



Cuenca del río Casma. Áncash

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO-HISTÓRICO DEL VALLE DE SAN RAFAEL – CUENCA DEL RÍO CASMA, PERÚ

César Abad Pérez

RESUMEN

El río Casma es un río de régimen torrencial que presenta un patrón trezado en constante evolución, vinculado principalmente por crecidas relacionadas con el Fenómeno El Niño (FEN). Entre los años 1966 y 2017 se produjeron varias inundaciones que han modificado su cauce; sin embargo, las modificaciones más significativas están relacionadas con la canalización del río a partir del año 2011.

Existe una fuerte presión por la ampliación agrícola, lo que ha dado como resultado la reducción de la superficie de bosques, así como la ocupación agrícola dentro de la denominada faja marginal del río. Se requiere mejorar la gestión de la zona de la ribera, con la finalidad de su restauración ecológica y su tratamiento integral.

PALABRAS CLAVE: *geomorfología fluvial, inundaciones, método geomorfológico-histórico, estudio evolutivo.*

DATOS DEL AUTOR

Geógrafo con más de 15 años de experiencia en instituciones nacionales e internacionales en gestión territorial, gestión estratégica de los recursos naturales, gestión de riesgos y geotecnologías. Actualmente es candidato a Doctor en Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental por la Universidad de Barcelona.

cesarabadperez@gmail.com

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ABSTRACT

The Casma River is a torrential river that presents a braided pattern in constant evolution, mainly related to floods of the El Niño oscillation. Between 1966 and 2017 several floods have modified the channel; however, the most significant modifications are related to the channeling of the river as of 2011.

There is strong pressure for agricultural expansion, which has resulted in the reduction of forest area, as well as agricultural occupation within the so-called marginal strip of the river. It is necessary to improve the management of the riverbank area, with the aim of its ecological restoration.

KEYWORDS: *fluvial geomorphology, floods, historical-geomorphological method, evolutionary study.*

© This article is of open access to the public and subject to the Creative Commons Attribution Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. The commercial use of this original work and the production of derived works from this article is not allowed. For more information, please visit: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

INTRODUCCIÓN

EL FENÓMENO EL NIÑO Y LAS INUNDACIONES EN EL NORTE DEL PERÚ

Las inundaciones en el Perú ocurren entre los meses de noviembre y abril. Estos meses que coinciden con el incremento de las precipitaciones que pueden generar el incremento del caudal de los ríos y producir inundaciones. Las mayores pérdidas humanas y materiales por inundaciones ocurren en la costa del Perú (Ojeda Couchoud, Sovero Sovero, Vargas, Pacha Vicente, & Pernas Canadell, 2015) y, en su mayoría, están relacionadas con el Fenómeno El Niño (FEN). Esto ocurre porque en la costa peruana se concentran grandes ciudades e infraestructuras, lo que incrementa la vulnerabilidad frente a este fenómeno.

El Fenómeno El Niño es una “fluctuación climática que ocurre en el Océano Pacífico con una periodicidad de 2 a 7 años” (Dewitte et al., 2014) que genera un incremento en la temperatura superficial del agua de mar, y constituye “la mayor perturbación natural en el sistema climático global” (Apéstegui, Macharé, Takahashi, Sifeddine, & Ortieb, 2015). Esta variabilidad climática tiene una fase cálida y una fase fría. Durante la fase cálida la atmósfera tropical se calienta y humedece generando intensas precipitaciones en la costa oeste de Sudamérica (SENAMHI, 2014). Los efectos climáticos son diferenciados a nivel global. En el caso del Perú, las condiciones climáticas afectan a la agricultura y la pesca, mientras que las inundaciones y flujos de detritos afectan a muchas zonas urbanas y rurales.

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2014), la **Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica** (NOAA en inglés) utiliza el Índice Niño Oceánico (ONI en inglés)¹ para identificar los fenómenos de El Niño y La Niña y clasificarlos por su magnitud. Algunos de los eventos de mayor magnitud (de intensidad fuerte a extraordinario) durante el siglo XX ocurrieron el año 1925, 1982-1983, 1997-1998, y en el siglo XXI en el año 2017.

Según SENAMHI, durante el FEN del año 1982-1983 se produjo un incremento de temperaturas y precipitaciones. En la costa norte del Perú se presentaron precipitaciones anómalas de 3000 mm, mientras que la sierra sur debía lidiar con la sequía. Esto generó daños estimados en US\$ 3283 millones.

En el FEN 1997-1998 ocurrieron pérdidas de US\$ 3,500 millones. En el año 2017, las pérdidas estimadas se calculaban entre US\$ 6,000 y US\$ 9,000 millones (French & Mechler, 2017). A pesar de que el número de muertos ha disminuido significativamente en el último FEN con respecto al del año 1982-1983, el número de afectados y de infraestructura dañada es importante (los autores se basaron en información de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Banco de Desarrollo de América Latina y el Instituto de Defensa Civil). Casi se ha triplicado la longitud de vías afectadas entre el primer y el último FEN (2600 km en 1982-1983 y 6,614 km en el 2017), también se ha elevado el número de viviendas afectadas (111,000 en 1982-1983 y 242,433 en el 2017), colegios y centros de salud. Esto demuestra que no se está planificando adecuadamente el uso del territorio, pues se ocupa sin tener en cuenta la realidad morfodinámica.

¹ “Este índice se calcula promediando 3 meses consecutivos la serie mensual de las anomalías de la temperatura superficial del mar medidas en el Pacífico tropical en la Región El Niño 3.4” (SENAMHI, 2014).

El Fenómeno El Niño plantea retos muy importantes para la gestión del territorio, ya que es parte importante de la dinámica natural. Por ello, es necesario conocer su dinámica y los eventos asociados, para una adecuada gestión del riesgo. Según diversas fuentes analizadas por el SENAMHI (2014), solo en los últimos cinco siglos han ocurrido al menos 120 FEN, y durante el siglo XX ocurrieron al menos 25 con diferentes intensidades.

LOS MÉTODOS PARA GENERAR INFORMACIÓN SOBRE PELIGROS Y LA NECESIDAD DE PLANTEARNOS ALTERNATIVAS METODOLÓGICAS

Entre los principales métodos para el análisis de inundaciones tenemos los hidrológicos e hidráulicos y el geomorfológico. Los métodos hidrológicos e hidráulicos se basan en técnicas estadísticas que procesan información hidroclimática. Se hacen cálculos con hidrogramas para asignar la probabilidad de ocurrencia de un evento. Pueden usarse métodos directos (a partir de aforos) o indirectos (que modelizan el comportamiento en base a cálculos matemáticos y físicos). El análisis de máximas avenidas se calcula con la ayuda de distribuciones de probabilidad (Apacla Nalvarte, 2010).

El método geomorfológico-histórico constituye un método geográfico que estudia el funcionamiento natural de los cursos de agua y analiza la estructura de las formas de origen fluvial que permiten identificar las inundaciones sucesivas (DIREN-PACA, 2007). Se realiza a partir de diversas fuentes de información espacial, tales como fotografías aéreas, imágenes de satélite, mapas topográficos, entre otros, así como el trabajo de campo. Su costo es relativamente bajo y permite cubrir grandes espacios, además se puede complementar con el uso de métodos hidrológicos e hidráulicos.

En la actualidad, las decisiones sobre la gestión de las planicies inundables se basan en gran parte en los métodos hidrológicos e hidráulicos que limitan el entendimiento integral de la dinámica fluvial y que muchas veces han llevado a implementar obras de protección que han alterado la dinámica natural de los ríos. Como sociedad, todavía no hemos logrado conocer la dinámica fluvial, pero hemos generado normas e instituciones que ocasionan sobrecostos al Estado y pérdidas importantes. Tal como afirman algunos expertos, "sin un buen conocimiento de la dinámica fluvial es muy difícil realizar un análisis y diagnóstico certero del estado de un río" (Ballarín Ferrer & Rodríguez Muñoz, 2013).

Si el costo de las pérdidas producidas por el Fenómeno El Niño se ha duplicado no es necesariamente por una mayor magnitud de las inundaciones y flujos de detritos, sino por una mayor artificialización del medio natural que no tiene en cuenta su dinámica. El modelo económico primario-exportador del Perú ha dado como resultado un crecimiento económico, pero también ha incrementado la ocupación de zonas de alto riesgo desconociendo la dinámica ambiental y su nivel de vulnerabilidad. La expresión "en las últimas décadas se ha maltratado a los ríos, aumentando su deterioro ambiental y sus riesgos" (Ballarín Ferrer & Rodríguez Muñoz, 2013) aplica perfectamente al Perú.

La restauración fluvial es fundamental como medida para lograr un sistema fluvial que sea lo más parecido a las condiciones naturales. Esto implica combinar métodos de evaluación y justifica el enfoque histórico-geomorfológico como complemento a los métodos hidrológicos e hidráulicos convencionales, pero obliga también a un activo proceso de gestión territorial que tome como punto de partida la concientización de los involucrados para lograr acuerdos y conseguir la mejor ocupación del suelo.

