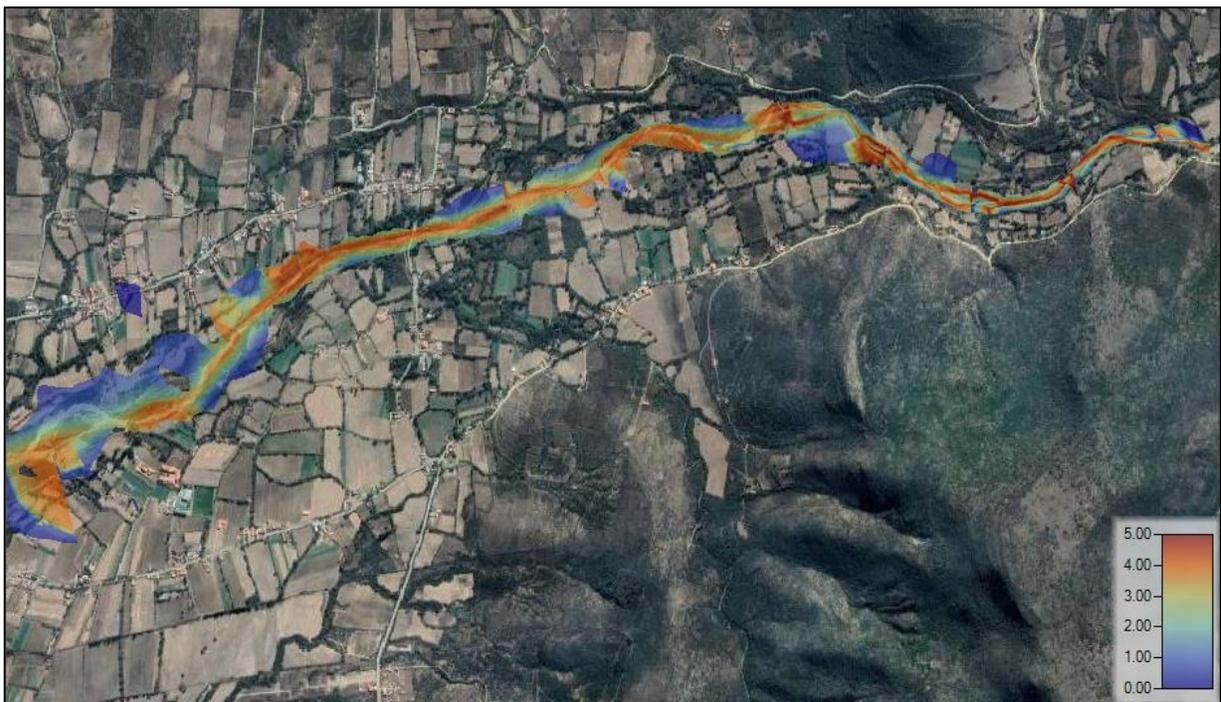


Figura 3.21: Velocidades para T= 500 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

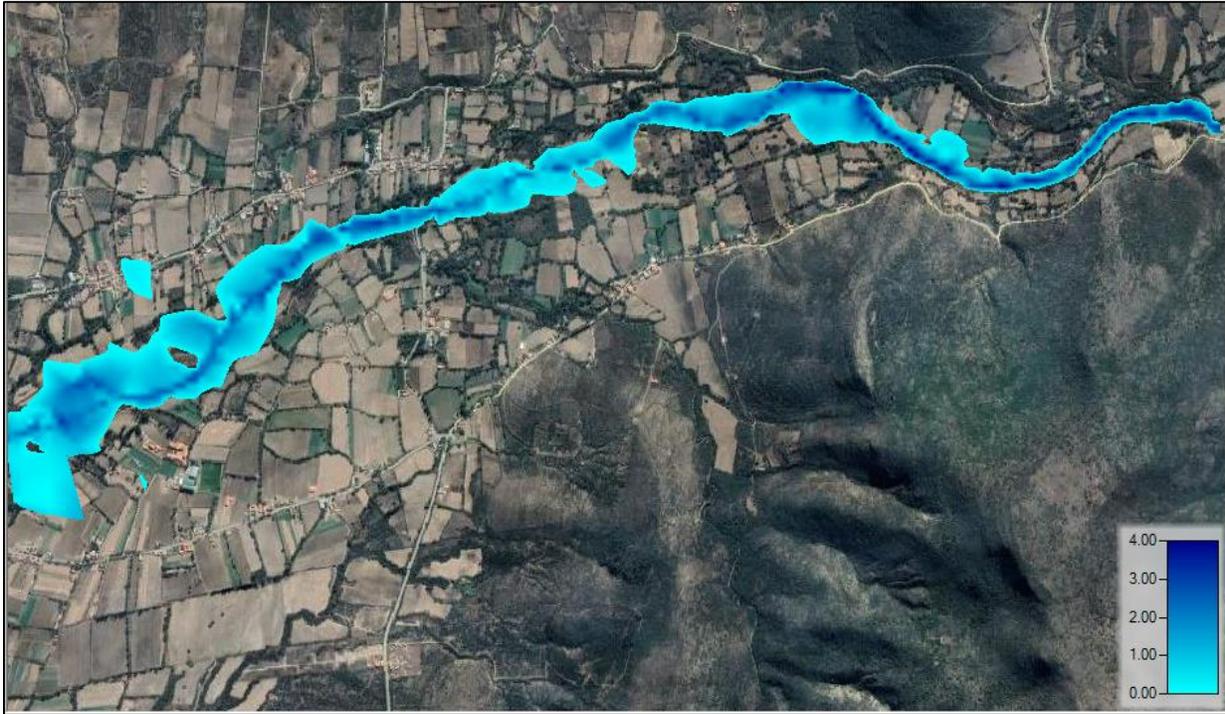


Figura 3.22: Tirantes para $T= 1000$ años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.23: Velocidades para $T= 1000$ años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.24: Tirantes para T= 5000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

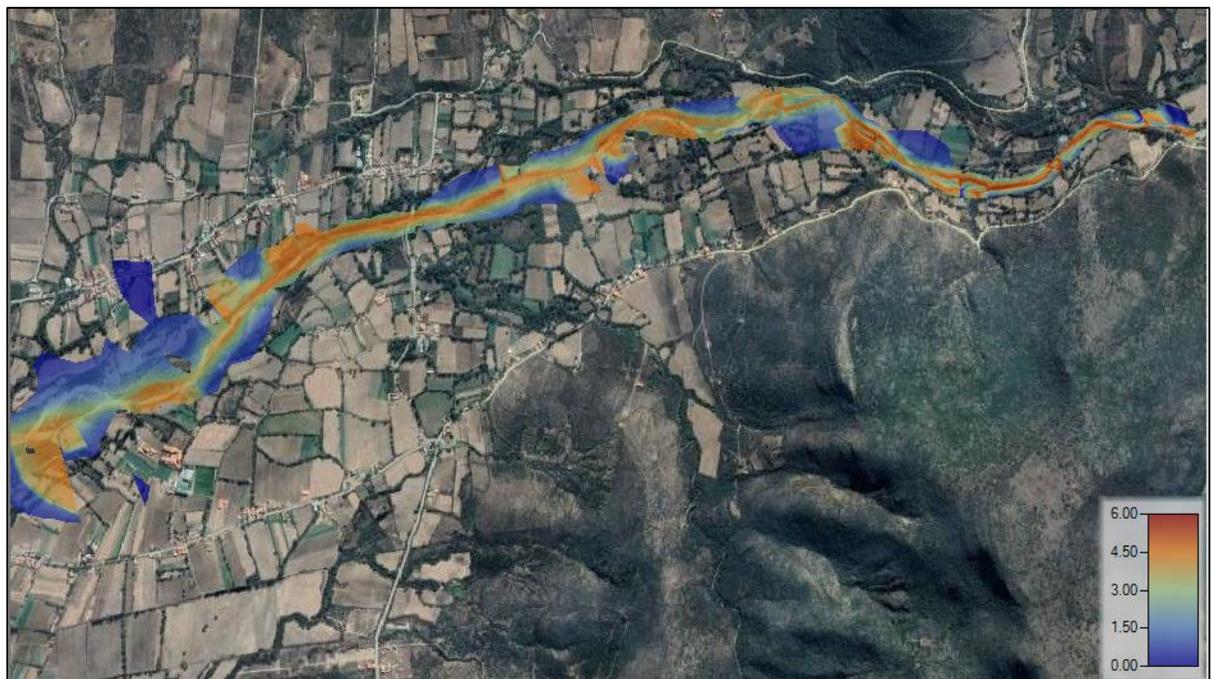


Figura 3.25: Velocidades para T= 5000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

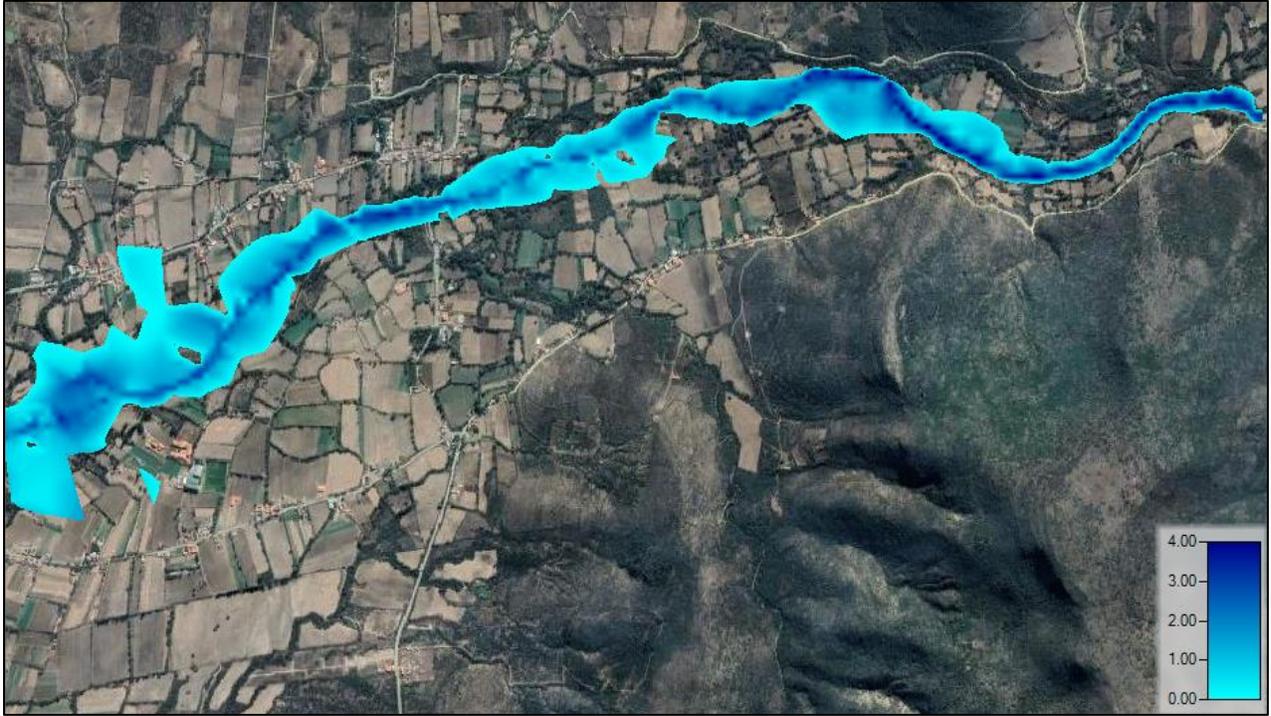


Figura 3.26: Tirantes para T= 10000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.27: Velocidades para T= 10000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.1.2. ESCENARIO 2.

Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha.

a) Estimación de caudal máximo.

Para estimar el caudal máximo de un posible colapso de la presa, se toma las fórmulas empíricas de uso más extendido (en unidades técnica internacional), y recomendaciones ministerio de medio ambiente de España.

Tabla 3.17: Método de estimación de caudales máximos para el escenario 2.

Nº	Autor nombre (fecha), variable independiente	Ecuación
1	Froehlich (1995), f(Vw, hw)	$Qp= 0,607(V_w^{0,295}h_w^{1,24})$
2	McDonald y Langridge- Monopolis(1984,), f(Vw,hw)	$Qp= 3,85(V_w h_w)^{0,411}$
3	McDonald y Langridge- Monopolis(1984,), f(Vw,hw)	$Qp= 1,154(V_w h_w)^{0,412}$
4	Kirkpatrick (1977), f(hw)	$Qp= 1,268(h_w+0,3)^{2,5}$
5	SCS (1981), f(hw)	$Qp= 16,6(h_w)^{1,85}$
6	Reclamation (1982),f (hw)	$Qp= 19,1(h_w)^{1,85}$
7	Costa (1985), f (S,hd)	$Qp= 0,981(S h_d)^{0,42}$
8	Hagen (1982), f (S hd)	$Qp= 0,54(S h_d)^{0,5}$
9	Costa (1985), envolvente f(S,hd)	$Qp= 2,634(S h_d)^{0,44}$
10	Evans(1986), f(Vw)	$Qp= 0,72(V_w)^{0,53}$
11	Singh and Snorrason (1984), f(S)	$Qp= 1,776(S)^{0,47}$
12	Costa (1985),envolvente, f(S)	$Qp= 1,122(S)^{0,57}$
13	Singh y Snorrason (1984), f(hd)	$Qp= 13, 4(h_d)^{1,89}$

Fuente: Lábaque, 2010

Donde:

Qp: descarga pico por la brecha calculada (m³/s).

Vw: es el volumen del embalse en el momento de la falla (m³).

hw: altura del agua en el embalse al momento de la rotura medida desde el nivel del piso (m).

hd: altura de la presa (m).

S: capacidad de almacenamiento del embalse (m³).

Para estimar el tiempo pico o tiempo de la formación de la brecha de falla, se asume el criterio que recomienda el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), que utiliza la siguiente formula empírica:

$$T(\text{horas}) = \frac{4,8 * V^{0,5}}{h}$$

Donde:

T: Tiempo pico (h).

V: Volumen del embalse en el momento de la falla (hm³).

hw: altura del agua en el embalse al momento de la rotura medida desde el nivel del piso (m).

Además, se requiere conocer los siguientes parámetros de la presa Rumicancha:

Tabla 3.18: Parámetros de la presa Rumicancha para el escenario 2.

