



## **Modelamiento del riesgo de inundación por la ocurrencia de descargas máximas del río Santa, sector Challhua, Huaraz-Ancash**

### **Flood risk modeling due to the occurrence of maximum discharges from the Santa river, Challhua sector, Huaraz-Ancash**

TITO TINOCO M.<sup>1</sup>

#### **RESUMEN**

El objetivo es identificar las zonas expuestas a riesgo por inundación asociada a las ocurrencias de descargas máximas del río Santa en el sector Challhua, Huaraz. Mediante el método probabilístico de Gumbel, se determinó el caudal base y los caudales máximos en la zona de estudio para diferentes períodos de retorno (5, 10, 50, 100 y 200 años). Además, se determinaron los niveles de agua y las áreas de inundación a través de los programas HecRAS y HecGeoRAS, cuyos resultados oscilaron entre 371,49 m<sup>2</sup> para el caudal base y 1927,08 m<sup>2</sup> para un periodo de retorno de 200 años. Además, se determinaron que 91 viviendas y 18 módulos de mercado presentan vulnerabilidad muy alta, 91 viviendas y 20 módulos de mercado vulnerabilidad alta, 94 viviendas vulnerabilidad media y 91 viviendas vulnerabilidad baja. La superposición de las áreas de inundación y el mapa de vulnerabilidad determinó el riesgo, encontrándose que el 8,2 % de viviendas y el 47,4 % de módulos de mercado están en riesgo muy alto, el 41,4 % de viviendas, el 52,6 % de módulos de mercado y el 100 % de infraestructura deportiva están en riesgo alto, mientras que el 25,6 % de viviendas se encuentran en riesgo medio y el 24,8 % de viviendas en riesgo bajo.

<sup>1</sup>Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4,0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

*Tito Tinoco M.*

**Palabras clave:** inundación; caudal máximo; peligro; vulnerabilidad; riesgo.

## **ABSTRACT**

The objective is to identify the areas exposed to risk by flood due to the occurrence of maximum discharges of river Santa in the sector of Challhua, Huaraz. Through the probabilistic method of Gumbel, it was determined the base flow and the maximum flow of the studied area for different return periods (5, 10, 50, 100 y 200 years). Besides, the levels of water and the flood areas were determined through the programs HecRAS and HecGeoRAS, whose results ranged between 371,49 square meters for the base flow and 1927,08 square meters for a return period of 200 years. In addition, it was determined that 91 houses and 18 market modules present very high vulnerability, 91 houses and 20 market modules high vulnerability, 94 houses medium vulnerability and 91 houses low vulnerability. The overlap of the flood areas and the vulnerability map determined the risk, finding that the 8,2 % of houses and the 47,4 % of market modules are in very high risk, the 41,1 % of houses, the 52,6 % of market modules and the 100 % of sportif infrastructure are in high risk, while the 25,6 % of houses are in medium risk and the 24,8 % of houses in low risk.

**Keywords:** flood; maximum flow; danger; vulnerability; risk.

## **INTRODUCCIÓN**

Yamin, Ghesquiere, Cardona y Ordaz (2013) consideran la incorporación del modelo probabilístico para la gestión de riesgos de desastres, es decir, analizar el riesgo desde un punto de vista técnico y científico, considerando las herramientas tecnológicas actuales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como plataforma de análisis y toma de decisiones para la cuantificación del riesgo. Es frecuente observar que la mayoría de los países, como es el caso del Perú, destina grandes cantidades de recursos para afrontar las emergencias, muchos de ellos no se materializan, por falta de planificación y políticas adecuadas.

El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo Cuba (PNUD Cuba, 2015) establece una metodología para la realización de estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres de inundación por intensas lluvias. Plantea determinar la inundación por intensas lluvias para di-

ferentes períodos de retorno, elaborar el mapa de peligros, identificar los elementos expuestos, calcular la vulnerabilidad y estimar el riesgo utilizando los SIG.

Jiménez (2013) utiliza la tecnología SIG para el análisis y desarrollo metodológico de riesgos ocasionados por fenómenos naturales para el cantón Mejía, provincia de Pichincha, Ecuador. Destaca la importancia de los SIG en el análisis de riesgos y la utilización de diferentes formatos como: fotografías aéreas, mapas digitalizados, imágenes de satélite y productos georreferenciados para la elaboración de distintos mapas temáticos.