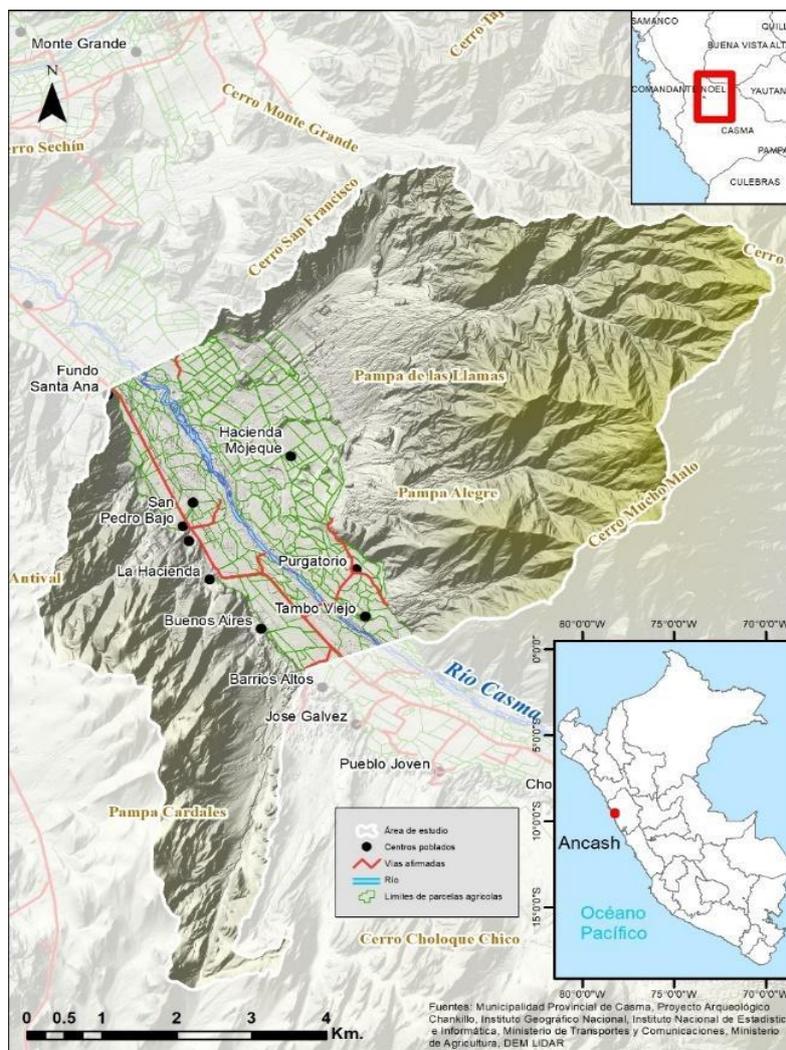
ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el departamento de Áncash, en la provincia de Casma y distrito del mismo nombre. La cuenca del río Casma se encuentra a más de 360 km de la ciudad de Lima y a 10 km de la ciudad de Casma, capital de provincia. Está ubicada aproximadamente a los 9° 26' de latitud sur y los 78° 12' de longitud oeste. El rango altitudinal se encuentra entre los 90 m.s.n.m. en la planicie fluvial, y aproximadamente a los 1,300 m.s.n.m. en el cerro Mucho Malo (Figura 1). El área de estudio cuenta con una superficie total de 5,154 hectáreas y comprende un tramo de aproximadamente 5 km del río.

La cuenca del río Casma es atravesada por este río, el mismo que forma un valle donde predomina la actividad agrícola. A este sector del valle se le denomina Valle de San Rafael. Los límites hacia el este y oeste están definidos por las divisorias de aguas de las cuencas torrenciales que se encuentran hacia ambas márgenes del río, mientras que hacia el norte se encuentra el Fundo Santa Ana, en el Valle, y hacia el sur el poblado Barrios Altos, en el mismo Valle.

FIGURA 1.

Mapa de ubicación del ámbito de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio presenta un clima predominantemente desértico. La estación meteorológica más cercana a esta área es la Estación Buena Vista que se encuentra a una altitud de 220 m.s.n.m. La precipitación media anual para la mayor parte del área de estudio es de 3.29 mm (INRENA, 2007b). Por este motivo, la actividad agrícola depende principalmente de las aguas provenientes de las partes altas y en menor medida de la explotación del acuífero. A pesar de tan bajas precipitaciones, en el mes de marzo del año 2017, con 8 horas de lluvia en la zona desértica, se activaron varias cuencas torrenciales, lo que evidencia que muchas formas de relieve que muestran signos de erosión hídrica revelan escorrentías pasadas que podrían reactivarse.

El ámbito de estudio forma parte de la cuenca del río Casma con sus nacientes en las alturas de la Cordillera Negra. La cuenca tiene una altitud máxima de 4,862 m.s.n.m. El tramo de estudio se encuentra en la zona media baja de la cuenca, y tiene una pendiente media de entre 0.6 % y 0.7 % (INRENA, 2007a). Aguas arriba del área de estudio hay un cambio importante de pendiente (entre 2.9 % a 0.7 %), lo que influye significativamente en la carga de sedimentos del río y permite que haya una alta descarga de sedimentos en la zona formándose el patrón trenzado del cauce.

El río Casma presenta un régimen irregular de carácter torrencioso, con marcadas diferencias entre sus caudales medios diarios, que varía entre un máximo de 320 m³/seg y un mínimo de 0.0 m³/seg. La media anual en la estación Puente Carretera (4 kilómetros aguas abajo del área de estudio) es de 5.4 m³/seg, equivalente a un volumen medio anual de 170,310,000 m³ y en la estación de Pactao (20 kilómetros aguas arriba del área de estudio) es de 7.33 m³/seg.

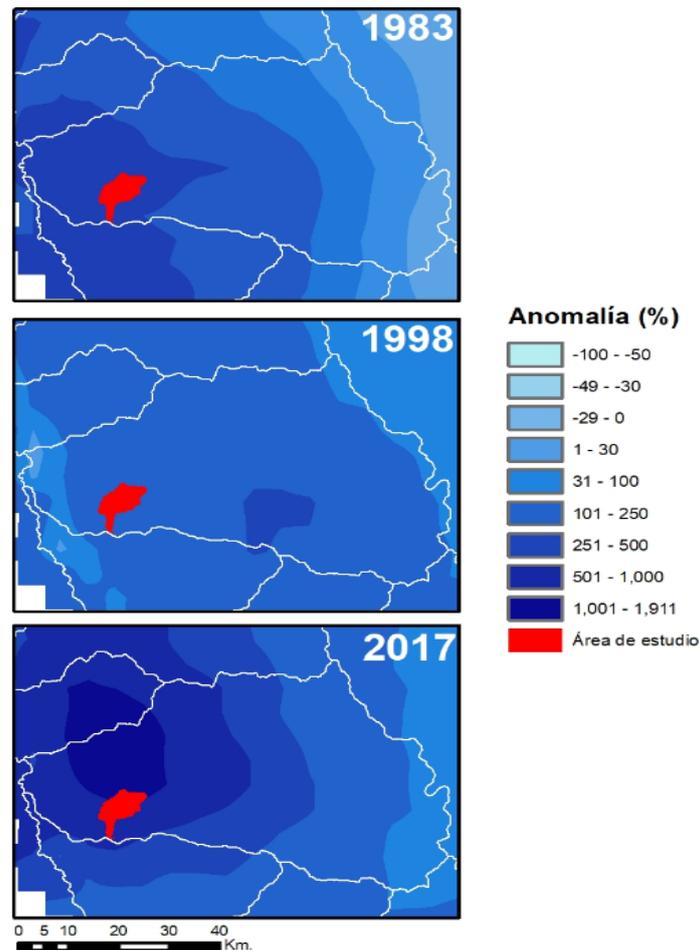
El Fenómeno El Niño (FEN) es la principal anomalía climática recurrente que genera una gran afectación en el área, principalmente, por la ocurrencia de inundaciones y flujos de detritos. En ese sentido, hay registros instrumentales realizados entre 1960 y 1999 que aportan información importante. Este es el caso del FEN ocurrido entre 1997-1998 que generó una descarga máxima de 410 m³/seg. Además, se han realizado cálculos de máximas avenidas para recopilar más datos. El Ministerio de Agricultura realizó el cálculo de caudales máximos en diferentes lapsos de tiempo. En un período de 25 años obtuvo 183.29 m³/seg, luego, la cifra se eleva a 242.1 m³/seg en un período de 50 años, crece a 245.48 m³/seg hacia los 100 años y aumenta notablemente a 364.88 m³/seg hacia los 200 años (Apacla Nalvarte, 2010).

En la Figura 2, se aprecia el cambio de patrón de distribución de las precipitaciones en la cuenca del río Casma durante la ocurrencia de diversos eventos del Fenómeno El Niño (límite en blanco). Esto es más evidente en la parte oeste que corresponde a la zona costera.

En los tres ciclos de ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) que se muestran en la Figura 2 hay incrementos de más del 100% correspondientes a períodos trimestrales. Las anomalías fueron más significativas durante las precipitaciones de los años 1983 y 2017. Además, hay un incremento de más del 500 % en 1983 y casi 2000 % en el 2017. Estas anomalías tienen una repercusión en el caudal del río Casma y también en la actividad de las cuencas torrenciales.

FIGURA 2.

Anomalías de precipitación durante ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) en los años 1982/1983, 1997/1998 y 2017.



Fuente: Elaboración propia en base al producto grillado PISCO. Aybar et al, 2017.

Geomorfológicamente, en el área de estudio existen formas de origen denudacional, aluvial y eólico (Figura 3). Esta área está comprendida por colinas bajas y medias, glaciares y abanicos aluviales y planicies fluviales con agricultura. En términos geodinámicos es importante considerar tres grandes agentes que influyen en la geodinámica: los vientos del anticiclón Pacífico Sur, las precipitaciones extraordinarias y la variabilidad del caudal del río Casma.