Parámetros	Valor	unidad	cota	Descripción
Altura de la presa	41	m	2195	Altura total de la presa
Volumen útil	11 418 227,50	m ³	2192,5	Nivel de agua máximas ordinarias (N.A.M.O)
Altura del vol. útil	38,5	m	2192,5	Altura de N.A.M.O

Fuente: Elaboración propia

$$T = \frac{4,8 * V^{0,5}}{h} = \frac{4,8 * \left(\frac{11\ 418\ 227,50}{1\ 000\ 000}\right)^{0,5}}{38,5} = 0,42 \text{ (h)}$$

Con la aplicación de la ecuación número 1 de la tabla 3.17:

Froehlich (1995) $Q_p = 0,607 * (V_w^{0,295} h_w^{1,24})$

Donde:

Qp: descarga pico por la brecha calculada (m³/s).

Vw: es el volumen del embalse en el momento de la falla (m³).

hw: altura del agua en el embalse (m).

Tabla 3.19: Caudal máximo para el escenario 2.

Datos		Caudal pico (Qp) (m ³ /s)
Vw, S (m ³)	h(w), h(d) (m)	
11 418 227,50	38,5	6778,78

Fuente: Elaboración propia

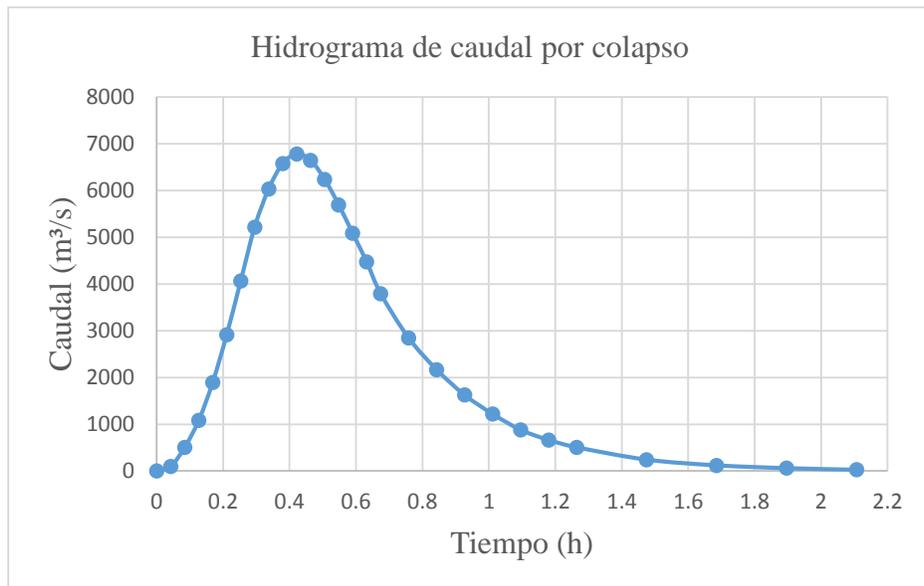


Figura 3.28: Hidrograma de caudal pico por colapso.

Fuente: Elaboración propia

b) Tirantes y velocidades.

Para el escenario 2 se repite el mismo proceso de la tabla 3.16.

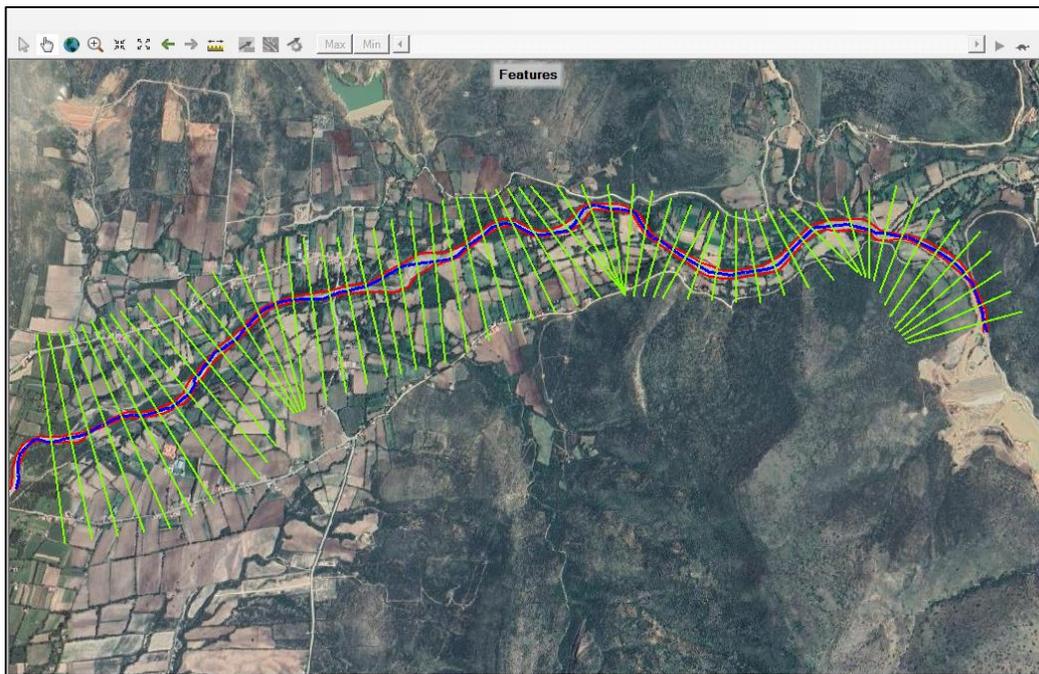


Figura 3.29: Proceso de modelamiento geométrico para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

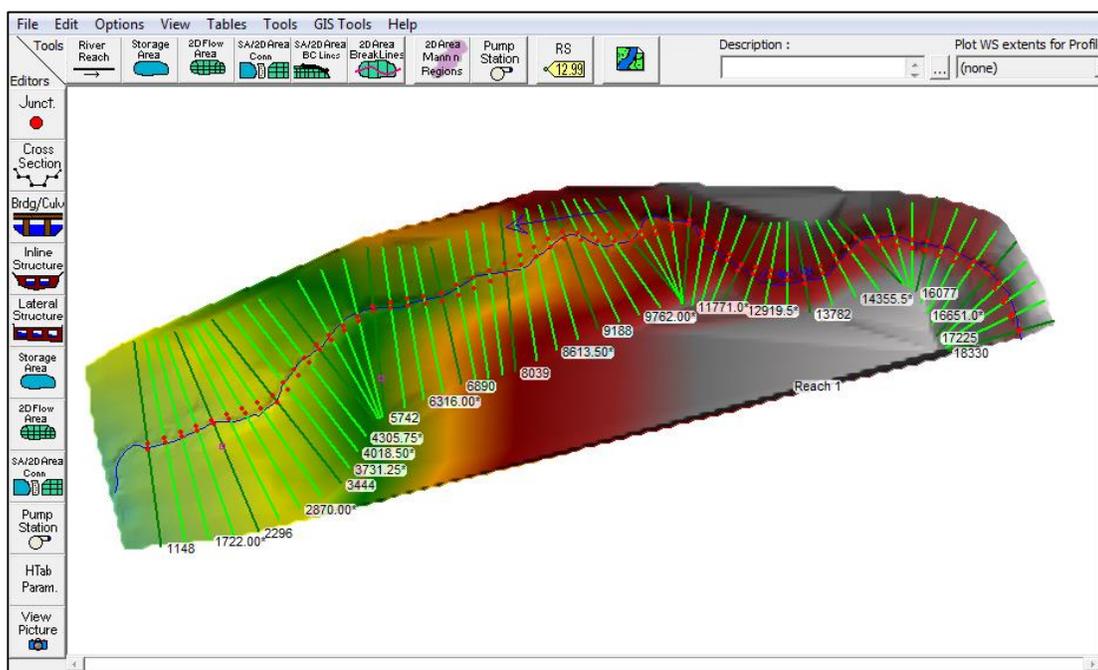


Figura 3.30: Modelo geométrico del terreno para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

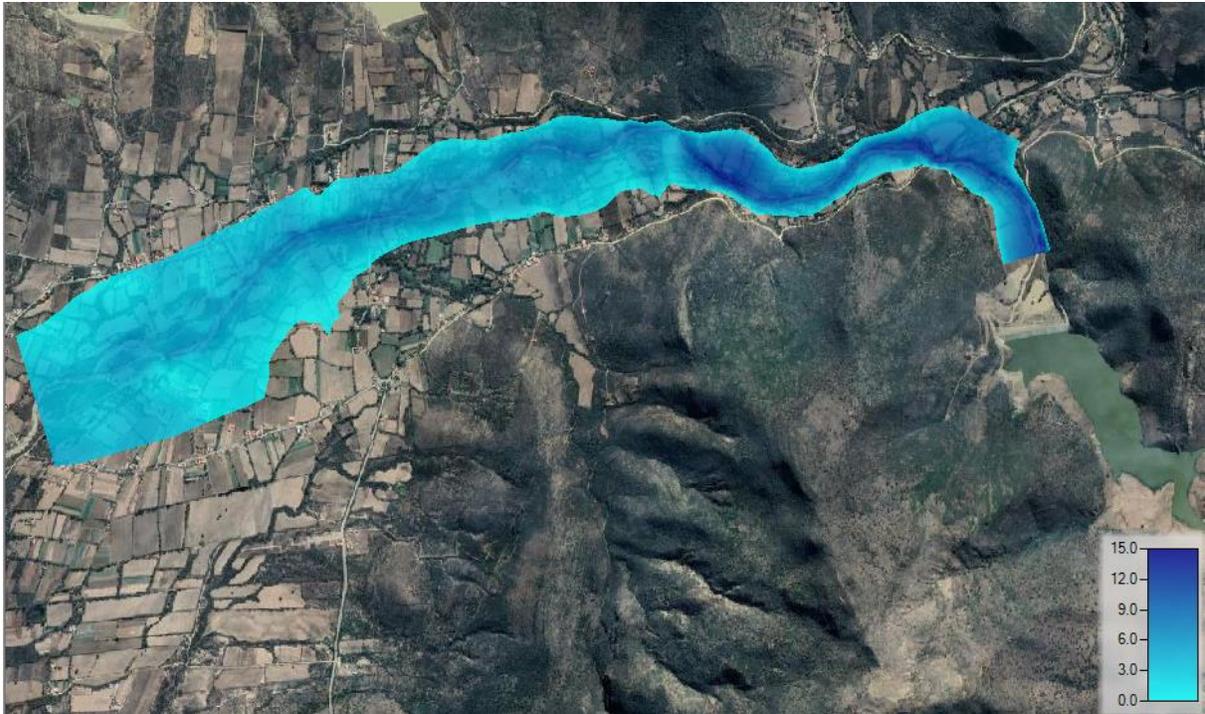


Figura 3.31: Tirantes para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

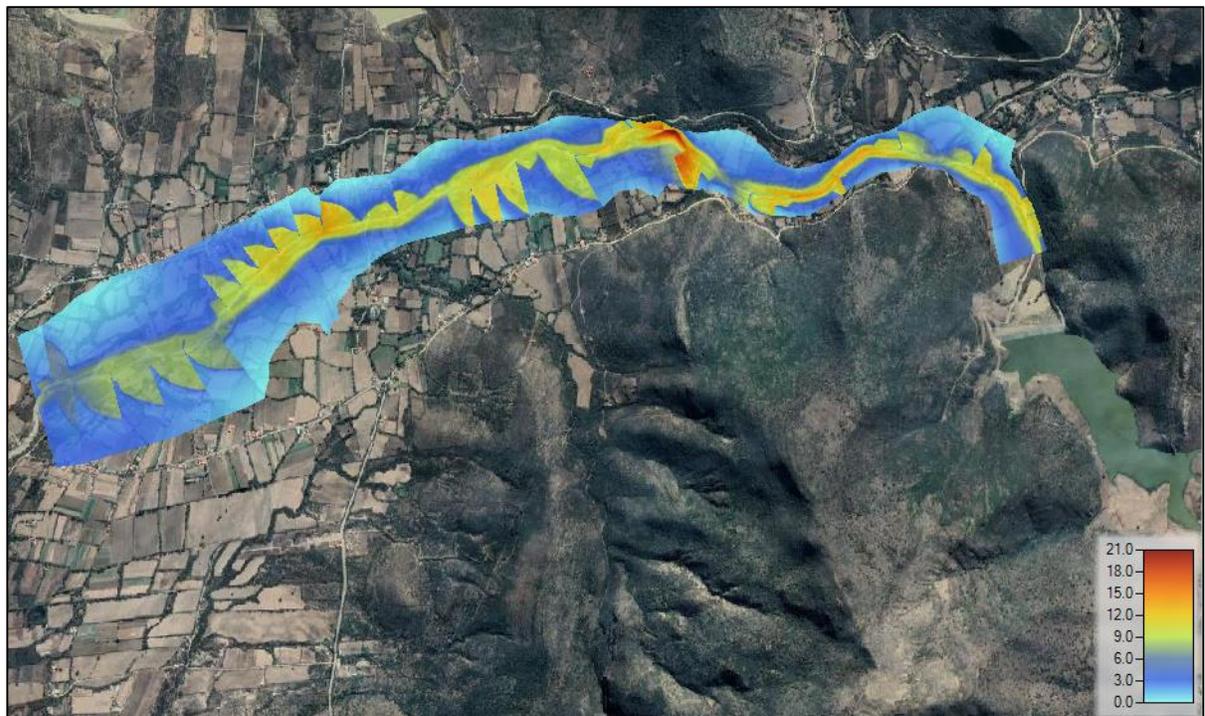


Figura 3.32: Velocidades para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.1.3. ESCENARIO 3.

Crecida a partir por el sobrevvertimiento y consecuente rotura de la presa Rumicancha.

a) Estimación de caudal máximo.

Para estimar el caudal máximo de un posible sobrevvertido y su consecuente rotura de la presa Rumicancha, se toma las fórmulas empíricas de uso más extendido (en unidades técnica internacional), que asume y recomienda el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD).

Las fórmulas empíricas se aprecian en la tabla 3.17, se realiza la estimación del caudal máximo, con la fórmula de Froehlich (1995).

Sin embargo, para aplicar las formula, se necesita los siguientes parámetros de la presa Rumicancha:

Tabla 3.20: Parámetros de la presa Rumicancha para el escenario 3.