Hernández, Barrios y Ramírez (2017), realizan un análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac, ubicada en Jalisco México, donde se evidencia problemas de inundación por el desbordamiento del río originando graves problemas. La metodología comprende la modelación numérica y determinación de daños, así mismo, el estudio de la vulnerabilidad social, económico, físico y ambiental. Los resultados obtenidos muestran las zonas de riesgo para 50 y 100 años de periodo de retorno y de alta vulnerabilidad en el río Atemajac.

Según Romo (2015), el HecRAS y el HecGeoRAS son extensiones compatibles con el ArcGIS 10.x, que procesan datos geoespaciales para el modelamiento de inundaciones y la determinación de las áreas de riesgo.

Ochoa et al. (2016) realizaron un estudio de modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctlamochita utilizando los programas HecRAS (análisis unidimensional) e IBER (análisis bidimensional). Los resultados obtenidos muestran que ambos programas proporcionan resultados satisfactorios.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2008), manifiesta que las amenazas de origen hidrometeorológico son peligros naturales y en el Perú es usual la ocurrencia de lluvias, granizadas, sequías, desbordes e inundaciones, siendo estos últimos los que originan más del 40 % de víctimas de los desastres naturales.

En el año 2003, el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2003) presenta un estudio de

*Tito Tinoco M.*

evaluación de peligros y vulnerabilidades, identificando diferentes sectores críticos en la ciudad de Huaraz. La metodología empleada permite la identificación y evaluación de los peligros (mapa de peligros), evaluación de la vulnerabilidad (mapa de vulnerabilidad), estimación del riesgo (mapa de riesgos) y la formulación del plan de prevención.

En la zona urbana de la ciudad Huaraz, se ha identificado el peligro de erosión fluvial en ambos márgenes del río Santa y en la quebrada denominada río Seco, donde se observan restos de detritos pluviales y colmatación del cauce, que ponen en peligro a aquellas viviendas construidas en sus márgenes. Como medidas de prevención se plantea la construcción de gaviones, la reubicación de las viviendas y limpieza del cauce de la quebrada, tal como lo manifiesta el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET, 2007).

INDECI (2003), indica que el peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o producido por el hombre, de una determinada magnitud, que incide en un área conocida, afectando a la población, infraestructura y el medio ambiente. Así mismo, considera que la vulnerabilidad es la probabilidad de afectación debido a la exposición de un conjunto de elementos (viviendas, infraestructura, suelos, etc.) frente a la ocurrencia de un peligro. Por otro lado, el riesgo es la probabilidad de estimación de las pérdidas y daños esperados frente a la materialización de un peligro.

El sector Challhua ubicado en la margen derecha aguas abajo del río Santa, es uno de los asentamientos humanos más importantes de la ciudad de Huaraz, debido a que en ella se encuentra el principal centro de abastos de productos de primera necesidad donde diariamente la población de Huaraz y del ámbito del Callejón de Huaylas expenden sus productos generándose un intercambio económico grande, que representa una de las actividades principales de la ciudad de Huaraz. Por otro lado, también se tienen infraestructuras deportivas, 300 viviendas y 30 módulos aproximadamente, 1500 pobladores aproximadamente, calles pavimentadas, veredas, etc. que podrían verse afectadas ante una probable inundación.

El presente trabajo permitirá identificar las zonas de riesgo de inundación en el sector Challhua mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica. Esto a su vez, permitirá el

modelamiento del peligro de inundación por descargas máximas y la caracterización de la vulnerabilidad de las viviendas y la infraestructura social y económica ubicada en la zona de estudio.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación es descriptiva y no experimental. Así mismo, es transversal, porque el análisis de la inundación y la vulnerabilidad se realizaron en un determinado momento. El área de estudio se encuentra ubicada en el sector Challhua, al oeste de la zona urbana de la ciudad de Huaraz, distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, región Ancash-Perú. El tramo de evaluación del río Santa comprende el río seco (aguas arriba) y las proximidades del puente Calicanto (aguas abajo).