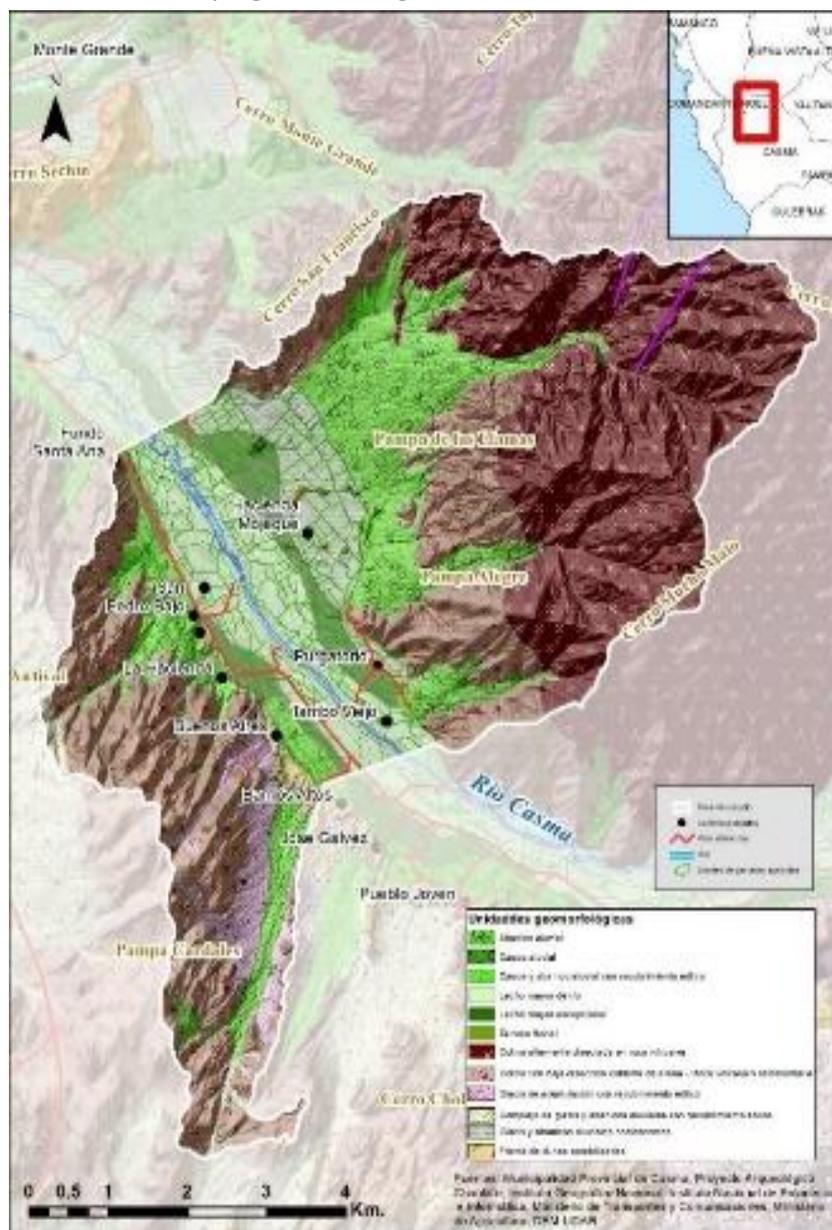
En el caso de los vientos del anticiclón del Pacífico Sur, hay que señalar que este actúa diariamente y tiene una influencia considerable en la actividad de las cuencas torrenciales de la margen izquierda. La arena acarreada desde las playas que se encuentran al suroeste del área de estudio se deposita en la margen izquierda formando grandes mantos de arena sobre las colinas. Estas influyen en el tiempo de infiltración de la lluvia en el suelo por lo que hay una relativa estabilidad en términos de la dinámica torrencial, pero alta en términos de la dinámica eólica.

Los glaciares y abanicos aluviales están recubiertos, en gran parte, por arena que es retenida por un bosque de algarrobos que no permite que exista migración de arena hacia el valle. Este bosque brinda un servicio ecosistémico fundamental, pues contribuye con la estabilización de las dunas que

forman parte de un corredor de dunas longitudinales y barjanas activas que se forman cerca a la playa Gramadal, ubicada a más de 30 km al suroeste del área de estudio. Estos algarrobales se desarrollan gracias al acuífero del río Casma.

La unidad de planicies fluviales con agricultura está influenciada en términos geodinámicos por la dinámica del río, cuyas crecidas están vinculadas por las precipitaciones en la parte media y alta de la cuenca. En el caso de las colinas altas y sus depósitos de piedemonte, su dinámica es más esporádica y está relacionada con las precipitaciones excepcionales relacionadas con el Fenómeno El Niño. A pesar de ser menos activas, sus procesos morfodinámicos pueden ser de gran magnitud y alto nivel de afectación, a pesar de su escasa ocupación.

FIGURA 3.
Mapa geomorfológico del área de estudio



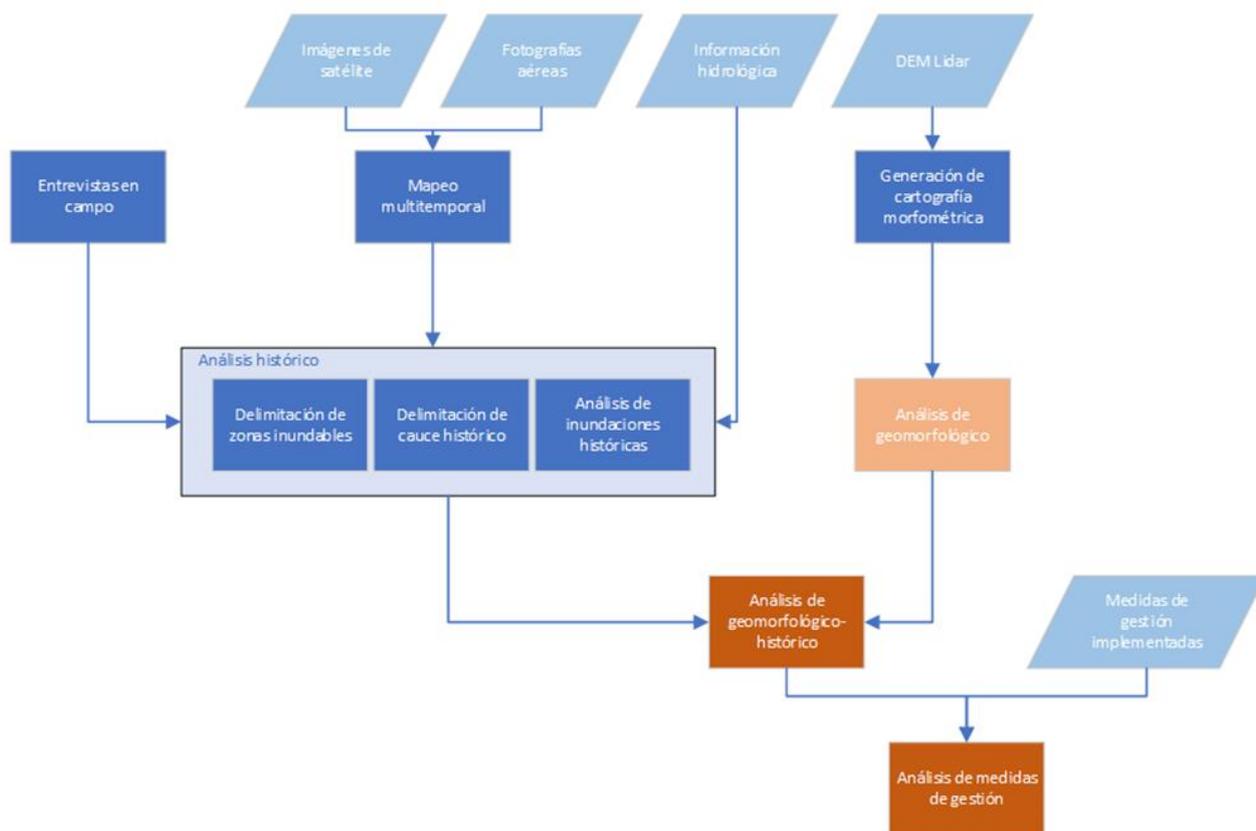
Fuente: Adaptación de información de la Municipalidad Provincial de Casma, 2017.

La principal actividad económica en el Valle de San Rafael es la agricultura destinada a la agroexportación (predomina el cultivo de mango y palta). La provincia de Casma cuenta con una población total de 42,368 habitantes (INEI 2017). Sin embargo, en el ámbito de estudio, la población es solo de 483 habitantes y es eminentemente rural (Municipalidad Provincial de Casma, 2017).

METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Para esta investigación se usó como referencia la metodología propuesta en la “Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables” (Martínez & Fernández, 2011). Por ello, se realizaron algunas modificaciones y adaptaciones en función a la información disponible y a otras propuestas metodológicas. También se realizó el análisis de las medidas de gestión implementadas para la mitigación del riesgo que luego fueron contrastadas con los resultados del análisis geomorfológico-histórico. En la Figura 4 se puede observar el proceso general de la metodología.

FIGURA 4.
Proceso metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

El estudio geomorfológico-histórico partió del estudio evolutivo del medio fluvial. Con este fin se realizó un análisis diacrónico de inundaciones con base en el análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes de satélite y tomando como referencia las series hidrométricas históricas.

Luego, se realizó un análisis geomorfológico en base a imágenes de satélite e índices morfométricos, así como también un análisis de usos del suelo. Esta cartografía fue verificada en campo, lugar en

donde se realizaron entrevistas, así como el llenado de fichas para registrar las evidencias de actividad geodinámica. Esto permitió hacer un análisis geomorfológico histórico y determinar peligros por inundación. También se registraron los resultados obtenidos con las medidas de gestión implementadas. Esto permitió evaluar su pertinencia y brindar algunas recomendaciones al respecto.

Las fotografías aéreas e imágenes de satélite fueron seleccionadas en función al registro de descargas máximas anuales (Tabla 2). También se dispone de un registro fotografías aéreas desde el año 1966 que fueron tomadas con sensores remotos, también hay imágenes de satélite que datan de 1972 hasta la fecha (Tabla 1) y que fueron procesadas para su posterior interpretación visual.

En el caso de las imágenes de satélite, hay información disponible de años anteriores y posteriores al evento. Para este fin también sirven como referencia las evidencias de sedimentación y disturbación interpretadas a partir de las imágenes de satélite. Por otro lado, con las fotografías aéreas se elaboró una ortofoto con la ayuda del software PCI Geomatica. Las imágenes de satélite fueron procesadas con el mismo software generando diferentes combinaciones de bandas para una posterior interpretación visual.