Parámetros	Valor	unidad	cota	Descripción
Altura de la presa	41	m	2195	Altura total de la presa
Volumen total de la presa	13 317 615,17	m ³	2195	Volumen total que la presa desde la cota mínima hasta la cota máxima del coronamiento.
Volumen útil	11 418 227,50	m ³	2192,5	Nivel de agua máximas ordinarias (N.A.M.O)
Altura del vol. útil	38,5	m	2192,5	Altura de N.A.M.O

Fuente: Elaboración propia

Para estimar el tiempo pico o tiempo de la formación de la brecha de falla, se asume el criterio que recomienda el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), se estima con la siguiente formula empírica:

$$T = \frac{4,8 * V^{0,5}}{h} = \frac{4,8 * \left(\frac{13\ 317\ 615,17}{1\ 000\ 000}\right)^{0,5}}{38,5} = 0,43 \text{ (h)}$$

Se tiene el valor del tiempo pico que es donde el caudal máximo se presente, seguidamente se aplica la ecuación número 1 de la tabla 3.17 para estimar el caudal máximo por rotura de la presa:

Froehlich (1995):
$$Q_p = 0,607 * (V_w^{0,295} h_w^{1,24})$$

Donde:

Q_p: descarga pico por la brecha calculada (m³/s).

V_w: es el volumen del embalse en el momento de la falla (m³).

h_w: altura del agua en el embalse (m).

Tabla 3.21: Caudal máximo para el escenario 2.

Datos		Caudal pico (Q _p) (m ³ /s)
V _w , S (m ³)	h(w), h(d) (m)	
11 418 227,50	41	7669,14

Fuente: Elaboración propia

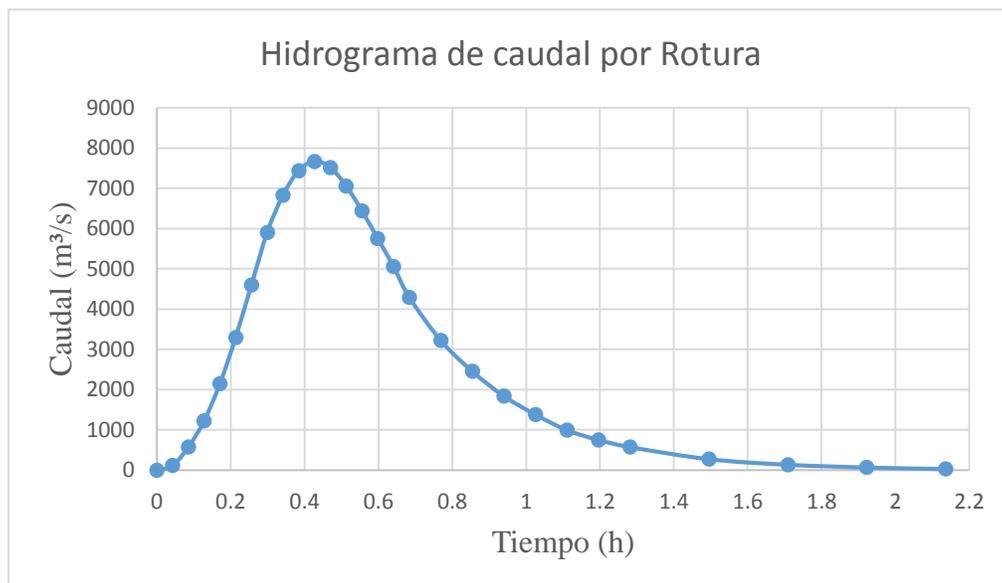


Figura 3.33: Hidrograma de caudal máximo para el escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

b) Tirantes y velocidades.

Para el escenario 3, se repite el mismo proceso de la tabla 3.16.

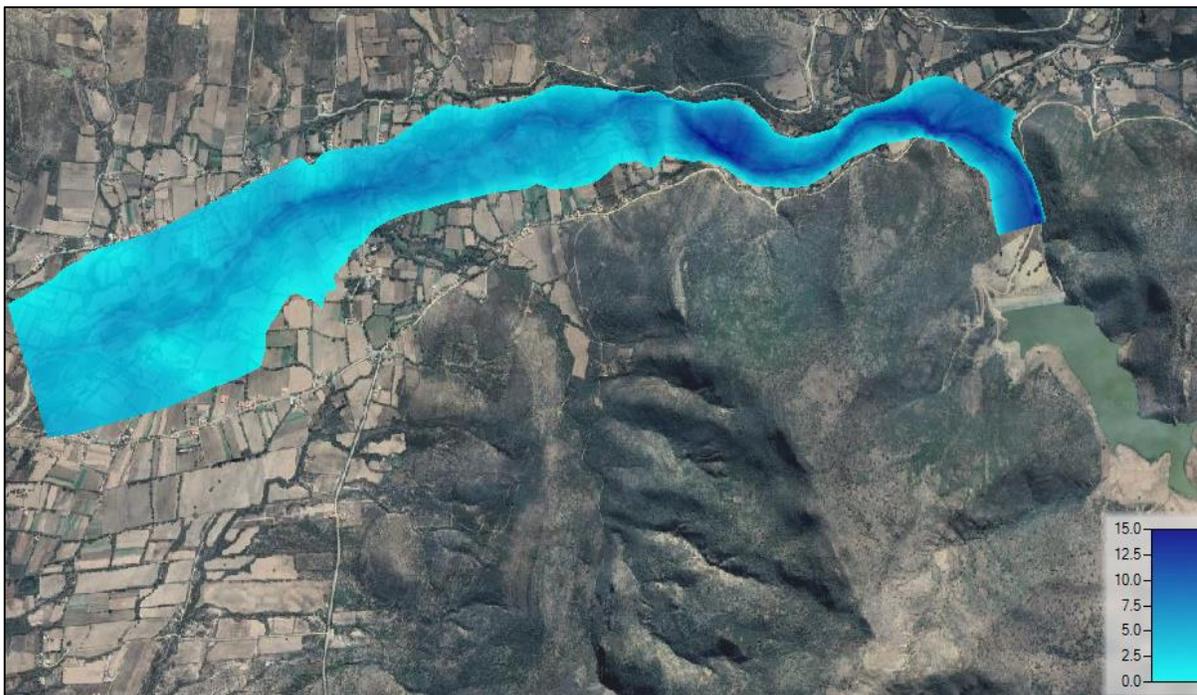


Figura 3.34: Tirantes para el escenario 3.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.35: Velocidades para el escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2. Nivel de peligro.

Para determinar el nivel de peligro se usa el criterio del gobierno de Francia descrito anteriormente. Para esto se le asignara un valor a cada nivel de peligro como se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3.22: Cuadro de valores para los niveles de peligro.

Nivel de Peligro	Puntaje
Nivel alto	3
Nivel medio	2
Nivel bajo	1

Fuente: Elaboración propia

Según el criterio del gobierno de Francia se analiza que tiene tres niveles de peligro alto, medio, bajo, en el que relacionan el tirante y (m) con la velocidad máxima del agua v (m/s) ver la figura 3.36.

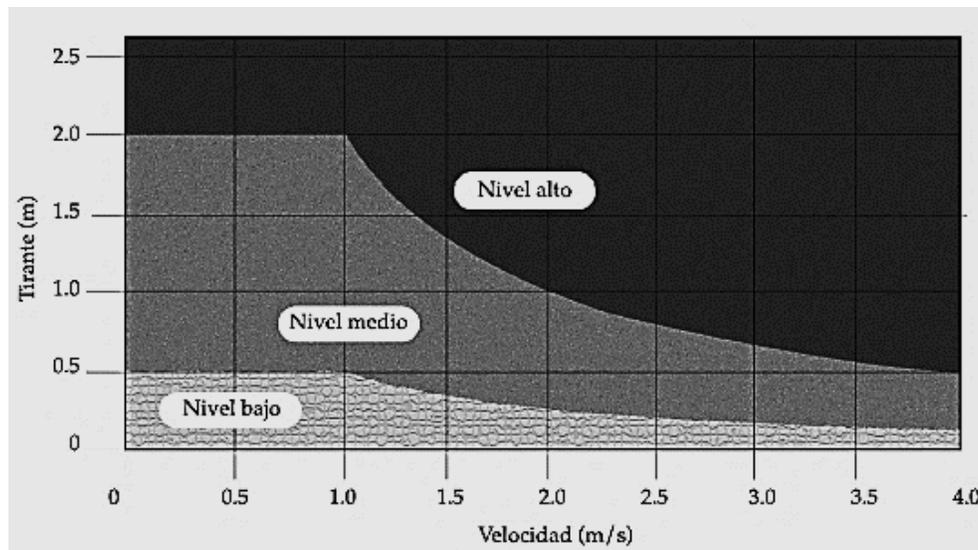


Figura 3.36: Nivel de peligro para inundaciones según gobierno de Francia.

Fuente: Alcocer-Yamanaka, et al., 2016

De la figura 3.36, del criterio se puede determinar la siguiente condición:

Si:

$$V \leq 1 \ ; \ y \leq 0,5 \quad \Rightarrow \text{valor} = 1$$

$$V \leq 1 \ ; \ 0,5 < y \leq 2 \quad \Rightarrow \text{valor} = 2$$

$$V \leq 1 \ ; \ y > 2 \quad \Rightarrow \text{valor} = 3$$

Si:

$$V > 1 \ ; \ V * y \leq 0,5 \quad \Rightarrow \text{valor} = 1$$

$$V \leq 1 \ ; \ 0,5 < V * y \leq 2 \quad \Rightarrow \text{valor} = 2$$

$$V \leq 1 \ ; \ V * y > 2 \quad \Rightarrow \text{valor} = 3$$

Donde:

V: Velocidad (m/s) y : Tirante(m)

Con esta condición determinada a partir del criterio mencionado, y teniendo los valores de velocidad y tirante en archivos raster que determinamos en el anterior proceso, y exportamos al Arcgis, se lo aplica y se le asigna el valor numérico (puntaje) de la tabla 3.27, para así estimar los niveles de peligro.

En el programa ArcGIS, con los raster de velocidad y tirante cargados (ver en la parte izquierda de la figura 3.39), para comenzar a realizar el procesamiento se debe tener en cuenta que el proyecto debe guardarse y georreferenciarse en nuestro caso WGS 1984 UTM Zona 20S.

Para Iniciar el proceso se ingresa a la herramienta Raster Calculator de la pestaña ArcToolbox (Ver figura 3.39). Se abre la ventana de la herramienta, se realiza el cálculo necesario entre las capas, para el caso se usará la formula condicional:

Con("Velocidad"=((1,Con("Tirante"((=0.5,1,Con("Tirante))2,3,2)),Con("Velocidad""Tirante"((= 0.5,1,Con("Velocidad"*"Tirante)) 2,3,2))* Ver figura 3.38.

Finalmente se obtiene la capa raster de los niveles de peligro según el criterio y condición aplicado, para cada escenario. De esta manera se realiza para todos los escenarios definidos.

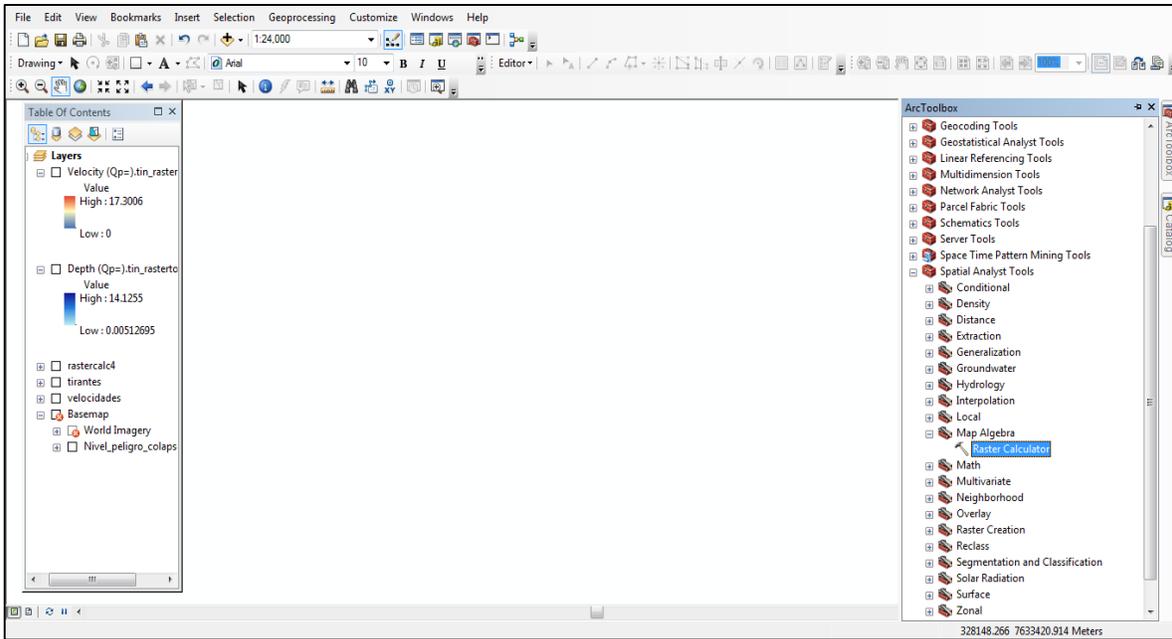


Figura 3.37: Localización de la herramienta Raster Calculator.