Para la determinación del nivel de peligros se ha tenido en cuenta las metodologías planteadas por el INDECI (2011) y el PNUD Cuba (2015), que consideran el cálculo del caudal máximo para diferentes períodos de retorno. Para la caracterización del nivel de vulnerabilidad se ha considerado la metodología planteada por el INDECI (2011), como es el caso de la vulnerabilidad física, siendo la más consistente en este tipo de análisis. La metodología planteada en la presente investigación consideró la aplicación de dos programas muy conocidos en el ámbito del modelamiento de inundaciones, HecRAS y HecGeoRAS.

Para realizar el modelamiento hidráulico fue indispensable el cálculo del caudal máximo a diferentes períodos de retorno 5, 10, 50, 100 y 200 años, los cuales fueron determinados en función a las ecuaciones obtenidas en el modelamiento hidrológico. Así mismo, se realizó un levantamiento topográfico de la zona de estudio para el pre procesamiento y establecimiento de la geometría del cauce del río. Por otro lado, se caracterizó el cauce del río para la determinación visual del coeficiente de rugosidad. Para la determinación de las zonas de riesgo se realizó el análisis de vulnerabilidad de las viviendas ubicadas en ambas márgenes del río Santa, sector Challhua. Finalmente, las zonas de riesgo de inundación fueron determinadas teniendo en cuenta el mapa de las áreas de inundación y el mapa de vulnerabilidad, tal como manifiesta INDECI (2011).

## RESULTADOS

### Modelamiento hidrológico

Se determinaron los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa teniendo en cuenta la ubicación de las 15 estaciones hidrométricas (figura 1), que permitieron la obtención de la ecuación del caudal máximo para la cuenca del río Santa utilizando el modelo Gumbel. Así mismo, se utilizó la regresión múltiple de tres parámetros en función del área de la cuenca de aporte, pendiente del cauce principal, tiempo de concentración y el tiempo de retorno que permitió obtener la ecuación (1). Teniendo en cuenta los tres parámetros para la zona de estudio y la ecuación (1) se determinaron los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 75, 100 y 200 años (tabla 1), cuyos datos fueron utilizados para el modelamiento hidrológico.

$$Q_{maxTr} = (0,9276Tr^{0,1538}S^{-0,0184}Tc^{0,0694})(0,4093A^{0,6594}S^{-0,0287}Tc^{0,5385}) \quad (I)$$

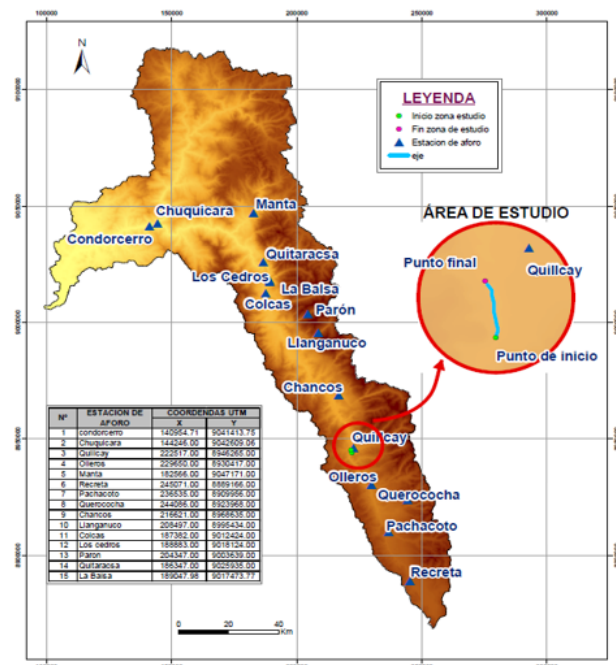


Figura 1. Cuenca del río Santa y estaciones de aforo

Tabla 1. Caudales máximos en el sector Challhua

Tiempo de retorno (años)	5	10	25	50	75	100	200
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	319,28	355,20	408,96	454,96	484,24	506,14	563,08

### Modelamiento hidráulico

El modelamiento hidráulico comprendió la ejecución de tres fases: el pre proceso con el HecGeoRAS, el modelamiento con HecRAS y el post proceso con el HecGeoRAS, para lo cual fue necesario la determinación del coeficiente de rugosidad, las condiciones de contorno y la introducción de los caudales máximos para diferentes períodos de tiempo. Así mismo, del modelamiento hidráulico se obtuvieron los niveles de agua para los diferentes periodos de retomo (figura 2), en el entorno del programa HecRAS y, las áreas de inundación se visualizaron en el entorno del programa ArcGIS utilizando la herramienta HecGeoRAS, tal como se observa en la figura 3.