TABLA 1.

Fotografías aéreas e imágenes de satélite utilizadas en cada evento

MÁXIMA DESCARGA			SATÉLITE	SENSOR	FECHA
AÑO	MES	CAUDAL (m ³ /seg)			
2017	Marzo		Sentinel-2	MultiSpectral Instrument	25/03/2017
					5/03/2017
2006	Marzo		QuickBird		26/05/2007
					28/02/2006
1999	Febrero	90	Landsat 5	Thematic Mapper	18/12/1999
					8/01/1999
1998	Enero	410			10/03/1998
					3/02/1997
1996	Marzo	100			1/02/1996
1994	Febrero	80			5/07/1994
					7/11/1993
1993	Marzo	80			28/03/1993
					8/02/1993
1983	Marzo	80			Landsat 4
			Landsat 3	28/03/1979	
1979	Marzo	84.5		4/08/1975	
1972	Marzo	140			31/12/1972
1971	Febrero	105			
1970	Enero	120			
1961	Abril	135	Fotografías aéreas de 1966		

Nota. Esta tabla muestra el tipo de imagen que se utilizó en cada evento (el color verde destaca la fecha de cada evento). También se puede ver información de caudales del SENAMHI e información generada en el presente estudio.

Para el mapeo geomorfológico, además de los insumos mencionados se pudo disponer de una nube de puntos LiDAR levantada en el mes de marzo de 2017 por la empresa Horizons para el Proyecto Arqueológico Chankillo. Además de la interpretación visual de la información generada a partir del DEM LiDAR se produjo información morfométrica como pendientes y orientaciones.

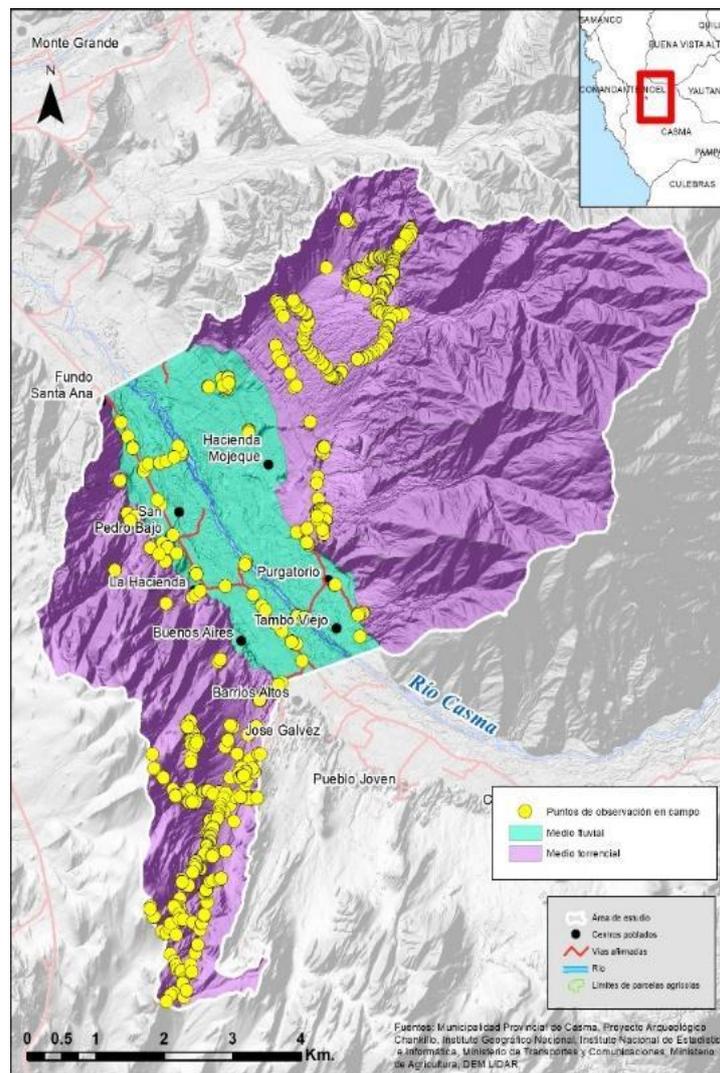
En base a la cartografía ejecutada en los pasos previos, se realizó el trabajo de campo que consistió en tres actividades principales:

- Entrevistas y mapeo participativo de inundaciones históricas.

- Identificación de evidencias geomorfológicas de inundaciones y flujos de detritos.
- Recopilación de información secundaria e instrumentos de gestión.

El trabajo de campo se realizó durante todo el mes de mayo del año 2018. En la Figura 5 se pueden observar las zonas recorridas que aparecen destacadas en color amarillo. Disponer de más de 500 puntos de observación permitió verificar las evidencias morfológicas de inundaciones y flujos de detritos, conjuntamente con la población local (Foto 1). La cantidad de puntos de observación posibilitó un levantamiento más exhaustivo, por tratarse de un estudio detallado, así como también descartar la influencia de la actividad torrencial de las quebradas aledañas en las inundaciones.

FIGURA 5.
Recorrido de campo



Fuente: Elaboración propia.

El mapeo participativo consistió en visitas de campo donde se realizaron entrevistas sobre los calados, afectación y la huella máxima de la inundación. En este lugar, también se realizó la delimitación de los diferentes eventos con el apoyo de imágenes de satélite impresas. Es importante

señalar que los testimonios sobre eventos anteriores a las inundaciones de los años 1982-1983 son casi inexistentes debido a que la población es predominantemente migrante y ocupa la zona desde mediados de la década de 1970.

FIGURA 6.

Visita de campo con agricultores en zona inundada del sector de San Rafael.



Fuente: Elaboración propia.

Para identificar evidencias de inundaciones y flujos de detritos se utilizaron fichas de campo. En el caso de las inundaciones se encontraron evidencias de márgenes erosionados, depósitos de inundaciones del 2017, así como evidencias de calados a partir de flotantes ligeros que aún se encuentran visibles (Figura 7, 8 y 9).

FIGURA 7.

Flotantes ligeros que indican el calado de la inundación del año 2017



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8.

Depósito de inundación del año 2017 donde se ha realizado actividad agrícola



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 9

Cultivos permanentes afectados por las inundaciones del año 2017



Fuente: Elaboración propia.

Toda la información generada previamente permitió delimitar el medio fluvial sobre la base de una cartografía geomorfológica existente, evidencias de terrazas, así como los límites de los conos aluviales. De esta forma, también fue posible precisar los límites de estos ámbitos para un mejor análisis de los procesos morfodinámicos que predominan en cada uno de ellos, así como delimitar las cuencas torrenciales.

Al contar con la evidencia de campo se realizaron ajustes a los mapas preliminares, y posteriormente se realizó el mapeo multitemporal de cauces históricos a través de la interpretación visual de las

imágenes de satélite y las fotografías aéreas. Debido a que la mayoría de las imágenes de satélite no coincidían con el año o mes de la inundación, no fue posible generar índices y transformaciones de las imágenes de satélite, excepto para el año 2017 en el que se obtuvieron imágenes Sentinel-2 del mismo mes de la inundación. En este caso se generó un índice de agua a través del método Gao (Baig et al., 2013), que consiste en un índice de diferencia normalizada entre la banda del infrarrojo cercano (IRC) y la banda infrarroja de onda corta.

Para el mapeo se realizó un análisis visual de cambios entre una fecha anterior al evento, y una fecha posterior. Esto puso en evidencia algunos elementos en la imagen como depósitos de sedimentos, cambios en la vegetación, etc. que permitieron interpretar la inundación en este contexto y complementar con información recogida en campo para obtener resultados con una buena aproximación.

Adicionalmente a la interpretación de las zonas inundadas, se realizó una interpretación más detallada en el cauce en condiciones naturales y en el cauce con modificaciones antrópicas de los años 1966 y 2017. La leyenda utilizada para interpretar cauces históricos fue la siguiente:

- Canal de aguas bajas
- Zona ribereña
- Zona con alta actividad fluvial
- Cauce antiguo no activo
- Llanura aluvial

También se realizó un análisis del uso de la tierra y de la presencia de bosques ribereños para conocer la influencia de estos en la dinámica fluvial. Los bosques fueron mapeados a partir de la interpretación visual de las imágenes de satélite y la ortofoto.

Según el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Martínez & Fernández, 2011), el análisis geomorfológico tiene como objetivo definir unidades inundables en relación con su diferencia de altura con el cauce basadas en evidencias de inundabilidad reciente, para luego plantear una correspondencia con el modelamiento hidráulico. Las observaciones geomorfológicas permitirán definir el dominio público hidráulico probable² y combinar el análisis geomorfológico con el análisis histórico.

El análisis geomorfológico se basó en evidencias de los cursos de agua efímeros y evidencias topográficas con información obtenida a partir del trabajo de campo, fuentes secundarias y análisis cartográfico. Una de las principales fuentes de información utilizadas para este análisis, aparte de la evidencia de campo, fue la información morfométrica que identifica elementos poco reconocibles en campo.