Fuente: Elaboración propia

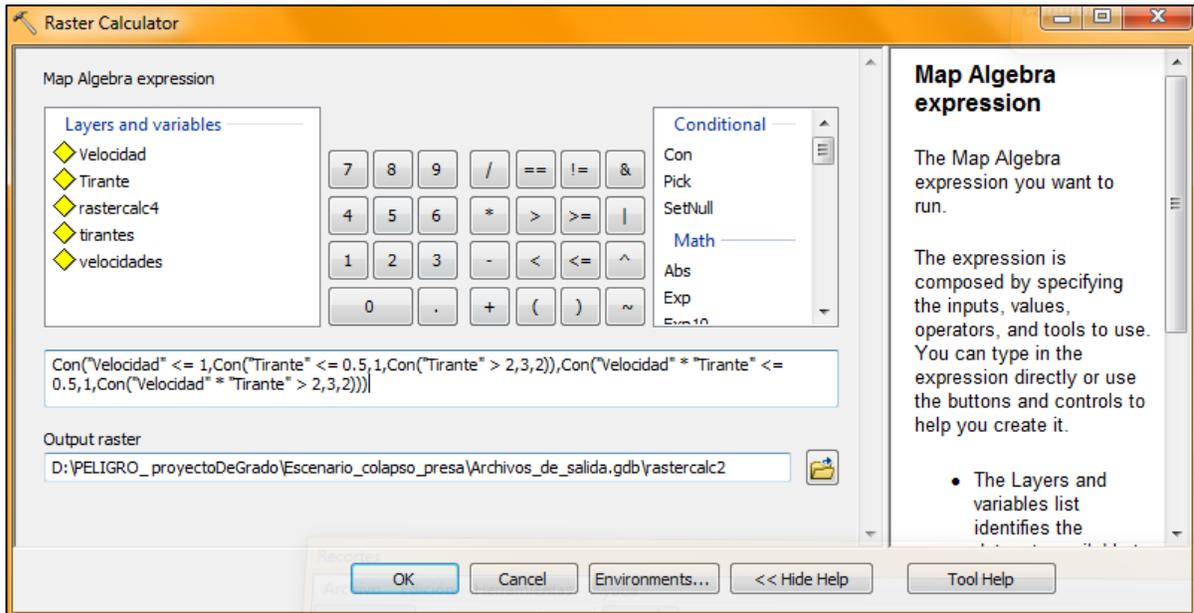


Figura 3.38: Ingreso de la condición para determinar los niveles de peligro.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2.1 ESCENARIO 1.

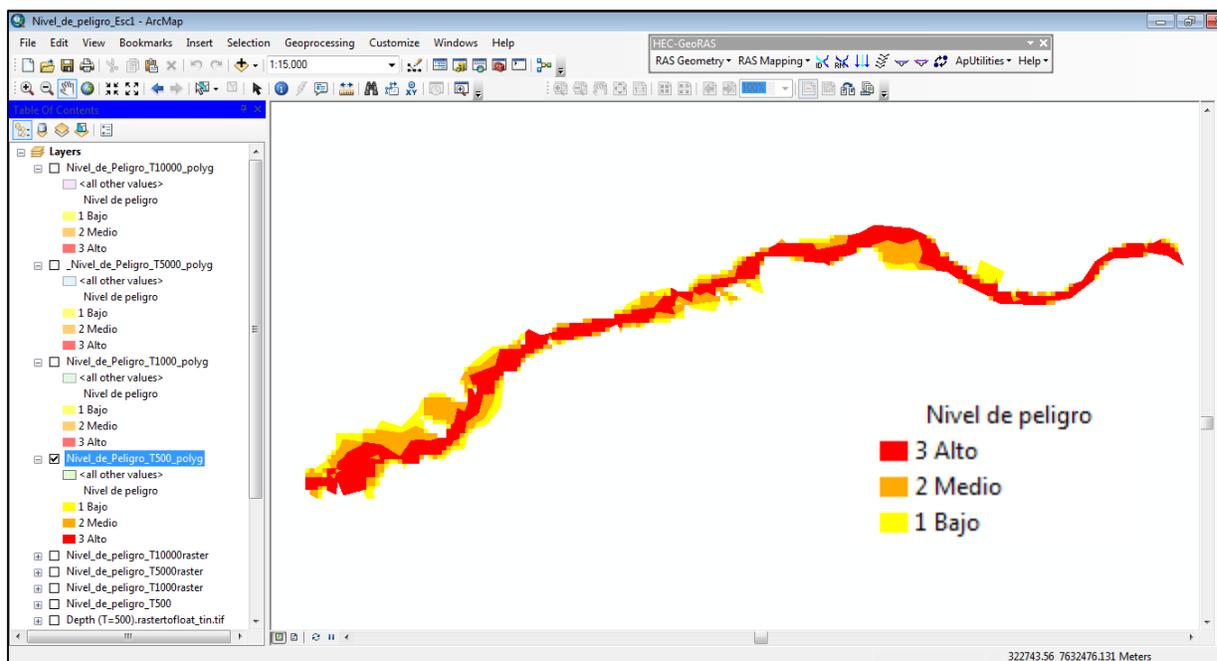


Figura 3.39: Nivel de peligro T=500 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

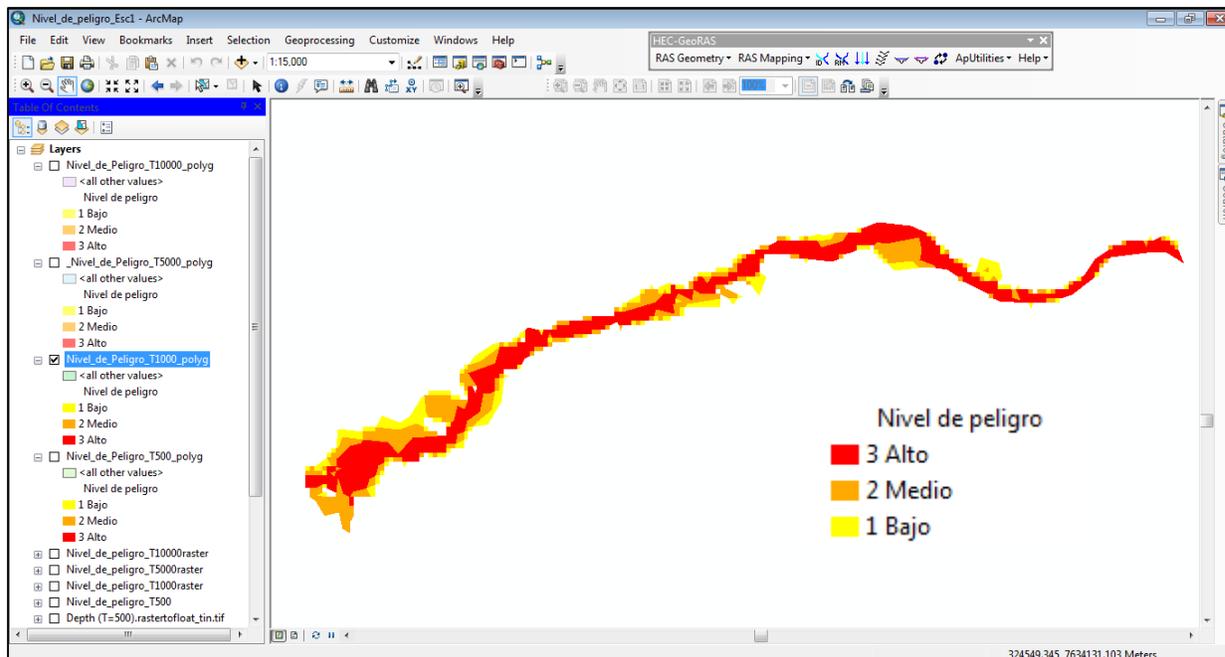


Figura 3.40: Nivel de peligro T=1000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

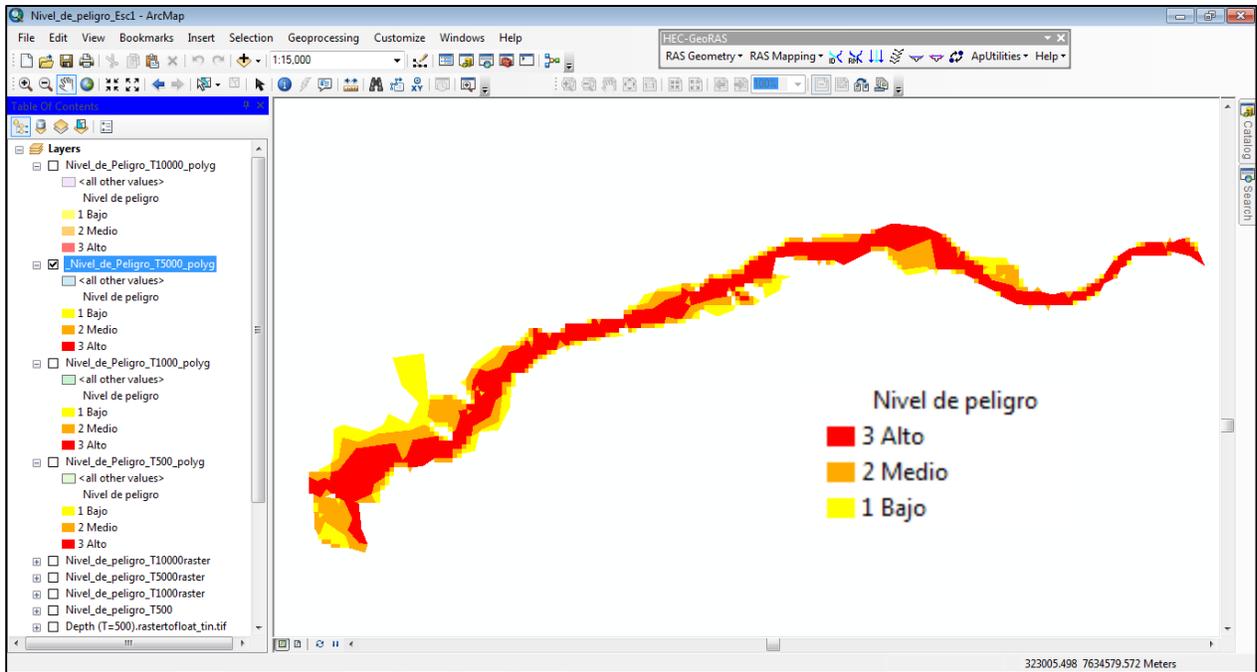


Figura 3.41: Nivel de peligro T=5000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

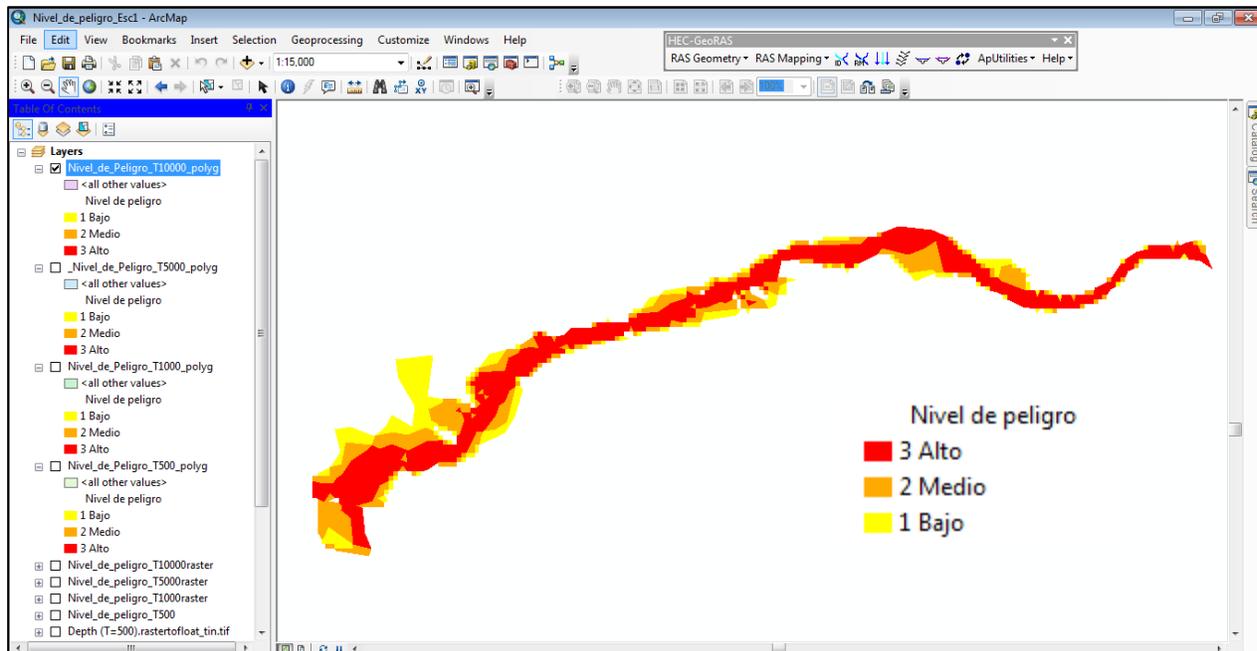


Figura 3.42: Nivel de peligro T=10 000 años para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2.2 ESCENARIO 2.

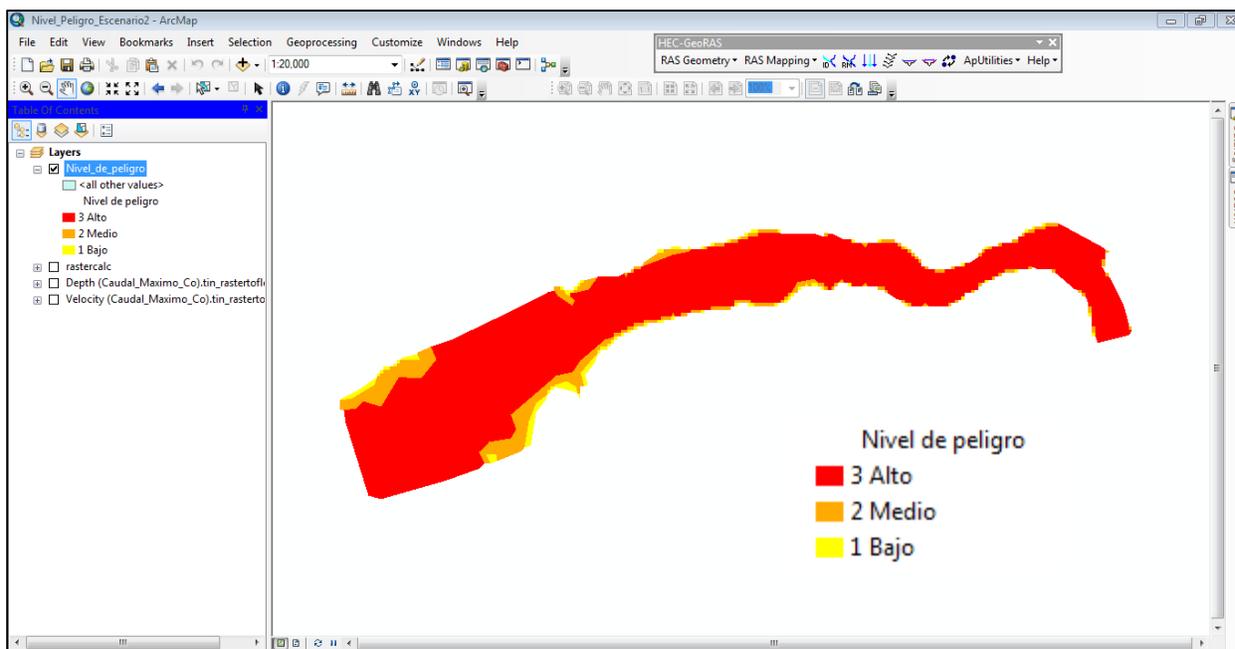


Figura 3.43: Nivel de peligro para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.2.3 ESCENARIO 3.