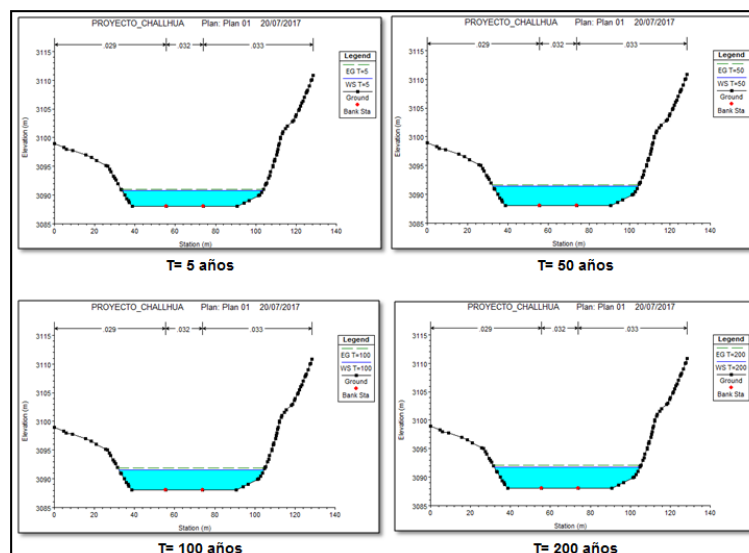


Figura 2. Niveles de agua, perfil transversal Km: 0 + 100

### Análisis de la vulnerabilidad física

Para determinar la vulnerabilidad física se aplicó la ficha de encuesta a 367 viviendas y 38 módulos del mercado popular del sector Challhua, de los cuales 91 viviendas se encuentran en vul-

nerabilidad baja, 94 viviendas en vulnerabilidad media, 91 viviendas, 20 módulos de mercado y 2 instalaciones deportivas en vulnerabilidad alta y, 91 viviendas y 18 módulos de mercado en vulnerabilidad muy alta, tal como se observa en la figura 4.

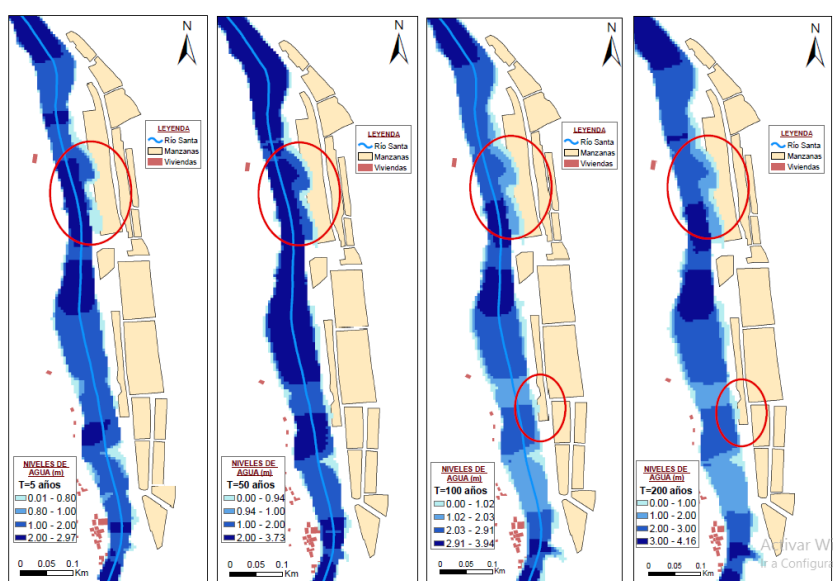


Figura 3. Áreas de inundación, diferentes períodos de retorno (5, 50, 100 y 200 años)

### Riesgo de inundación

El riesgo de inundación para los diferentes períodos de retorno fue obtenido mediante la superposición de las áreas de inundación de la figura 3 con los niveles de vulnerabilidad de la figura 4. En la tabla 2 se muestra la cantidad y porcentaje de viviendas e infraestructura en los diferentes niveles de riesgo en el sector Challhua. En la figura 5 se observa los niveles de riesgo en el sector

Tabla 2. Cantidad y porcentaje de viviendas en los diferentes niveles de riesgo

Infraestructura	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto
Viviendas	91(24,8 %)	94(25,6 %)	152(41,4 %)	30(8,2 %)
Módulos de mercado			20(52,6 %)	18(47,4 %)
Instalación deportiva			2(100,0 %)	

Challhua debido a la ocurrencia de los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno (5, 50, 100 y 200 años).