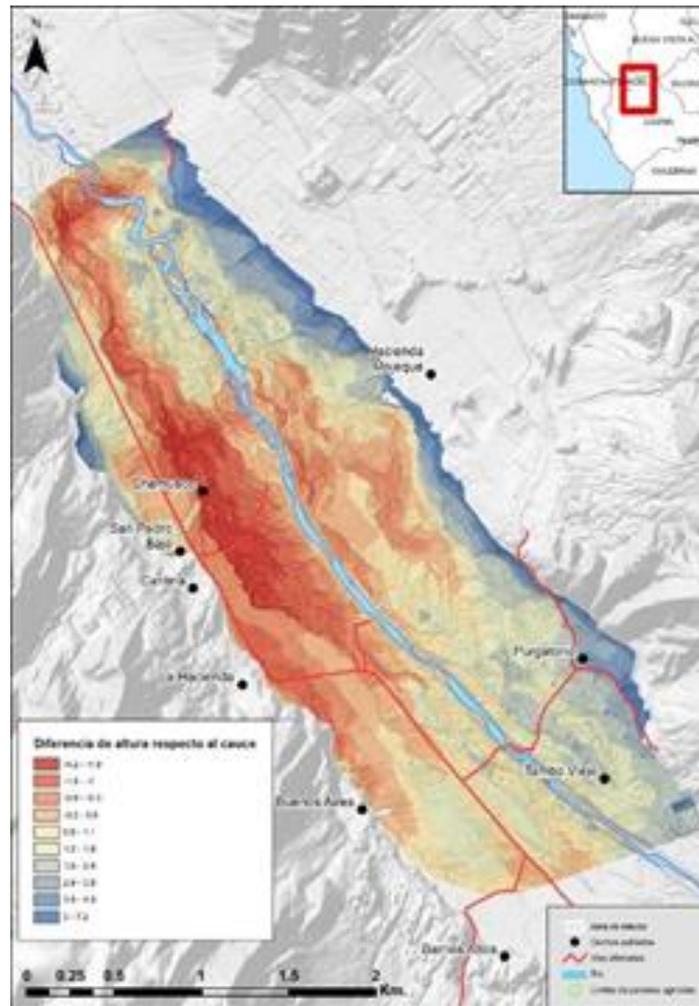
Al mismo tiempo, se generó un modelo de elevaciones relativas sobre la superficie de agua a partir del MDE LiDAR, el mismo que permite mapear con precisión unidades inundables con relación a su diferencia de altura con el cauce. En este modelo, la superficie de agua representa el cauce activo

² "El DPH cartográfico o probable es la superficie de terreno correspondiente al álveo o cauce natural de una corriente continua o discontinua cubierta por las aguas en las máximas crecidas ordinarias, determinada según sus características geomorfológicas, ecológicas y teniendo en cuenta las informaciones hidrológicas, hidráulicas, fotográficas y cartográficas que existan, así como las referencias históricas disponibles" (Artículo 4 del Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril)

actual, y las superficies relativas están en relación con la sección transversal del río. Esto brinda una ventaja bastante significativa respecto al modelo de elevación digital convencional, pues permite una delineación más precisa de barras y terrazas fluviales (Figura 10). Para su elaboración se utilizó el método propuesto por el Departamento de Ecología del Estado de Washington (GeoEngineers, 2013). En base a esta información, a las imágenes de satélite, e información de campo, fue posible elaborar un mapa geomorfológico que presenta las unidades inundables en condiciones naturales.

FIGURA 10.

Flotantes ligeros que indican el calado de la inundación del año 2017



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

INUNDACIONES HISTÓRICAS

Para esta investigación se analizaron cinco episodios de inundación, de los cuales, el del FEN 1997-1998 presentó un caudal equivalente a un período de retorno mayor a 200 años. En el caso del FEN 2017 no hay información del caudal; aunque según los testimonios de los agricultores, fue muy parecido al del año 1998.

TABLA 2.
Inundaciones históricas ocurridas entre 1961 y 2017.

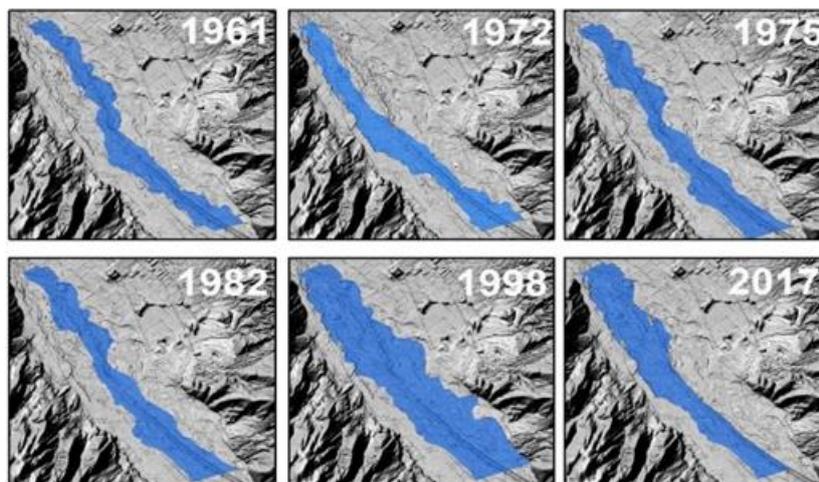
AÑO DE MÁXIMA DESCARGA	CAUDAL (m ³ /seg)	PERÍODO DE RETORNO APROXIMADO	SUPERFICIE INUNDADA TOTAL (ha)	AFECTACIÓN	ENVERGADURA
1961	135	Cerca de 25 años	205	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1972	140	Cerca de 25 años	211.85	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1982	80	Menos de 25 años	238.4	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1998	410	Mayor a 200 años	443	Cultivos y centros poblados	Crecida excepcional
2017	Sin información*		266	Afectación a cultivos y centros poblados	Máxima crecida o crecida excepcional

Fuente: Esta tabla muestra información de caudales del SENAMHI e información obtenida en el presente estudio.

*Según testimonio de la población, el caudal en este año fue similar al del año 1998.

Como se puede observar en la Tabla 2, el evento de mayor caudal y que causó mayor afectación fue el FEN 1997-1998. Según los entrevistados, fue tan grande la afectación que obligó a muchas familias que vivían dispersas a concentrarse en los actuales centros poblados. En la Figura 11, puede apreciarse una extensión bastante considerable del área inundada en el año 1998 y que cubre gran parte de la planicie aluvial.

FIGURA 11.
Mapeo evolutivo en tramo seleccionado

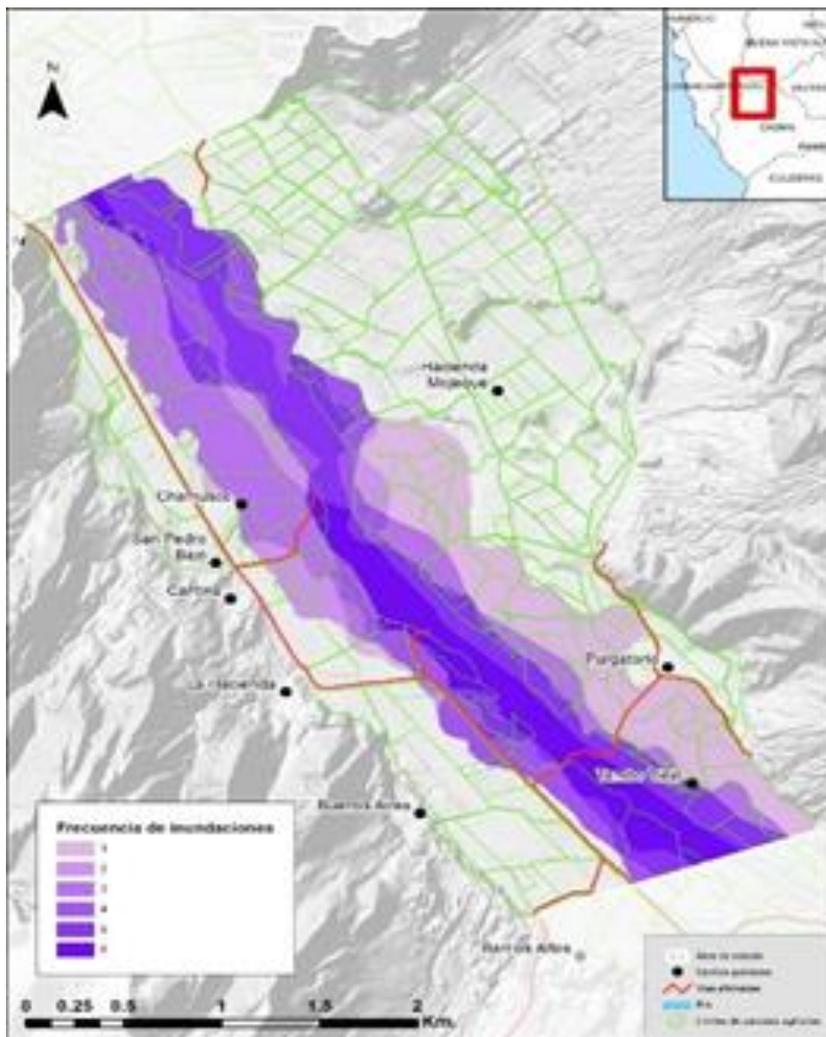


Fuente: Elaboración propia.

En el año 2017, hubo una clara tendencia de inundación hacia la margen izquierda y apareció un patrón recto hacia la margen derecha del área inundada. La Figura 12 permite analizar con mayor detalle las frecuencias de las inundaciones. Como puede observarse, las mayores frecuencias se encuentran concentradas hacia el centro y sur del área de estudio, excepto durante el FEN 1997/1998, cuando el río ocupó un área mayor hacia el este, pero se trata de un único evento en los casos analizados. Hacia el norte, existe una tendencia del flujo de orientarse hacia la margen derecha.

FIGURA 12.