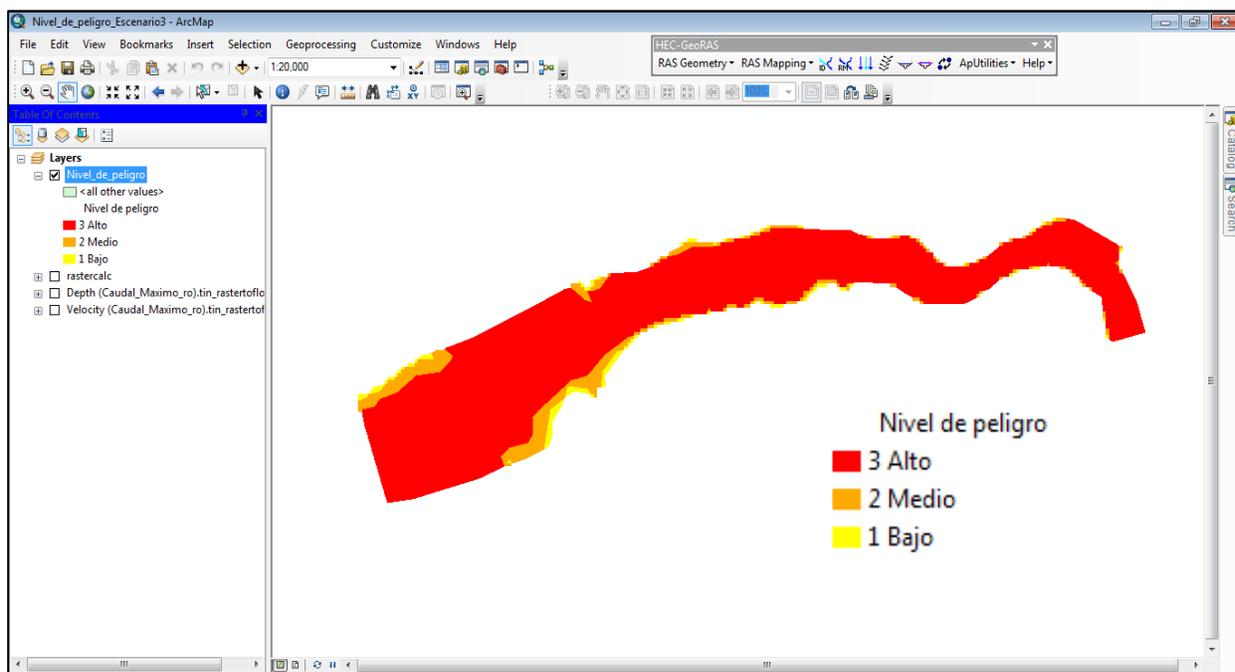


Figura 3.44: Nivel de peligro para el escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.3. Mapa de peligro.

Es el documento cartográfico donde se representa los niveles de peligro. Es la herramienta excelente para fomentar la concientización sobre peligros.

Es un mapa que pretende establecer geográficamente dónde y hasta qué punto determinados peligros representan una amenaza a las personas, propiedad, infraestructura, actividades económicas y medio ambiente.

Para su elaboración se procede a la integración de la información geoespacial de peligros identificados y distribuidos en todo el territorio de estudio. La representación gráfica corresponde a círculos algebraicos que representan cada peligro con un color asignado y un número que indica el grado de peligro (Martínez et al, 2007, p.21)

Los mapas de peligro para el escenario 1, escenario 2, escenario 3 se encuentran y aprecian en anexos E.

3.6.4. Análisis de la vulnerabilidad física.

3.6.4.1. Identificación de elementos expuestos.

Se trata de vincular los elementos que se localizan en el territorio con el área de afectación de una amenaza. Incluye la caracterización de la población vulnerable, la infraestructura productiva y de servicios públicos que podrían verse afectados por la ocurrencia de una amenaza (Renda et al., 2017, p.29).

Elementos expuestos será todo lo que se encuentre en las zonas que puede ser afectado ante la ocurrencia de un evento adverso ocasionado por los escenarios planteados. Se identifican los lotes o terrenos de propiedad de las personas dentro del área de influencia o área de afectación que se delimita anteriormente donde se puede ver en la figura 3.5. y 3.6.

En la figura 3.45 se visualiza los elementos expuestos como ser viviendas, lotes o terrenos de las personas, las comunidades cercanas de aguas abajo de la presa Rumicancha.

3.6.4.2. Identificación y elección de variables.

Se realiza mediante el levantamiento de información en campo con libreta y apoyo de imágenes de satélite. Para el análisis de vulnerabilidad física dentro del área de afectación, se identifica, selecciona, las siguientes variables más representativas:

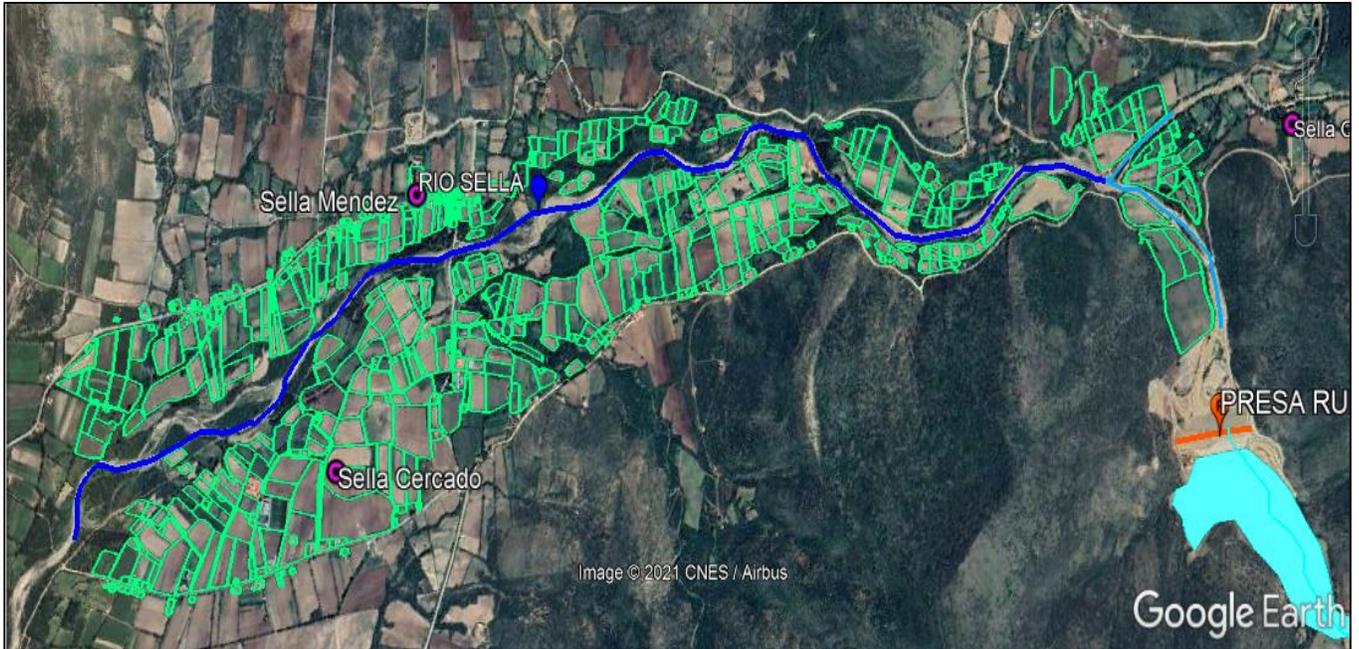


Figura 3.45: Elementos expuestos dentro del área de influencia.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23: Cuadro de valores según el tipo de material de construcción.

Tipo de Material	Puntaje	Descripción
Adobe	3	Tiene poca resistencia a la humedad
Muros de ladrillo con Columnas de concreto armado	2	Debido a que está compuesto por ladrillo y concreto tiene una mayor resistencia a la humedad
Concreto Armado	1	Si bien son más resistentes de debe tener en cuenta la filtración.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24: Cuadro de valores según el tipo de recubrimiento.

Tipo de recubrimiento	Puntaje	Descripción
Sin recubrimiento	3	Propenso a fallar
Recubierto con tarrajeo	2	Propenso a filtraciones y a oxidar el acero
Tarrajeado con impermeabilizante	1	Poco propenso a filtraciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25: Cuadro de valores según la distancia entre la estructura y el cauce.

Distancia	Puntaje	Descripción
En contacto directo	3	Vulnerabilidad alta
Alejado del cauce	1	Vulnerabilidad baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26: Cuadro de valores según el tipo de piso.

Piso	Puntaje	Descripción
Tierra	3	Propenso a erosionarse y afectar a los cimientos, zapatas
concreto, cerámico	1	Poco propenso a filtraciones, erosión

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27: Cuadro de valores de lotes con o sin cultivo.

Lote	Puntaje	Descripción
Con cultivo	3	Vulnerabilidad alta
Preparación de suelo	2	Vulnerabilidad media
Sin cultivo	1	Vulnerabilidad baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28: Cuadro de valores de cerramiento de lote.

Lote	Puntaje	Descripción
Con alambre, malla	3	Vulnerabilidad alta
Con construcción	2	Vulnerabilidad media
Sin cerramiento	1	Vulnerabilidad baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29: Cuadro de valores según si es habitable por personas.

vivienda	Puntaje	Descripción
Habitable	3	Vulnerabilidad alta
No habitable	1	Vulnerabilidad baja

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.3. Nivel de vulnerabilidad física.

Se determina de la siguiente manera:

Se realiza la asignación de un peso (ponderación), de acuerdo a su incidencia ante inundaciones.

A mayor peso, tiene mayor incidencia.

Se realiza la asignación de un valor a cada uno de los indicadores de cada variable. Mayor valor al que tiene mayor incidencia.

Tabla 3.30: Ponderación y valoración de variables de vulnerabilidad.

Variables de Vulnerabilidad		Materi al	Estado de conservaci ón	Emplazamie nto cerca al río	Tipo de piso	Con cultivo	con cerramie nto	habitab le
Ponderación(P)		6	4	10	6	10	4	10
Valor (V) de los Indicadores	3 Alto	Adobe	Sin tarrajeo	Si	Tierra	Si	Alambre	Si
	2 Medio	Ladrill o	Tarrajeado	-	-	Preparaci ón	Si	-
	1 Bajo	Concre to	Impermeab le	No	concret o, cerámi co	No	No	No

Fuente: Elaboración propia

Luego se multiplica la ponderación de la variable con el valor del indicador. De esta forma se obtiene un puntaje para cada lote, seguido se realiza la sumatoria resultante de cada fila.

Ahora para establecer nuestros rangos de vulnerabilidad realizamos la diferencia entre el valor mayor posible y el menor posible, este valor lo dividimos entre 3 y obtenemos los valores de la tabla 3.36.

Tabla 3.31: Niveles de vulnerabilidad.

Nivel de vulnerabilidad		Rangos
Alto	3	116,66 a 150
Medio	2	83,33 a 116,66
Bajo	1	50 a 83,33

Fuente: Elaboración propia

Luego mediante el uso de herramientas SIG, específicamente con el programa ArcGIS se realiza de la siguiente manera:

Entramos a la tabla de atributos de la capa “Lotes” e ingresamos los valores de las tablas de variables que se identificó mediante levantamiento de información a través de visita de campo y con imagen satelital, que se vio en el apartado 3.6.4.2.

Ingresado todos los valores, se crea una columna para determinar el valor de la vulnerabilidad física. Con la herramienta “field calculator”, se hace el cálculo para determinar el valor de vulnerabilidad física usando la ponderación asignada. La fórmula final queda de la siguiente manera: (ver figura 3.46)

$$\text{Vulnerabilidad} = [\text{Material}] * 6 + [\text{Conservación}] * 4 + [\text{Emplazamiento}] * 10 + [\text{Piso}] * 6 + [\text{Cultivo}] * 10 + [\text{Cerramiento}] * 4 + [\text{Habitable}] * 10$$

Se aplica la formula descrita, se obtuvieron los valores de rangos desde 52 a 112, como se muestra en la figura 3.47 y la figura 3.48.

Se realiza la reagrupación de acuerdo a la tabla 3.31, se obtiene el nivel de vulnerabilidad física, que en este caso se obtuvo dos niveles de vulnerabilidad: vulnerabilidad baja con valor 1 y vulnerabilidad media con un valor 2, como se muestra en la figura 3.49.

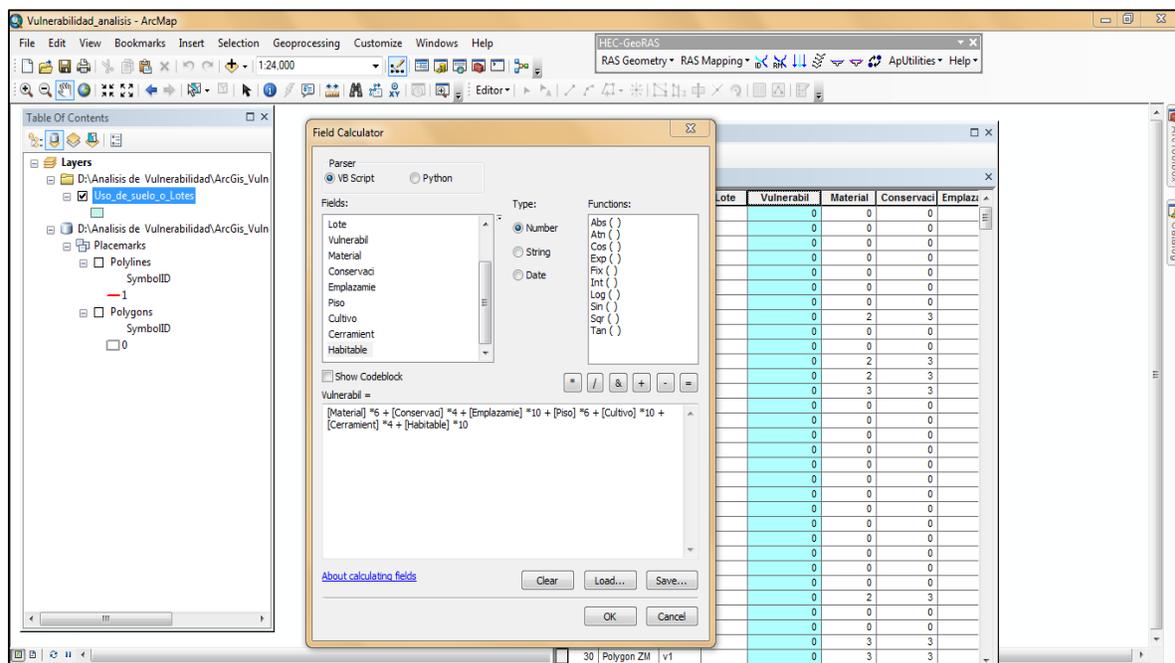


Figura 3.46: Cálculo de vulnerabilidad.