*Modelamiento del riesgo de inundación por la ocurrencia de descargas máximas del río Santa, sector Challhua, Huaraz-Ancash*

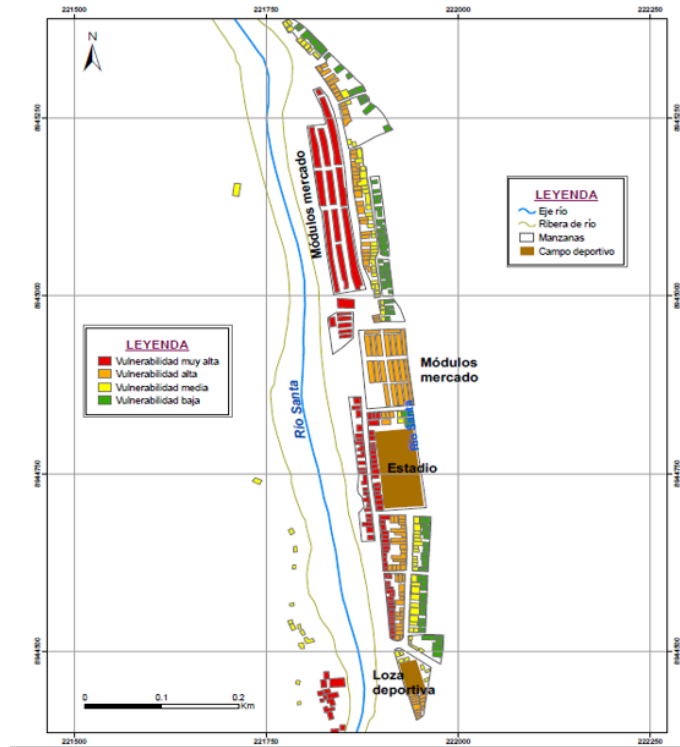


Figura 4. Niveles de vulnerabilidad en el sector Challhua

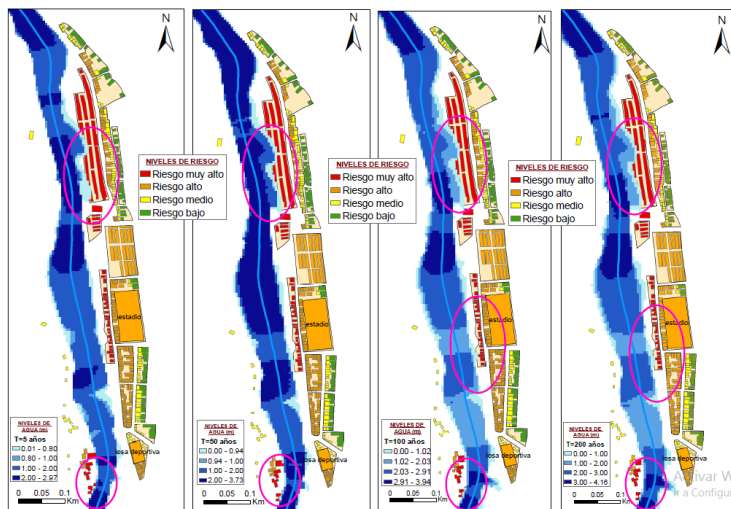


Figura 5. Niveles de riesgo en el sector Challhua

## **DISCUSIÓN**

Para el modelamiento hidráulico se utilizó el programa HecRAS, que permitió determinar los niveles de agua en los perfiles transversales previamente establecidos para los diferentes periodos de retorno. Es importante destacar la diferencia que existe entre el nivel de agua máximo alcanzado entre el caudal base (2,35m) y el periodo de retorno de 200 años (4,16m) con una variación de 1,81m. Por otro lado, las áreas de inundación fueron procesadas en el ArcGIS utilizando las herramientas del HecGeoRAS, cuyos resultados muestran un incremento del área de inundación de 418,74 % al realizar la comparación entre el caudal base y el caudal para el periodo de retorno de 200 años. Este índice muestra un incremento considerable de las áreas de inundación y más aún, teniendo en cuenta el estudio de microzonificación sísmica del INDECI (2003) el sector de Challhua presenta las condiciones más desfavorables, con material de rellenos poco consolidados (figura 6) y capacidad portante baja, lo cual podría ocasionar mayores inundaciones, como el que se muestra en la figura 7.



Figura 6. Suelos de relleno en el sector Challhua del río Santa

La figura 7 muestra el momento crítico de inundación en el sector Challhua, ocurrido en la crecida del caudal en el mes de marzo del 2017 a raíz de la presencia del fenómeno Niño costero que azotó esta parte del Perú.

Para la determinación de la vulnerabilidad física en el sector Challhua, se analizó el material de

construcción, localización de las viviendas, tipo de suelo, estado de conservación, antigüedad y la percepción de la población frente a los diferentes instrumentos de gestión. El resultado muestra que 91 viviendas y 18 módulos de mercado presentan una vulnerabilidad muy alta, 91 viviendas, 20 módulos de mercado y 2 infraestructuras deportivas se encuentran en una vulnerabilidad alta, 94 viviendas tienen una vulnerabilidad media y 91 viviendas se encuentran en una vulnerabilidad baja; entendiéndose que el 100 % de los módulos de mercado, la mayoría de las viviendas y el 100 % de las infraestructuras deportivas se encuentran entre la vulnerabilidad muy alta y alta.