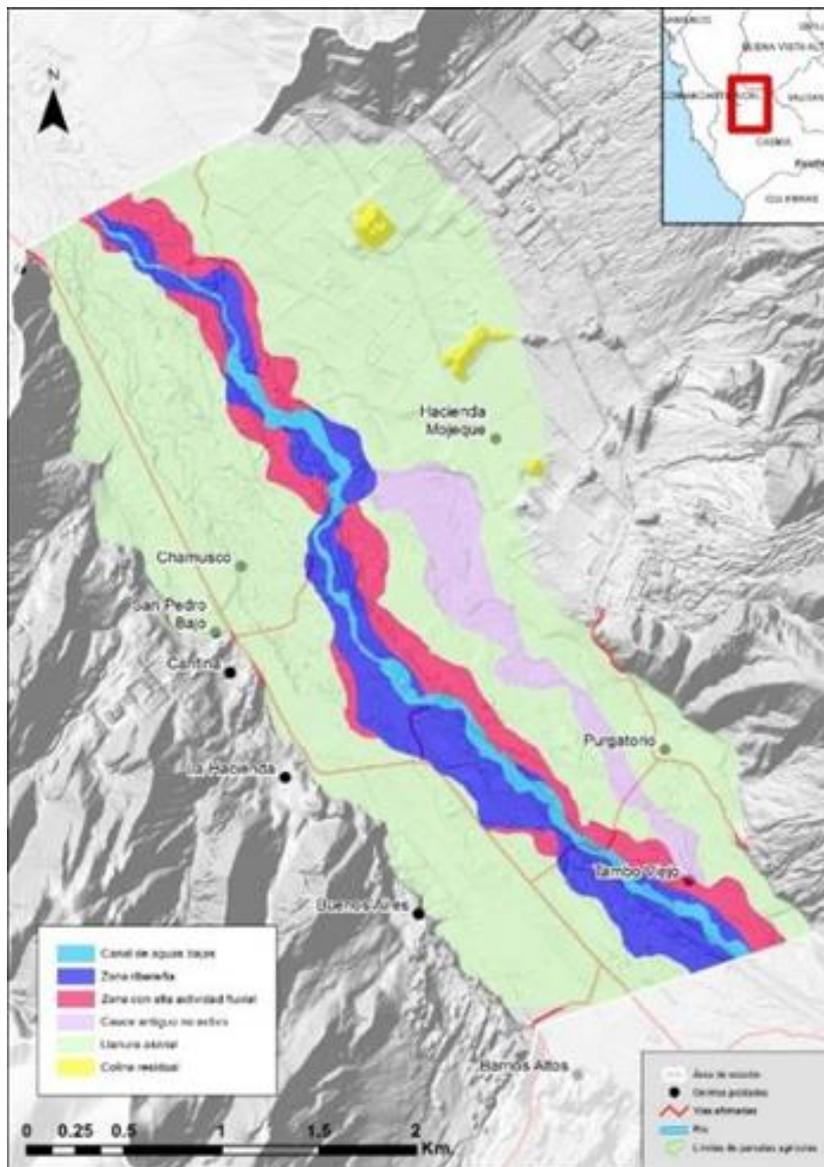
Frecuencia de inundaciones entre los años 1966 y 2017.



Fuente: Elaboración propia.

Para analizar estos cambios es importante analizar el proceso de ocupación y las intervenciones estructurales en el río. Para ello, primero veremos el caso del mapeo de cauces de los años 1966 y 2017 que corresponden a dos situaciones bastante distintas. El cauce del año 1966 es un cauce aparentemente natural, al menos en términos de medidas estructurales, mientras que el cauce del año 2017 es un cauce con condiciones alteradas por la construcción de diques longitudinales a partir del año 2010.

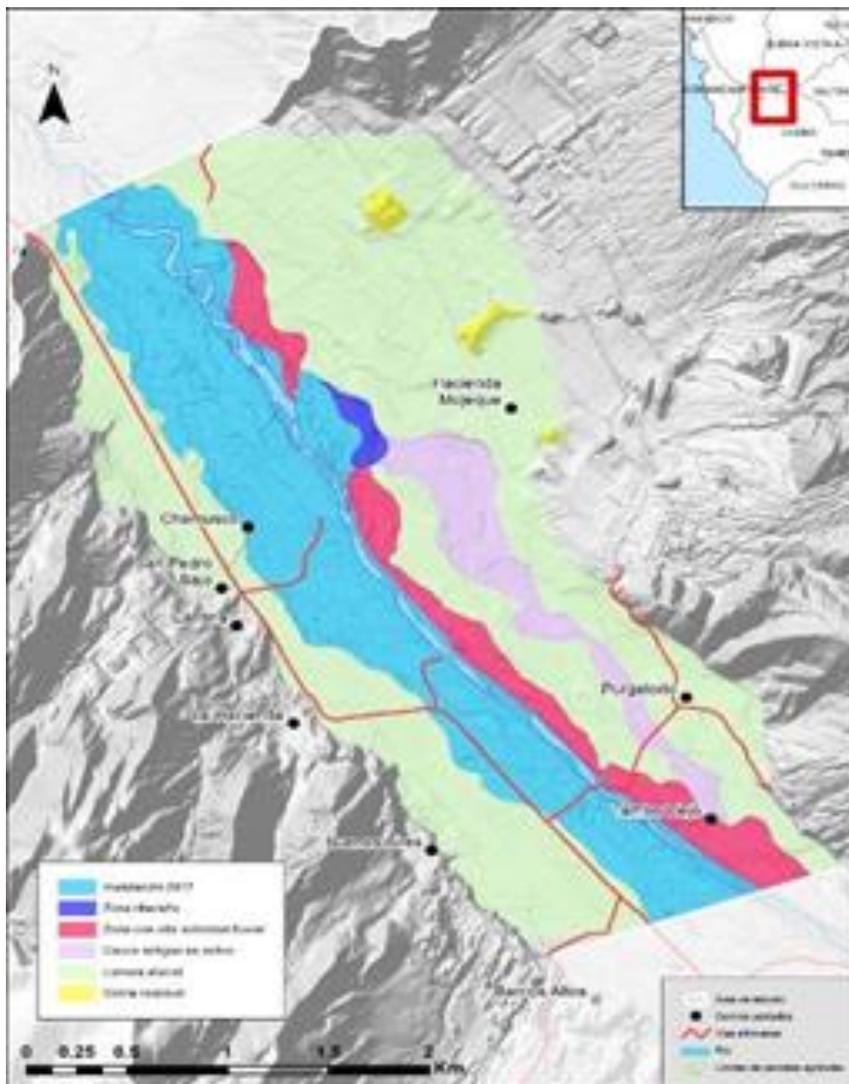
FIGURA 13.
Análisis morfológico del cauce para el año 1966



Fuente: Elaboración propia.

En 1966 no existían obras de protección de riberas. Tal como se puede observar en la Figura 13, la zona ribereña sigue casi la misma dirección que las frecuencias 5 y 6 de inundaciones en la Figura 10, ocupando casi el mismo ancho. Estas frecuencias comprenden el canal de aguas bajas, la zona ribereña y la zona de alta actividad fluvial. El denominado cauce antiguo no activo fue un cauce ocupado por el flujo de inundación el año 1998, pudiendo tratarse del lecho mayor excepcional. Obsérvese la diferencia entre el canal de aguas bajas del año 1966 y el del año 2017 (Figura 14). Esto se debe a la presencia de un dique longitudinal que fue construido a partir del año 2011 que colapsó varias veces, pues era solo de tierra.

FIGURA 14.
Análisis morfológico del cauce para el año 2017

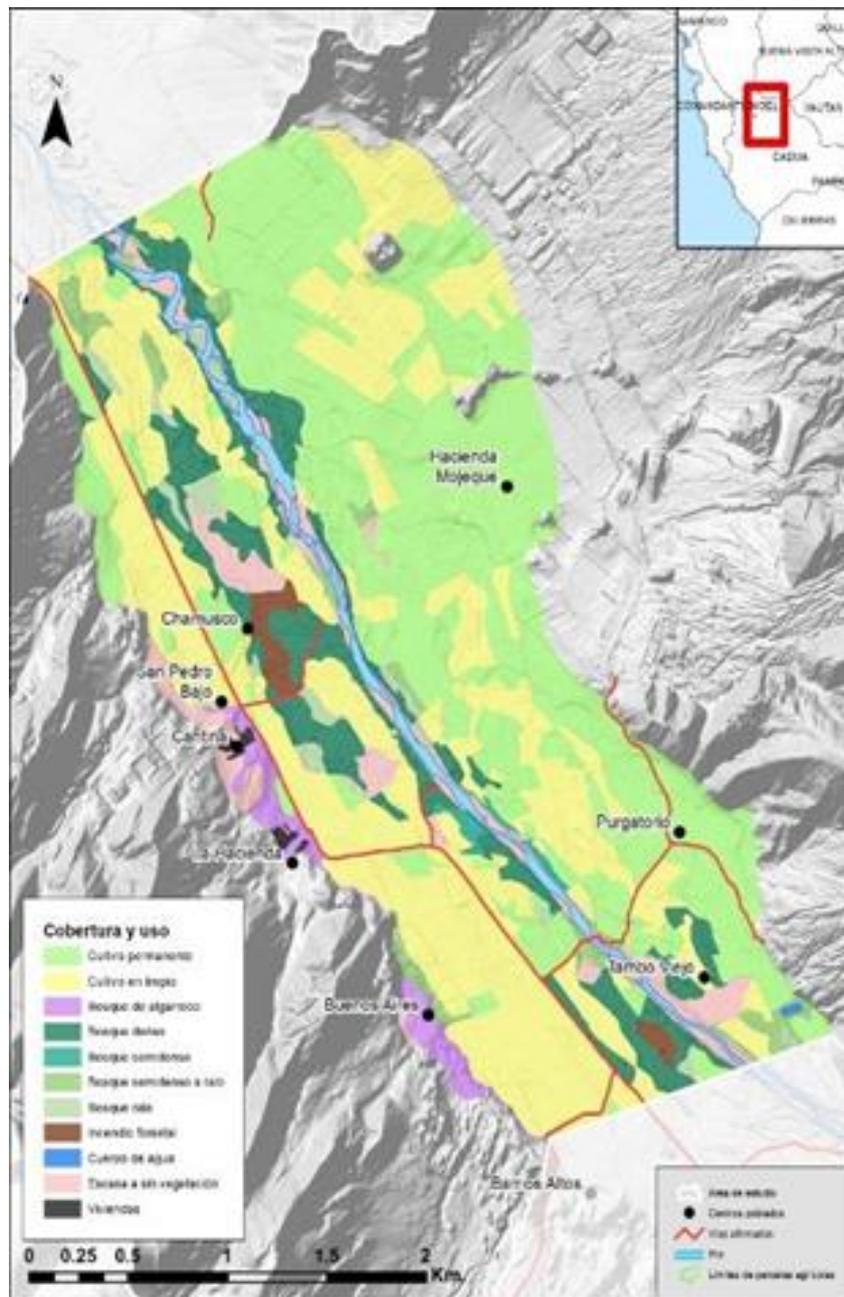


Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en el mapa del año 2017 (Figura 14), esta obra de protección afectó significativamente la hidráulica del río, obligando al flujo a recuperar un antiguo cauce que se había activado en los años 1975 y 1998. En la actualidad, se pretende reconstruir esta obra y mejorarla con enrocado. Esta modificación significativa del cauce entre los años más distantes, podría hacer pensar que se trata únicamente de la influencia del dique longitudinal. Para descartar esta situación se realizó un análisis multitemporal del uso de la tierra y la deforestación.