Fuente: Elaboración propia

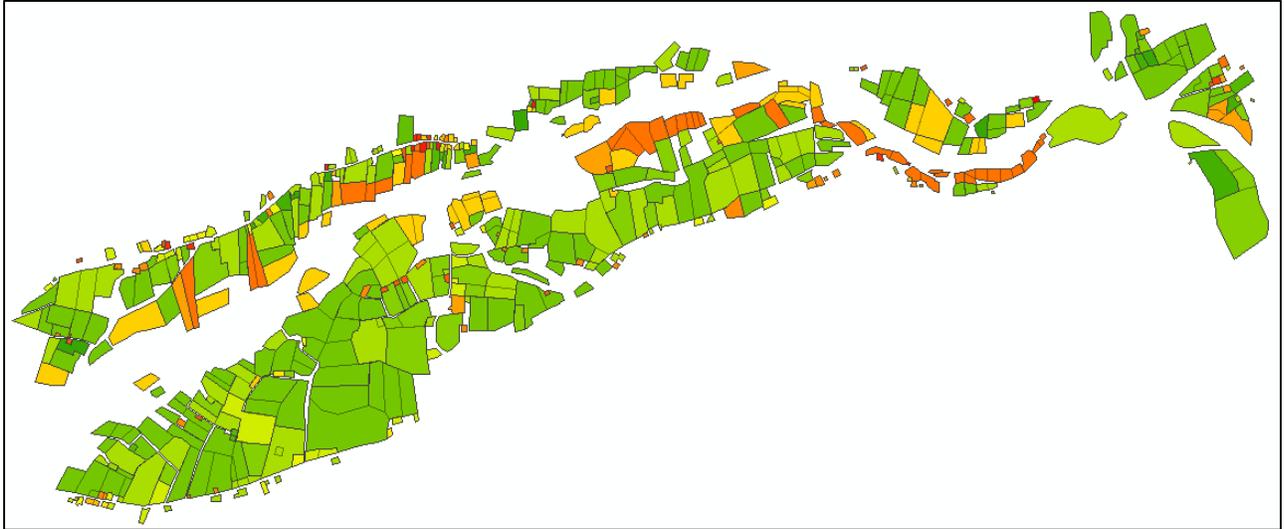


Figura 3.47: Cálculo de vulnerabilidad física de los lotes.

Fuente: Elaboración propia

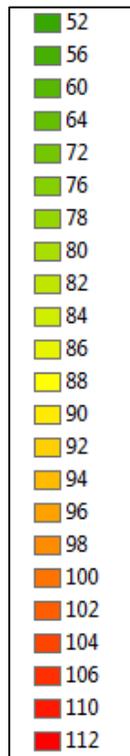


Figura 3.48: Valores obtenidos del cálculo de vulnerabilidad física.

Fuente: Elaboración propia

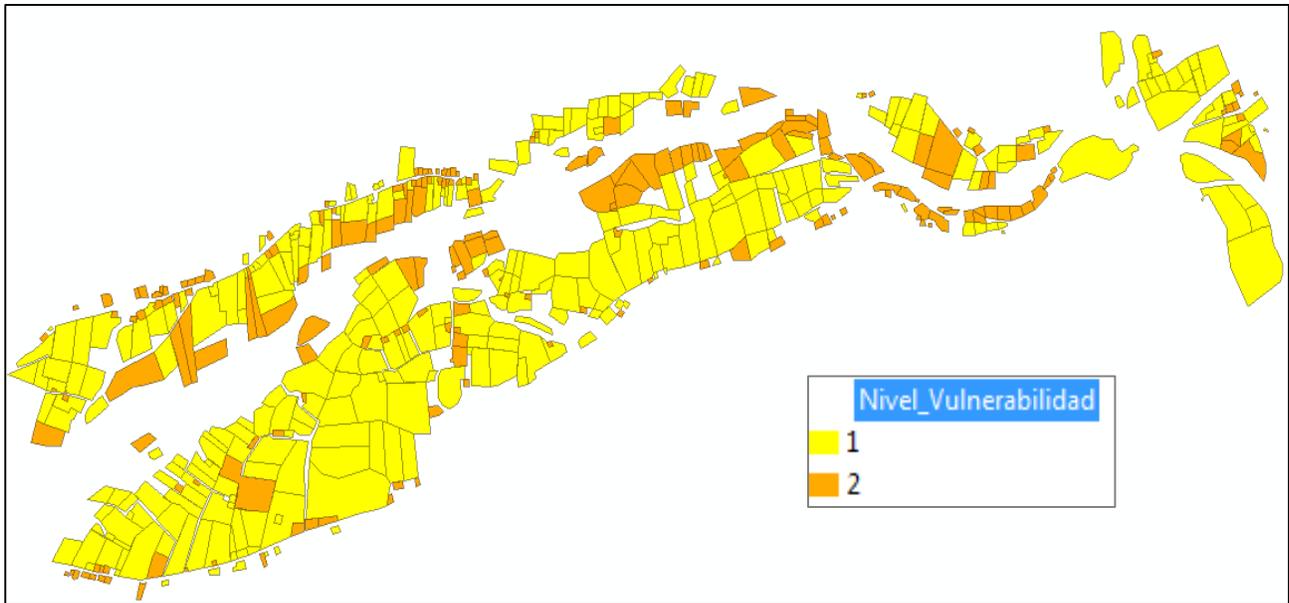


Figura 3.49: Nivel de vulnerabilidad física.

Fuente: Elaboración propia

Así de esta forma se determina los niveles de vulnerabilidad física y se aplica para los escenarios definidos.

3.6.4.4. Mapa de vulnerabilidad.

Es un mapa que pretende mostrar la distribución espacial o geográfica de la predisposición o susceptibilidad física, que tiene una comunidad de ser afectada en caso de que un peligro se manifieste (Martínez et al, 2007, p.22).

Para su mejor visualización el mapa de vulnerabilidad física que se utiliza para cada escenario, se encuentra en anexos E.

3.6.5. Estimación del riesgo.

Se tiene identificados y analizados los peligros a los que está expuesta el ámbito geográfico de estudio mediante la evaluación de su parámetros y el nivel de susceptibilidad ante el fenómenos, y realizado el respectivo análisis de los componentes que inciden en la vulnerabilidad física explicada por la exposición, fragilidad, la identificación de los elementos potencialmente vulnerables, se procede a la conjunción de éstos para estimar el nivel de riesgo del área en estudio y generar el mapa de riesgo.

3.5.5.1. Nivel de riesgo.

Para procesar y mostrar los cálculos se usará el programa ArcGIS, puesto que se tiene los niveles de peligro y el nivel de vulnerabilidad física. Para estimar el nivel de riesgo se toma en cuenta la siguiente matriz para definir los niveles de riesgo.

Tabla 3.32: Matriz de riesgo.

Peligro	Alto	3,00	3,00	6,00	9,00
	Medio	2,00	2,00	4,00	6,00
	Bajo	1,00	1,00	2,00	3,00
Nivel			1,00	2,00	3,00
			Bajo	Medio	Alto
		Vulnerabilidad			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33: Rangos para definir el nivel de riesgo.

NIVEL DE RIESGO	RANGO	≤ R <	RANGO
ALTO	6,00	≤ R <	9,00
MEDIO	2,00	≤ R ≤	4,00
BAJO	0,00	≤ R ≤	1,00

Fuente: Elaboración propia

En el ArcGIS con la herramienta “intersect” se interseca los niveles de peligro con los de vulnerabilidad, y de esta intersección se crea otro layer. (ver figura 3.50 y 3.51).

Se abre la tabla de atributos del nuevo layer, se puede observar que están los valores de niveles peligro y vulnerabilidad física, seguido se crea una nueva columna, para calcular el valor de riesgo, con la calculadora que se tiene en sus herramientas “field calculator”. Se aplica la fórmula: $Riesgo = Peligro * Vulnerabilidad$ (ver figura 3.52).

Luego se crea otra columna para estimar el nivel de riesgo de acuerdo al valor calculado, que se encuentre entre los rangos de la tabla 3.33 (ver figura 3.53 y 3.54)., así se de esta forma se estima el nivel de riesgo (ver figura 3.55).

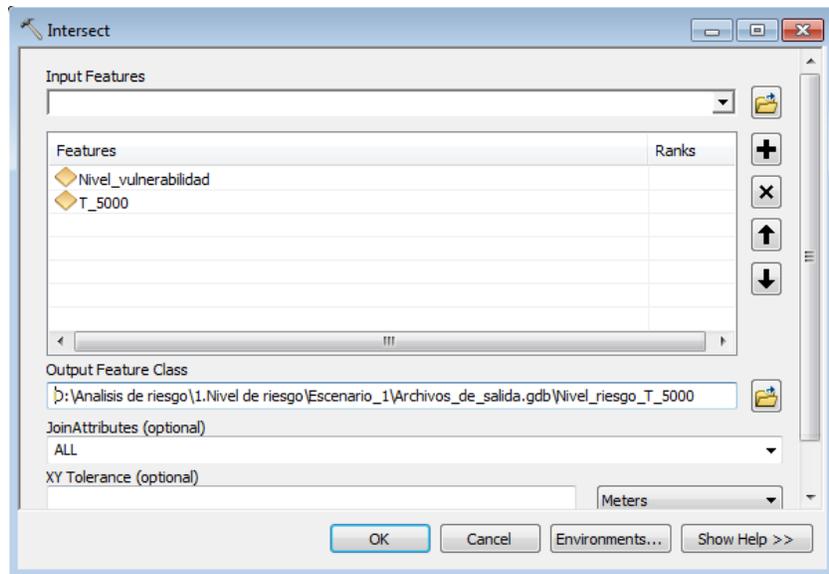


Figura 3.50: Herramienta intersect del programa ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

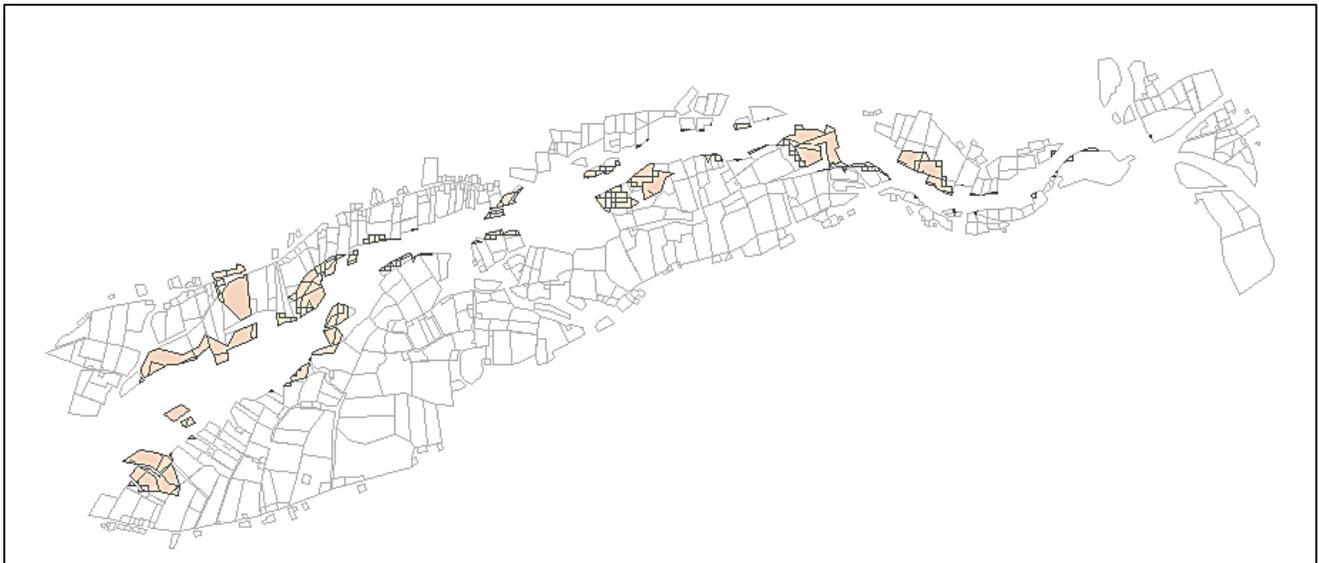


Figura 3.51: Intersección de niveles de peligro y vulnerabilidad física en ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

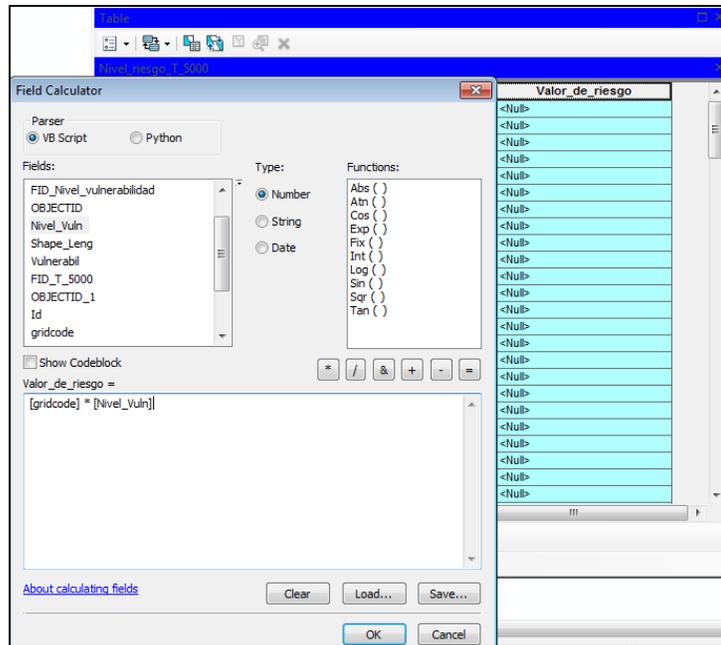


Figura 3.52: Cálculo de valores de niveles de riesgo en ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