Figura 7. Áreas de inundación en el río Santa sector Challhua

La metodología planteada en la presente investigación consideró como herramienta central de análisis los SIG, tal como manifiesta Jiménez (2013) permitiendo la geoespacialización del peligro de inundación, el análisis de la vulnerabilidad y la elaboración del mapa de riesgo por inundación, según manifiesta INDECI (2011). Por otro lado, los SIG permitieron la minimización del tiempo para la elaboración y análisis del mapa de riesgo, cuyos resultados servirán para la toma de decisiones. Sin embargo, la carencia de información como los datos hidrométricos para la zona de estudio, la topografía y el estudio detallado de suelos imposibilitan realizar los cálculos con mayor precisión.

El análisis conjunto del peligro de inundación y la vulnerabilidad física del sector Challhua per-

*Tito Tinoco M.*

mitió la localización de los diversos elementos expuestos en los diferentes niveles de riesgo. Se encontraron que el 8,2 % de las viviendas y el 47,4 % de módulos de mercado se encuentran en un riesgo muy alto, los cuales se encuentran ubicadas en las riberas del río Santa, en el margen derecho. También, el 41,4 % de las viviendas, el 52,6 % y el 100 % de los módulos de mercado se encuentran en riesgo alto, el 25,6 % de las viviendas en riesgo medio y el 24,8 % en riesgo bajo.

## **CONCLUSIONES**

El modelamiento hidrológico permitió establecer una ecuación regionalizada para el cálculo del caudal máximo en cualquier punto de la cuenca del río Santa, a través del ingreso de los parámetros como tiempo de retorno, área de aporte, pendiente del cauce principal y el tiempo de concentración. En nuestro caso, se calculó el caudal máximo para diferentes tiempos de retorno 5, 10, 25, 50, 75, 100 y 200 años.

El modelamiento hidráulico permitió determinar los niveles de agua en las secciones transversales para diferentes periodos de retorno. La diferencia que existe entre el nivel de agua máximo alcanzado entre el caudal base (2,35m) y el periodo de retorno de 200 años (4,16m) es de 1,81m. Por otro lado, las áreas de inundación muestran un incremento de 418,74 % al realizar la comparación entre el caudal base y el caudal para el periodo de retorno de 200 años, las cuales se encuentran ubicadas en la margen derecha del río Santa.