En la Figura 15 se puede observar el mapa de cobertura y uso actual de la tierra. Los polígonos verdes claros muestran los cultivos permanentes que están destinados para la agroexportación. En los últimos años hubo grandes inversiones agrícolas para el cultivo de frutales como palta, mango, etc. Esto ha generado una fuerte presión por la expansión del área agrícola en detrimento de los cauces naturales y bosques ribereños asociados. En consecuencia, hay una fuerte demanda por obras de protección.

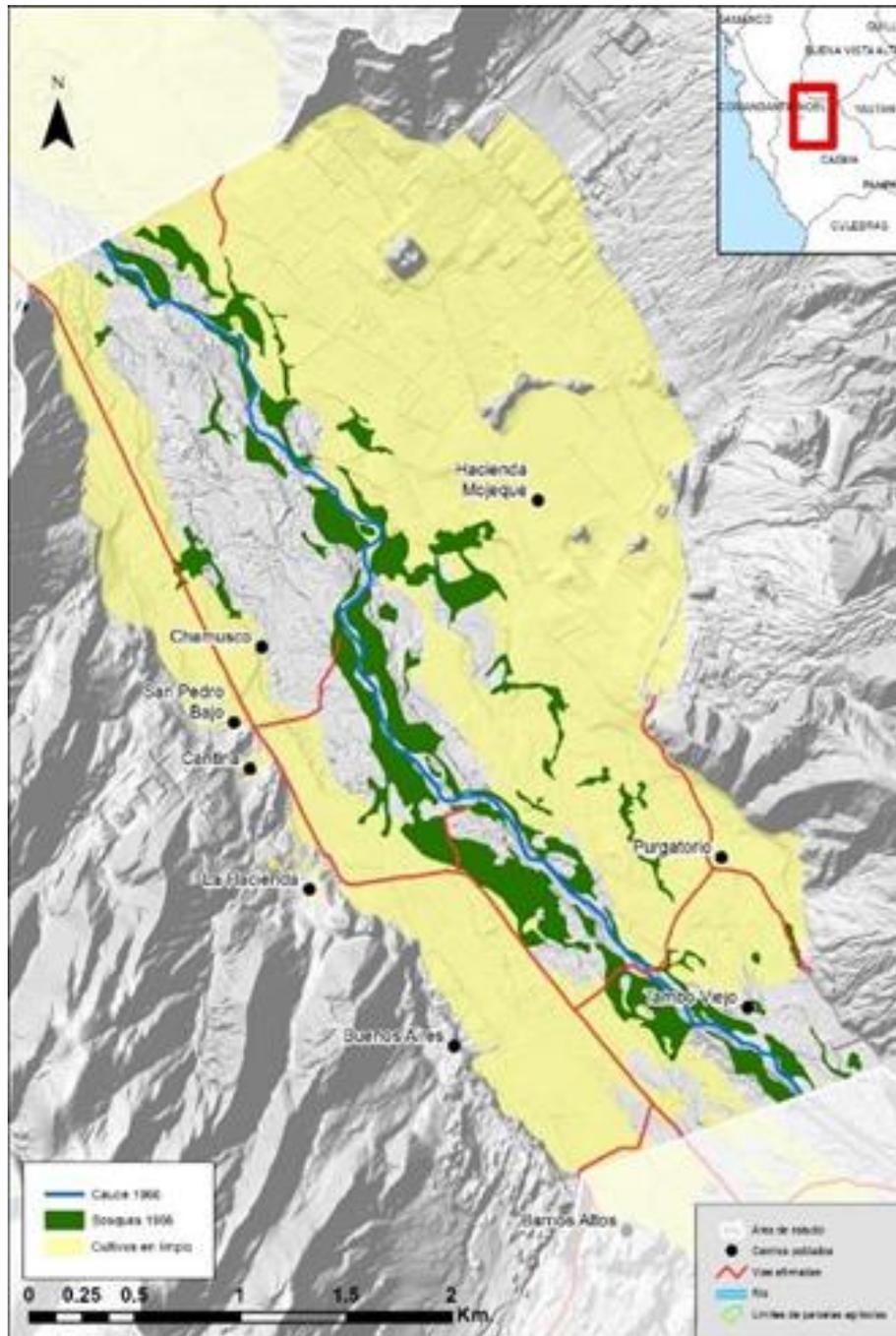
FIGURA 15.
Mapa de cobertura y uso actual de la tierra (2019)



Fuente: Elaboración propia.

La superficie actual de bosques ribereños densos en el tramo seleccionado es de 97 hectáreas. Aunque había una mayor concentración de bosques en la zona que fue afectada por el FEN 1998 y 2017 se puede apreciar que 1966 había una superficie de 106 hectáreas de bosques (Figura 16). A pesar de que la diferencia en la superficie de bosques no es muy considerable entre ambas fechas, la gran diferencia es posiblemente su distribución a lo largo del cauce. Hasta el año 1975 se mantuvo un patrón de cauce trezado, pero no tan móvil.

FIGURA 16
Mapa de cobertura y uso de la tierra 1966



Fuente: Elaboración propia.

A nivel de análisis cartográfico, no se puede sacar conclusiones tan precipitadas sobre el papel de los bosques en el cambio del patrón del flujo. Sin embargo, algunas personas entrevistadas consideran que cumplen un papel importante en la protección contra las inundaciones. Lo que sí está muy claro es el papel de los diques longitudinales en la hidráulica fluvial.

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

El análisis geomorfológico dio como resultado siete unidades en función a la inundabilidad, para ello se usó el sistema francés mencionado anteriormente (DIREN-PACA, 2007). Como puede observarse en la Figura 17, el río ha divagado por casi todo el lecho fluvial. En ese contexto, las unidades de inundabilidad son las siguientes:

- *Lecho menor artificial*

Constituye el lecho actual que se encuentra formado por diques longitudinales enrocados que forman un canal artificial de 60 metros de ancho. Cabe resaltar que este lecho se encuentra hasta 4 metros por encima de otras unidades, debido a la acumulación de sedimentos producida por la construcción del dique, que hasta el año 2017 era predominantemente de tierra y colapsó ese mismo año en varios tramos.

- *Lecho menor natural*

Constituye el lecho natural que se evidencia por la mayor frecuencia de los eventos históricos, formando una serie de canales de aguas bajas donde el río divaga preferentemente.

- *Lecho medio*

Terrazas de 1.5 a 3 metros en relación al cauce actual del río.

- *Lecho medio negativo*

Se trata de terrenos inundables que se encuentran entre 1.4 y 4 metros por debajo del lecho menor artificial.

- *Terraza alta*

Terrenos que se encuentran por encima de los 2.8 metros en relación al cauce actual del río. No existen evidencias morfológicas de inundaciones ni paleocauces.

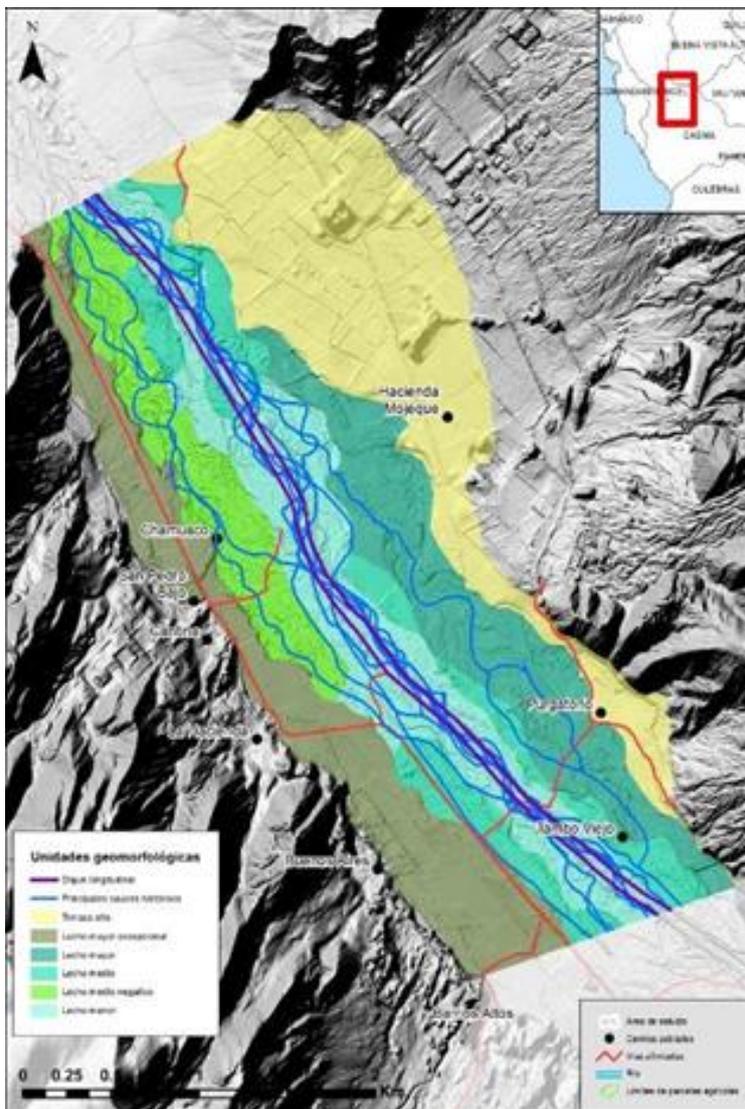
- *Lecho mayor excepcional probable*

Son terrazas que se encuentran en la margen izquierda del río a una altura que supera los 2 metros de las zonas de inundación recientes. No presentan evidencias de inundaciones desde la década de 1960, pero posiblemente se debe a que fueron disturbados por la actividad agrícola.