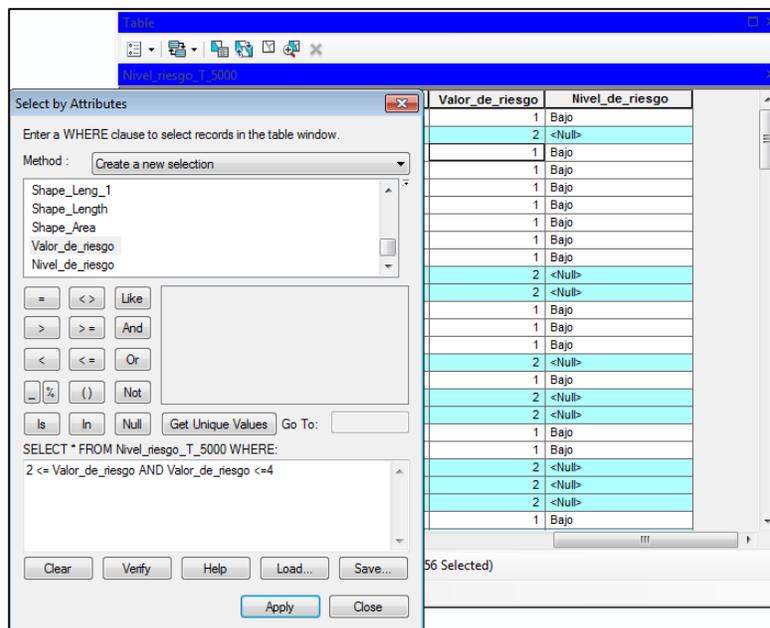


Figura 3.53: Nivel de riesgo según valores en ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

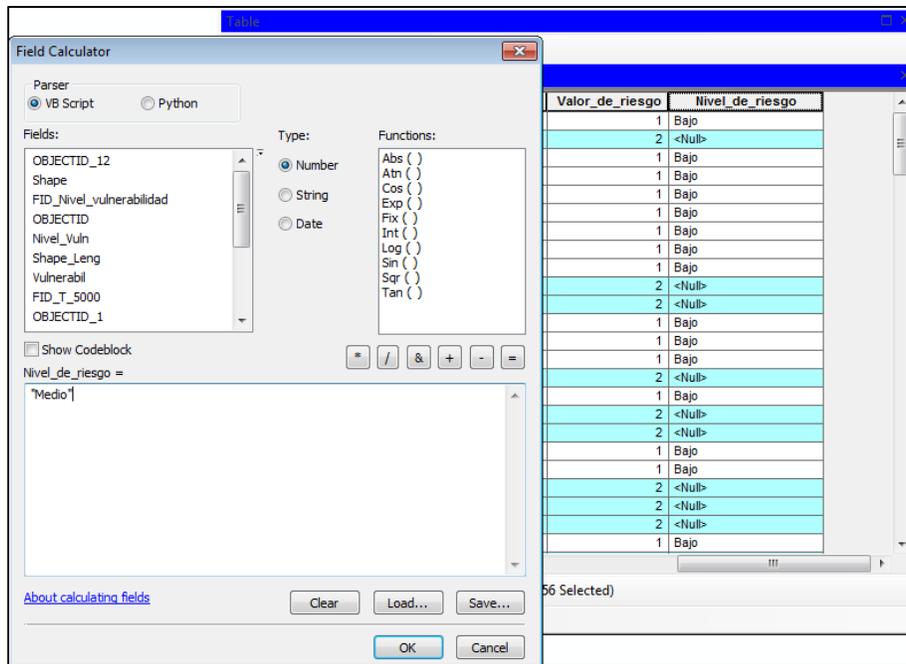


Figura 3.54: Estimación del nivel de riesgo en ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

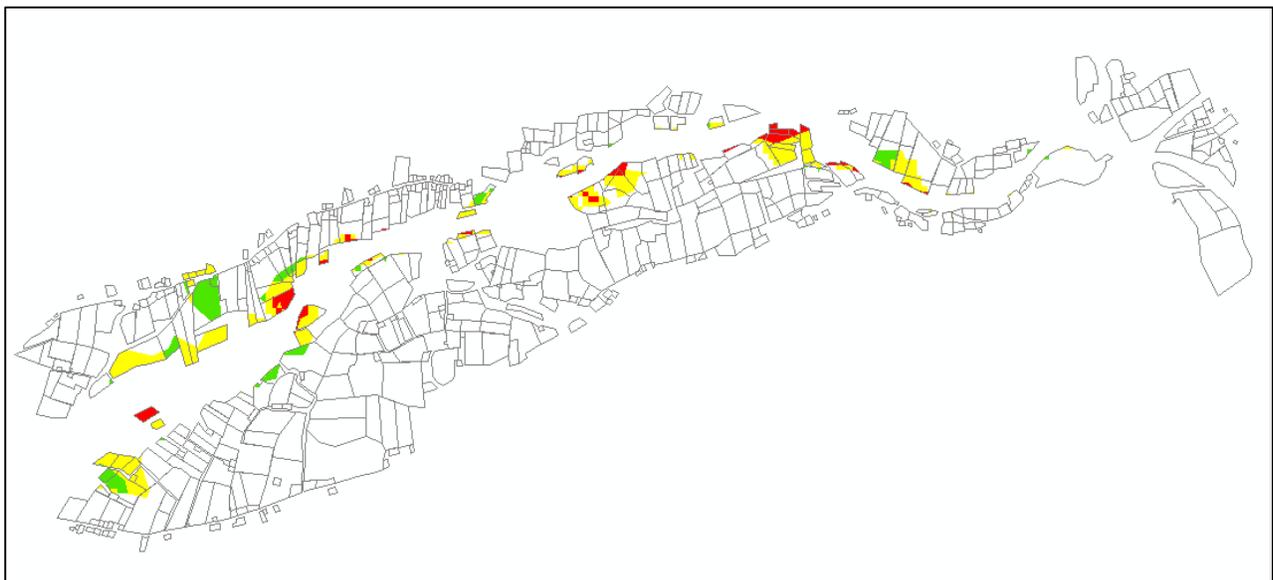


Figura 3.55: Nivel de riesgo en ArcGis.

Fuente: Elaboración propia

3.5.5.2. Mapa de riesgo.

Es un documento gráfico de representación convencional que muestra la distribución espacial o geográfica de la afectación negativa esperada (daños económicos, sociales o ambientales) que se deben a la ocurrencia de uno o más peligros.

La representación gráfica corresponde a círculos algebraicos que representan el riesgo con un color y un número que indica el grado o nivel de riesgo, ambos en función al evento. (Martínez et al, 2007, p.22)

Los mapas de riesgo para cada escenario se encuentran en anexos E.

3.6.6. Medidas de prevención y/o reducción de riesgo.

Se proponen diferentes tipos de medidas enfocadas en la prevención y reducción de los efectos negativos que generan este fenómeno considerando la ubicación, el nivel de riesgo del área de estudio si es necesario o no. Las medidas serán de carácter no estructural y estructural.

3.5.6.1. Medidas no estructurales.

Representan una intervención física mediante el desarrollo o refuerzo de obras de ingeniería para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas para lograr de esa manera la resistencia y la resiliencia de las estructuras o de los sistemas, y de esa manera proteger a la población y sus bienes.

- Fortalecer las capacidades de la población y autoridades en materia de Gestión de las crecidas, contemplando aspectos relacionados con rutas de evacuación, zonas seguras y puntos críticos.
- Taller o cursos de capacitación a las personas del lugar, para que tengan el conocimiento de estos escenarios de crecidas máximas que puede afectarles y que tengan conciencia de ello.
- Elaborar el plan de prevención y reducción de riesgo de desastres de la zona, en el marco de la normatividad vigente y sus competencias.
- Incorporar el presente estudio en los contenidos del plan de desarrollo de las comunidades de la zona.
- Colocación de avisos con signos de alerta que identifiquen las áreas propensas a inundarse y marcas del alcance de las aguas en crecidas históricas.

3.5.6.2. Medidas estructurales.

Cualquier medida que no suponga una construcción física y que utiliza el conocimiento, las prácticas o los acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos, especialmente a través de políticas y leyes, una mayor concientización pública, la capacitación y la educación.

- Identificando las zonas donde las crecidas hacen que desborden al río, construir o hacer mantenimiento de muros de gaviones para que el nivel de agua no afecte a los lotes con viviendas y cultivos. Su objetivo es proteger un sector o tramo determinado impidiendo que el agua desbordada del cauce, avance sobre la zona protegida. La protección que brindan es solamente contra la altura de crecida
- Disipador de energía, utilizado para disminuir la velocidad y energía del agua de la crecida.
- Modificación del cauce, este tipo de medida se refiere a la posibilidad de aumentar la capacidad de conducción de los cursos de agua, por rectificación, profundización o ensanchamiento de los mismos. También se refiere a la remoción de obstáculos y a la limpieza y ampliación. El objetivo es disminuir la altura que alcanzan las aguas de las crecidas.

CAPÍTULO 4: ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

4.1. Del análisis del peligro.

4.1.1. Escenario 1

Crecida a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.

Tabla 4.1: Valores de las características de la Subcuenca Chaupicancha.

Características de superficie:			
Descripción	Unidad	Valor	Interpretación
Área de la cuenca	km ²	67,24	Cuenca Pequeña
Perímetro	km	46,0	
Longitud de la cuenca	km	15,63	
Ancho de la cuenca	km	4,30	
Parámetros de forma			
Descripción	Unidad	Valor	Interpretación
Factor de Forma Índice de Horton (Ff)	-	0,28	Alargada
Índice Gravelius o Compacidad (IC)	-	1,58	Oblonga a Rectangular
Parámetros de Relieve			
Descripción	Unidad	Valor	Interpretación
Cota máxima de la cuenca	m.s.n.m.	3681	Tiene influencia sobre la respuesta hidrológica, en consecuencia, la temperatura disminuye con la elevación.
Cota mínima de la cuenca	m.s.n.m.	2182	
Pendiente media de la cuenca	%	41,93	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos
Curva Hipsométrica	-	Tipo B	Una cuenca geológicamente madura, cuenca de pie de montaña
Altitud media de la cuenca	m.s.n.m.	2741	
Altitud más frecuente de la cuenca	m.s.n.m.	2550	
Cota máxima del cauce principal	m.s.n.m.	3243	
Cota mínima del cauce principal	m.s.n.m.	2186	
Pendiente del cauce principal	%	5,29	
Parámetros de Red de drenaje			
Descripción	Unidad	Valor	Interpretación
Número de orden de cauce.	-	Orden 5	El mayor orden es 5.
Longitud de cauces.			
Longitud del cauce principal	km	20	Dicho parámetro influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos.
Longitud de cauces Total (Lt)	km	218,71	
Densidad de drenaje.	km/km ²	3,25	La densidad de drenaje de la cuenca es Moderada

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de concentración.

Guarda relación con la longitud del cauce principal pues a mayor longitud mayor tiempo de concentración lo que a su vez se relaciona con la pendiente conociéndose como Tiempo de Concentración, según villón, de una cuenca, es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto "hidrológicamente" más alejado de aquella, llegue a la salida.

Se consideró para el trabajo que se utilizó la ecuación de Kirpich, fue desarrollada sobre cuencas de mayor parecido al de las subcuencas de este trabajo (aplicada para pequeñas 7 cuencas montañosas en áreas rurales), obteniendo un resultado como sintetiza en la siguiente tabla 4.3. en minutos y horas.

El tiempo de concentración muy bajo nos dice que la pendiente indica que el agua discurre rápidamente. Factor que va de la mano con la textura presente en el cauce, teniendo así una importancia directa en las magnitudes de las crecidas.

Tabla 4.2: Valores de Tiempo de concentración para cada Subcuenca.

Escenario	Tiempo de concentración (Tc) de la cuenca		
1	Tiempo de concentración de la subcuenca Chaupicancha	min	127
		h	2,12

Fuente: Elaboración propia

Número de curva ponderada.

En la subcuenca Chaupicancha de 67,24 km², existe una zona de 14,80 km² con combinación de bosques y pastos, con condición hidrológica mala y con un suelo con moderado potencial de escorrentía (grupo B), donde el NC = 73; la otra zona de 0,18 km², está cubierta de cultivos en hileras con condición hidrológica mala y con un suelo con moderado potencial de escorrentía (grupo B), donde el NC = 81; la zona restante de 52,26 km², está cubierta de maleza mezclada con pasto de semilla con condición hidrológica mala y con un suelo con moderado potencial de escorrentía (grupo B) donde el NC = 67.

Entonces el número de curva ponderado para la Subcuenca Chaupicancha es igual a 68.

Según la teoría, el número de curva varía de 1 a 100. Un numero de curva N = 100, indica que toda la lluvia escurre y un número N = 1 indica que toda la lluvia se infiltra. Entonces este valor N=68 quiere decir que la subcuenca Chaupicancha tiende a escurrir.

Análisis de precipitaciones máximas.

Estimado la altura de precipitación máxima para cada periodo de retorno se puede decir que:

- Es probable que la precipitación máxima de 140,63 mm se presente al menos una vez cada 500 años, en función a la muestra con la que estamos trabajando.
- Es probable que la precipitación máxima de 150,54 mm se presente al menos una vez cada 1000 años, en función a la muestra con la que estamos trabajando.
- Es probable que la precipitación máxima de 173,53 mm se presente al menos una vez cada 5000 años, en función a la muestra con la que estamos trabajando.
- Es probable que la precipitación máxima de 183,44 mm se presente al menos una vez cada 10 000 años, en función a la muestra con la que estamos trabajando.

Bajo el concepto del tiempo de concentración (t_c) se puede estimar que:

- Es probable que la precipitación máxima de 89,90 mm se presente al menos una vez cada 500 años, para el tiempo de concentración de 2,12 h.
- Es probable que la precipitación máxima de 96,24 mm se presente al menos una vez cada 1000 años, para el tiempo de concentración de 2,12 h.
- Es probable que la precipitación máxima de 110,93 mm se presente al menos una vez cada 5000 años, para el tiempo de concentración de 2,12 h.
- Es probable que la precipitación máxima de 117,27 mm se presente al menos una vez cada 10 000 años, para el tiempo de concentración de 2,12 h.