Para la determinación de la vulnerabilidad física se tuvo en cuenta el material de construcción, localización de las viviendas, tipo de suelo, estado de conservación, antigüedad y la percepción de la población del sector Challhua frente a los diferentes instrumentos de gestión. El resultado muestra que 91 viviendas y 18 módulos de mercado presentan una vulnerabilidad muy alta, 91 viviendas, 20 módulos de mercado y 2 infraestructuras deportivas se encuentran en una vulnerabilidad alta, 94 viviendas tienen una vulnerabilidad media y 91 viviendas se encuentran en una vulnerabilidad baja; entendiéndose que el 100 % de los módulos de mercado, la mayoría de las viviendas y el 100 % de las infraestructuras deportivas se encuentran entre la vulnerabilidad muy alta y alta y afectan directamente el riesgo de inundación.

El análisis conjunto del peligro de inundación y la vulnerabilidad física del sector Challhua per-

mitió la localización de los diversos elementos expuestos en los diferentes niveles de riesgo. Se encontraron que el 8,2 % de las viviendas y el 47,4 % de módulos de mercado se encuentran en un riesgo muy alto, los cuales se encuentran ubicadas en las riberas del río Santa, en el margen derecho. También, el 41,4 % de las viviendas, el 52,6 % y el 100 % de los módulos de mercado se encuentran en riesgo alto, el 25,6 % de las viviendas en riesgo medio y el 24,8 % en riesgo bajo.

Los resultados obtenidos en la presente investigación permitirán al gobierno local de Huaraz y a la población asentada en el sector Challhua, priorizar e implementar medidas estructurales y no estructurales, mediante la formulación de proyectos de inversión a fin de salvaguardar a la población de posibles daños ocasionados por la probable crecida del río Santa.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Hernández, Rubén; Barrios, Héctor y Ramírez, Aldo. 2017. «Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac». Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. <doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-01>.
- INDECI. 2003. Plan de prevención ante desastres: Usos del suelo y medidas de mitigación ciudad de Huaraz. Informe técnico, Instituto Nacional de Defensa Civil, Huaraz.
- INDECI. 2011. Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales. Lima-Perú.
- INGEMMET. 2007. «Zonas críticas por peligros geológicos y geohidrológicos en la región Ancash». <[http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/204416/05\\_R\\_ZONAS\\_CRITICAS\\_ANCASH.pdf](http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/204416/05_R_ZONAS_CRITICAS_ANCASH.pdf)>. [Consulta: 05 – 03 – 2017]
- Jiménez, Daniela. 2013. Tecnología SIG en apoyo al análisis y desarrollo metodológico de riesgos ocasionados por fenómenos naturales para el cantón Mejía, Provincia de Pichincha, Ecuador. Quito.
- Ochoa, Santiago; Reyna, Teresa; Ryena, Santiago; García, Marcelo; Labaque, María y Díaz, José. 2016. «Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba.» Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

*Tito Tinoco M.*

PNUD Cuba. 2015. «Metodologías para la determinación de riesgos de desastres a nivel territorial». <[https://issuu.com/cprundprslac/docs/libro\\_metodologia\\_riesgo\\_ama](https://issuu.com/cprundprslac/docs/libro_metodologia_riesgo_ama)>. [Consulta: 12 – 10 – 2016].

Romo, Patricia. 2015. Estimación del riesgo por inundación en la ribera del río Mulato (Mocoa Colombia). Mocoa.

SENAMHI. 2008. «Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú». 7. <<http://www.senamhi.gob.pe/?p=1001>>. [Consulta: 05 – 03 – 2017].

Yamin, Luis; Ghesquiere, Francis; Cardona, Omar y Ordaz, Mario. 2013. «Modelación probabilística para la gestión de riesgo de desastre. El caso de Bogotá Colombia». <[https://www.gfdrr.org/sites/gfdrr/files/publication/modelacionprobabilistaparalagestiondelriesgodedesastre\\_elcasodebogotacolombia\\_reduced.pdf](https://www.gfdrr.org/sites/gfdrr/files/publication/modelacionprobabilistaparalagestiondelriesgodedesastre_elcasodebogotacolombia_reduced.pdf)>. [Consulta: 20 – 11 – 2016].

Fecha de recepción: 05/08/2019

Fecha de aceptación: 18/10/2019

### **Correspondencia**

Tito Tinoco Meyhuay

ttinoco2409@hotmail.com