- *Lecho mayor*

Se encuentran hacia la margen derecha del río y se ven afectados en eventos excepcionales como las inundaciones ocurridas durante el FEN 1997/1998.

FIGURA 17.
Mapa geomorfológico



Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO-HISTÓRICO

Sobre la base del análisis evolutivo y la geomorfología se realizó la zonificación de peligros, así como la identificación del límite superior de la ribera. Con esta información se asume como avenidas máximas ordinarias el caudal estimado para períodos de retorno de 25 años que representan 183.29 m³/seg. Los eventos de 1961, 1972 y 1982 están por debajo de este caudal, sin embargo, son los más cercanos en relación a las inundaciones de 1998.

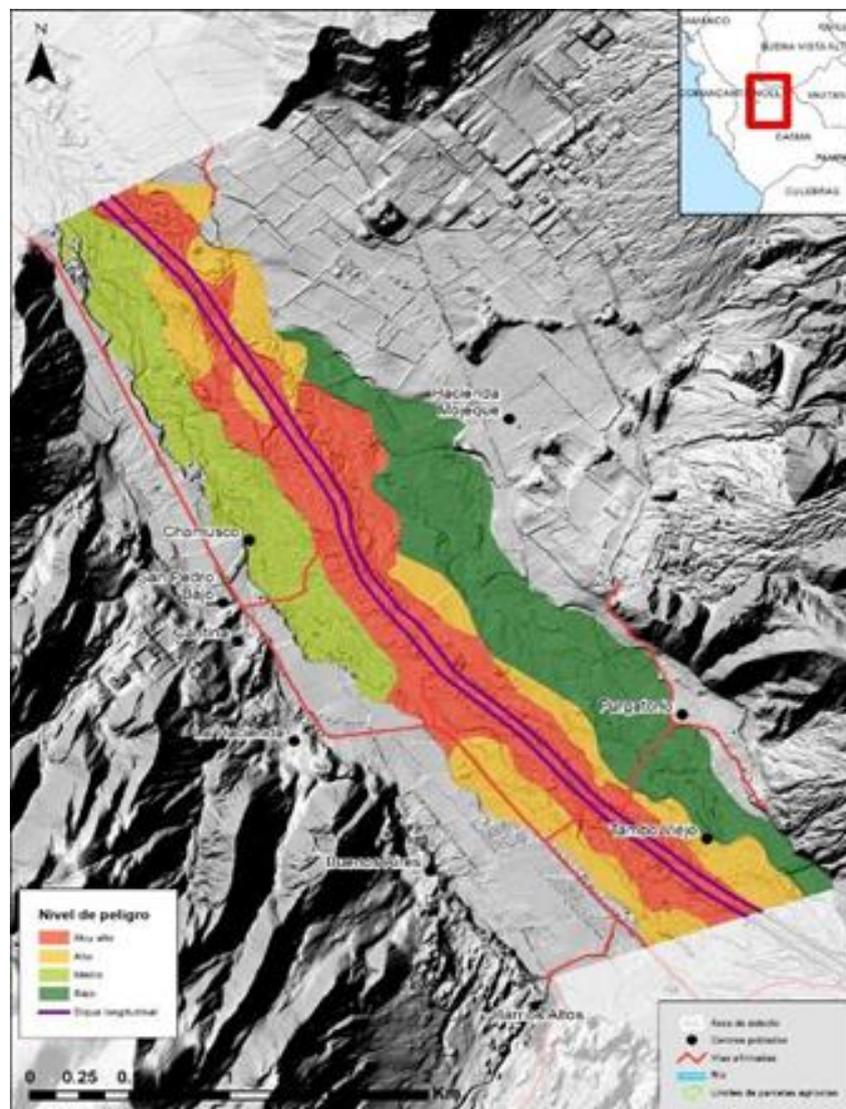
Según esto, la clasificación de peligros por inundaciones es la siguiente (Figura 18):

- *Muy alto*

Representado por el lecho menor artificial y el lecho menor natural. Se encuentra dentro del período de retorno de 25 años.

- *Alto*
Está dentro del período de retorno de 25 años, pero abarca también las terrazas que constituyen el lecho medio.
- *Medio*
Abarca terrenos que se encuentran muy significativamente por debajo del nivel del río, aunque hayan ocurrido inundaciones en los mismos, tanto en avenidas con un período de retorno menor a 25 años, como con mayores caudales.
- *Bajo*
Comprenden terrenos inundados durante eventos con un período de retorno de más de 50 años (como el FEN de 1998).

FIGURA 18
Peligros por inundaciones



Fuente: Elaboración propia.

El límite superior de la ribera estaría representado por los niveles muy alto y alto, puesto que están en relación con el período de retorno muy alto y alto, y también muestran evidencias de la huella máxima del río.

CONCLUSIONES

- En el Valle de San Rafael no hay influencia de la actividad torrencial en el tramo seleccionado, pues los abanicos aluviales activos no depositan material en la zona de actividad del río.
- El río presenta un patrón trezado, se identificaron zonas inundadas en seis eventos de inundación entre 1961 y 2017, con zonas con mayor frecuencia de las inundaciones, a partir de las cuales fue posible también identificar unidades geomorfológicas. También fue posible identificar niveles de peligro en función a la relación entre unidades geomorfológicas y las máximas avenidas relacionadas a diferentes periodos de retorno.
- La construcción del dique longitudinal ha influido significativamente en el comportamiento hidráulico del río. Esto influyó de tal forma que las zonas que estaban hacia la margen izquierda del río fueron más afectadas en el año 2017.
- La faja marginal del río, delimitada el año 1999, presenta muchas coincidencias con el límite de la ribera del río. sin embargo, tiende a subestimar el área inundable (delimitada a partir del método hidrológico-hidráulico).
- Existe ocupación agrícola dentro de la faja marginal. Esto revela poco control sobre los usos y cómo deberían ser regulados en la misma.

ALCANCES PARA LA GESTIÓN

- Es necesario redimensionar la faja marginal en algunos tramos con la finalidad de mejorar la gestión del cauce actual, así como garantizar la conservación de los bosques ribereños.
- Es necesario redimensionar la distancia entre los diques longitudinales, debido a que los mismos podrían no tener la capacidad de los eventos de gran magnitud, existiendo una tendencia de sedimentación de estos.
- Se debe hacer un tratamiento integral de, al menos, la zona comprendida en la ribera del río. Esto implica restaurar el río, promover acuerdos para lograr la menor intervención posible y buscar mecanismos de compensación para los agricultores que podrían resultar afectados. Los principales elementos para un tratamiento integral son el redimensionamiento de diques longitudinales, la protección de bosques ribereños y la regulación de usos del suelo. Estos componentes permiten un acercamiento a condiciones naturales que garanticen el desarrollo evolutivo del río. Esta acción debe realizarse a nivel de toda la cuenca de acuerdo con las condiciones diferenciadas de cada tramo del río.
- Es necesario analizar en futuras investigaciones el papel de los bosques ribereños en el control de las inundaciones. Para ello, es necesario ampliar el tramo de estudio.
- En cuanto a las restricciones para el uso de este tipo de método, lo recomendable es combinar este modelo de estudio con estudios hidráulicos, pues son complementarios y en

su conjunto permiten un mejor conocimiento de las dinámicas del río en condiciones naturales y artificiales para tomar mejores decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Apacla Nalvarte, R. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico*. Autoridad Nacional del Agua.
- Apéstegui, J., Macharé, J., Takahashi, K., Sifeddine, A., & Ortieb, L. (2015). *El Fenómeno El Niño durante el último milenio. Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*. Vol. 2 N° 2.
- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017. Retrieved from
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Wang, S., Jiang, G., Lu, S., & Tong, Q. (2013). *Comparison of MNDWI and DFI for water mapping in flooding season*. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International.
- Ballarín Ferrer, D., & Rodríguez Muñoz, I. (2013). *Hidromorfología fluvial. Algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos en la cuenca del Duero*.
- Dewitte, B., Takahashi, K., Goubanova, K., Montecinos, A., Mosquera, K., Illig, S., . . . Espinoza, J. (2014). *Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú*.
- DIREN-PACA. (2007). *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens: Direction Régionale de l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur*, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
- French, A., & Mechler, R. (2017). *Managing El Niño Risks Under Uncertainty in Peru: Learning from the past for a more disaster-resilient future*.
- GeoEngineers. (2013). *Channel Migration Assessment*. Clallam County: Department of Ecology State of Washington.
- INRENA. (2007a). *Estudio hidrológico en la Cuenca del río Casma*.
- INRENA. (2007b). *Inventario de fuentes de agua superficial en la cuenca del río Casma*.
- Martínez, F. S., & Fernández, J. L. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Municipalidad Provincial de Casma. (2017). *Plan de Manejo del Complejo Arqueoastronómico de Chankillo*. Casma-Perú.
- Ojeda Couchoud, M., Sovero Sovero, H. F., Vargas, R., Pacha Vicente, C., & Pernas Canadell, J. (2015). *Perfil de riesgo por inundaciones en Perú*. (Vol. 844): Banco Interamericano de Desarrollo.
- SENAMHI. (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú*. Lima-Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.