Este último valor de precipitación máxima para la duración del tiempo de concentración es muy importante ya que de él puede estimar la precipitación en exceso, lo que escurrirá sobre la superficie de la cuenca, y se aplica para estimar el caudal máximo de la salida de la cuenca con el método de hidrograma triangular.

Estimación de caudales máximos.

- Es probable que el caudal máximo de 288,81 m³/s. se presente al menos una vez cada 500 años, en función del área de la cuenca, altura de precipitación en exceso y tiempo de concentración.

- Es probable que el caudal máximo de 321,20 m³/s. se presente al menos una vez cada 1000 años, en función del área de la cuenca, altura de precipitación en exceso y tiempo de concentración.
- Es probable que el caudal máximo de 398,13 m³/s. se presente al menos una vez cada 5000 años, en función del área de la cuenca, altura de precipitación en exceso y tiempo de concentración.
- Es probable que el caudal máximo de 431,94 m³/s. se presente al menos una vez cada 10 000 años, en función del área de la cuenca, altura de precipitación en exceso y tiempo de concentración.

Tirantes y velocidades.

Con la ejecución del modelado geométrico e hidráulico y con dato del caudal máximo de crecida estimado (m³/s), se presente al menos una vez cada T años, se determinó tirantes y velocidades de agua en la zona aguas abajo de la presa Rumicancha, precisamente esta crecida pasara por el rio Sella produciendo inundación a tierras aledañas.

En la siguiente tabla 4.3. se muestra que para diferente periodo de retorno y caudal máximo de crecida genera una inundación donde se tendrá tirantes y velocidades de agua diferentes.

Entonces se puede decir que para un T=500 años, un caudal de crecida de 288,81 m³/s, los tirantes tendrá valores de 0 hasta 4,21 metros y velocidades con valores de 0 hasta 4,94 m/s.

Donde los valores de tirantes y velocidades mayores están concentrados en el cauce (rio Sella), por su topografía que presenta, y va descendiendo los valores según lo que se desborda.

Tabla 4.3: Valores de tirantes y velocidades de agua para el escenario 1.

Periodo de retorno	Caudal máximo de crecida (m ³ /s)	Tirantes (y) (m)	Velocidades(v) (m/s)
500	288,81	$0,0 \leq y < 4$	$0,0 \leq v < 5,14$
1000	321,20	$0,0 \leq y < 4,10$	$0,0 \leq v < 5,22$
5000	398,13	$0,0 \leq y < 4,40$	$0,0 \leq v < 5,47$
10 000	431,94	$0,0 \leq y < 4,53$	$0,0 \leq v < 5,59$

Fuente: Elaboración propia

Niveles de peligro.

Procesando los datos antes mencionados se obtuvieron los mapas de peligro que indican grados de peligrosidad en el área de estudio usando el criterio del gobierno de Francia. oficina federal de la economía de las aguas, Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE) para evaluar los peligros. Obteniéndose el mayor peligro en el escenario 2: Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha.

El criterio del Gobierno de Francia. Oficina Federal de la Economía de las Aguas, Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE), se toma en cuenta la velocidad y el tirante debido a que el tirante determina una altura de inundación y cuanto más alto es este mayor será el peligro por otra parte la velocidad es la que ocasiona la erosión.

Entonces del análisis de peligro de la zona en estudio se estima los niveles de peligro para el escenario 1 definido, así representarlo gráficamente en mapa, donde se obtuvo, del área total de influencia, que:

Tr (años)	Área (%)	Nivel de peligro
500	8,17	Alto
	4,38	Medio
	2,86	Bajo
1000	8,61	Alto
	5,10	Medio
	2,95	Bajo
5000	10,40	Alto
	5,55	Medio
	4,05	Bajo
10 000	11,14	Alto
	5,79	Medio
	4,19	Bajo

4.1.2. Escenario 2.

Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha.

Estimación de caudales máximos.

En este escenario no se realiza el mismo proceso de lo anterior, como análisis de precipitaciones máximas, porque, para la estimación de caudal máximo está en función al volumen de embalse y altura de agua del embalse, para eso se aplica otra ecuación, que se describe en el apartado 3.6.3.1.2, y no con el método de hidrograma triangular.

Se utiliza la fórmula o ecuación de Froehlich (1995), por razones: que el autor llega a determinar dicha ecuación, en base de investigaciones de rotura de presa de materiales sueltos que es el caso de la presa Rumicancha, y otra razón, porque es el menos antiguo investigación que se hizo para estimar caudales por colapsos de presa.

Es probable que el caudal máximo de $6778,78 \text{ m}^3/\text{s}$ se presente al menos una vez si colapsa la presa Rumicancha, en función de el volumen del embalse (m^3) y la altura de agua del embalse (m). sin tomar en consideración aporte de crecida aguas arriba.

Tirantes y velocidades.

Entonces si la presa Rumicancha llega a colapsar genera, el caudal de crecida de $6778,78 \text{ m}^3/\text{s}$ m^3/s , los tirantes tendrá valores de 0,00 hasta 14,4 metros y velocidades con valores de 0,00 hasta 21,23 m/s.

Donde los valores de tirantes y velocidades mayores están concentrados en el cauce (rio Sella), sobre todo al principio de su trayectoria precisamente donde comienza la descarga del caudal por el colapso, también debido a la topografía que presenta, y va descendiendo los valores según lo que se desborda a tierras aledañas a lo largo del rio Sella.

Niveles de peligro.

Área (%)	Nivel de peligro
55,34	Alto
6,21	Medio
1,76	Bajo

4.1.3. Escenario 3.

Crecida a partir por el sobrevertimiento y consecuente rotura de la presa Rumicancha.

Estimación de caudales máximos.

La estimación de caudal máximo está en función al volumen de embalse y altura de agua del embalse, con consideración de aporte de crecida que produce sobrevertido y consecuente rotura de la presa. Se utiliza la ecuación de Froehlich (1995).

Es probable que el caudal máximo de 7669,14 m³/s se presente al menos una vez si colapsa la presa Rumicancha, en función de el volumen del embalse (m³) y la altura de agua del embalse (m). considerando el aporte de agua de crecida máxima que produce rotura de la presa por sobrevertido.

Tirantes y velocidades.

Entonces la rotura de la presa Rumicancha por sobrevertido genera, el caudal máximo de crecida de 7669,14 m³/s, los tirantes tendrá valores de 0,00 hasta 15,10 metros y velocidades con valores de 0,00 hasta 21,90 m/s.

Niveles de peligro.

Área (%)	Nivel de peligro
57,71	Alto
5,42	Medio
1,61	Bajo

4.2. Del análisis de la vulnerabilidad física.

Del Análisis de elementos expuestos se ha determinado que en el área de estudio existen 308 lotes o terrenos de uso para cultivo, 174 de uso con estructuras de viviendas y 40 sin uso de nada algunos con cerramientos de alambre o malla.

De acuerdo al análisis de vulnerabilidad física de la zona en interés se determinó que, del área total de influencia, no existe un nivel de vulnerabilidad física alta, es de 0%, mientras que el 43,8 % del área de influencia, tiene un nivel medio y un 12 % tiene un nivel bajo de vulnerabilidad física.

Estos resultados son expresados gráficamente en los mapas de vulnerabilidad en el cual se indica los lotes que se encuentran más vulnerables, esto para identificar y realizar las medidas necesarias para reducir la vulnerabilidad física ante una inundación.

Los factores más incidentes para determinar la vulnerabilidad en cada lote son el tipo de material siendo el más vulnerable el adobe seguido por el ladrillo sin ningún tipo de protección contra la humedad, se debe indicar que ninguna estructura construida en la zona tiene protección impermeabilizada siendo este un punto clave.

Recalcar que la mayor parte de las estructuras de las viviendas se encuentra alejado del contacto directo con el cauce mientras que los lotes con cultivo son lo más cercanos al río.

4.3. De estimación de riesgo.

- De presentarse crecida a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha:
 - El 0,40 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, el 1,98 % el nivel de riesgo es medio y el 0,38% es bajo. Para un T= 500 años.
 - El 0,46 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, mientras que el 2,38 % es medio y el 0,37 % es bajo. Para un T= 1000 años.
 - El 0,68 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, mientras que el 3,40 % es medio y el 1,08% es bajo. Para un T= 5000 años.
 - El 0,83 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, mientras que el 3,70 % es medio y el 1,23 % es bajo. Para un T= 10000 años.
- De presentarse la Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha:
 - El 9,29 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, el 24,04 % el nivel de riesgo es medio y el 1,22 % es nivel de riesgo es bajo.
- De presentarse la Crecida a partir por el sobrevertimiento y consecuente rotura de la presa Rumicancha.
 - El 9,54 % del área de influencia el nivel de riesgo es alto, el 24,73 % el nivel de riesgo es medio y el 1,21 % es nivel de riesgo es bajo.

Tabla 4.4: Resultado de estimación de riesgo para el escenario 1.

Escenario 1: Crecida a causa de escorrentía superficial o directa de la Subcuenca Chaupicancha.				
Periodo de retorno	500 años	1000 años	5000 años	10 000 años
Área de influencia (km ²)	3,24	3,24	3,24	3,24
Caudal de crecida máxima (m ³ /s)	288,81	321,20	398,13	431,94
Área de afectación (km ²)	0,089	0,10	0,17	0,19
Área de afectación (%)	2,72	3,10	5,25	5,86
Áreas de riesgo (km ²)	0,013	0,015	0,022	0,027
	0,064	0,077	0,11	0,12
	0,012	0,012	0,035	0,04
Áreas de riesgo (%)	0,40	0,46	0,68	0,83
	1,98	2,38	3,40	3,70
	0,37	0,37	1,08	1,23
Nivel de riesgo	Alto Medio Bajo	Alto Medio Bajo	Alto Medio Bajo	Alto Medio Bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5: Resultado de estimación de riesgo para el escenario 2.

Escenario 2: Crecida generada por el colapso de la presa Rumicancha	
Área de influencia (km ²)	3,24
Caudal de crecida máxima (m ³ /s)	6778,78
Área de afectación (km ²)	1,12
Área de afectación (%)	34,57
Áreas de riesgo (km ²)	0,301
	0,779
	0,039
Áreas de riesgo (%)	9,29
	24,04
	1,22
Nivel de riesgo	Alto Medio Bajo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6: Resultado de estimación de riesgo para el escenario 3.

Escenario 3: Crecida a partir por el sobrevertimiento y consecuente rotura de la presa Rumicancha.	
Área de influencia (km ²)	3,24
Caudal de crecida máxima (m ³ /s)	7669,14
Área de afectación (km ²)	1,15
Área de afectación (%)	35,5
Áreas de riesgo (km ²)	0,309
	0,801
	0,039
Áreas de riesgo (%)	9,54
	24,73
	1,21
Nivel de riesgo	Alto Medio Bajo

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones:

- La ocurrencia del evento extremo de máximas crecidas, se define por origen natural, es decir, por lluvias que generan escorrentía, y de origen antrópico, específicamente por falla de la presa Rumicancha, ocasionando desbordamiento de río e inundación. Los sucesos provocaran efectos negativos en diferentes aspectos, causando impactos considerables en el área de zona aguas abajo de la presa Rumicancha.
- La caracterización de la amenaza y la vulnerabilidad física permitieron establecer los indicadores y factores pertinentes en todo el análisis del riesgo para determinar que existen sectores con media, baja vulnerabilidad a los eventos de máximas crecidas en el área de zona aguas abajo de la presa Rumicancha.
- Se zonifica la amenaza, la vulnerabilidad física y el nivel de riesgo de la zona de interés a la “máximas crecidas” en un mapa indicando los diferentes niveles respecto a los sectores vulnerables e impacto.
- El nivel riesgo asociado a las máximas crecidas en el sector aguas abajo de la presa Rumicancha predomina el nivel “Medio”, para cada escenario definido.
- Se identifica y propone medidas de acción inmediata y a largo plazo (estructural y no estructural) para la reducción del riesgo a eventos de máximas crecidas desde una perspectiva correctiva, preventiva y de mitigación, mismas que se podrán implementar de forma estratégica en los planes de gestión departamental y municipal.
- La hipótesis que se planteó inicialmente; que, aplicando criterios técnicos de análisis de riesgo y base teóricas de ingeniería, permitirá estimar y representar adecuadamente el nivel de riesgo por máximas crecidas en el sector aguas abajo de la presa Rumicancha, y luego de hacer todo el análisis en campo y gabinete usando la metodología en base de estos criterios y bases teóricas, se estimó efectivamente el nivel de riesgo por máximas crecidas, confirmando así que la hipótesis se cumple.
- La metodología simplificada que se adopta en el presente trabajo fin de grado, proporciona una opción para determinar, identificar y mostrar los niveles de peligro, vulnerabilidad física, y riesgo.

- Se tiene como base este trabajo, se puede utilizar la metodología presentada para hacer análisis de riesgos, de otras zonas como ríos, quebradas, etc., de nuestra región y país para estimar los niveles de riesgo y las posibles áreas inundables por crecidas.
- Con el uso de los sistemas de información geográfica se puede llevar un control de la base de datos ingresados los cuales se pueden actualizar cada cierto periodo y tener información actual.

Recomendaciones:

- Para realizar un mejor manejo de datos se debe realizar un buen trabajo topográfico puesto que esto es determinante en los resultados.
- Capacitar a las autoridades y técnicos que manejan las Unidades de riesgo y atención de desastres, priorizando en la instauración de una unidad específica que maneje la “Gestión del Riesgo” desde una perspectiva preventiva y de mitigación con referencia al riesgo que provocan los eventos de máximas crecidas en esta zona.
- Las entidades públicas como la alcaldía de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija y de la provincia Méndez, San Lorenzo, Gobernación departamental y estado nacional, tomar en cuenta los resultados de este trabajo fin de grado para el tema de riesgos y ordenamiento territorial mediante un plan regulador ya que facultaría a esta zona de una herramienta de análisis integral que establece un orden para el crecimiento de los diferentes proyectos que puedan aparecer en el tiempo.
- A las entidades competentes aumentar el número de estaciones pluviométricas en las cuencas susceptibles a crecidas con posible riesgo ya sea alto o bajo, para disponer con resultados más reales.
- Tener en cuenta que al hacer uso de herramientas SIG como el ArcGIS y el programa HEC-RAS se debe contar con una computadora con características que puedan soportar dichos aplicativos.