



CENEPRED

Centro Nacional de Estimación, Prevención y
Reducción del Riesgo de Desastres

ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES DE LA CUENCA ALTO APURÍMAC

Septiembre 2023



ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES DE LA CUENCA ALTO APURÍMAC

Elaborado por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED).

Dirección de Gestión de Procesos. Subdirección de Gestión de la Información. CENEPRED, 2023.

Av. Del Parque Norte N° 313 - 319. San Isidro - Lima – Perú

Teléfono: 2013-550, correo electrónico: info@cenepred.gob.pe

Página web: <https://www.gob.pe/cenepred>

Equipo Técnico del CENEPRED:

Ing. Miguel Yamasaki Koizumi

Jefe del CENEPRED

Ing. Juan Carlos Montero Chirito

Director de la Dirección de Gestión de Procesos

Ing. Alfredo Zambrano Gonzales

Subdirector de Gestión de la Información

Equipo Técnico de la Subdirección de Gestión de la Información:

Bach. Karina Obregón Acevedo

Especialista en Sistema de Información Geográfica

Elaborado por:

M.Sc. Eber Rostaing Risco Sence



INDICE

I.	Introducción	6
II.	Área de estudio.....	8
III.	Datos	9
3.1	Datos de ocurrencia de inundaciones.....	9
3.2	Producto PISCO	9
3.3	Caudales diarios	10
3.4	Respuesta de modelo hidrológico de SENAMHI.....	11
3.5	Información de elementos del territorio del área de estudio (elementos expuestos)	11
3.6	datos de sensoramiento remoto.....	12
IV.	Proceso metodológico	13
4.1	Revisión de información y modelos existentes	13
4.2	Implementación y complementos a modelos para la susceptibilidad de riesgo por inundación	13
V.	Resultados.....	19
5.1	Modelo Lluvia-Escorrentía-Inundación (RRI) para la cuenca Alto Apurímac	19
5.2	Modelo de susceptibilidad a inundaciones usando modelo de clasificación Random Forest	24
VI.	Análisis de elementos expuestos.....	36
VII.	Análisis de imágenes SAR.....	39
VIII.	Anexos.....	40
IX.	Referencias bibliográficas.....	41



FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la cuenca hidrográfica Alto Apurímac.....	8
Figura 2: Caudales observados en las cuencas de estudio para el periodo de análisis enero a marzo 2017.....	10
Figura 3: Proceso metodológico para la generación de caudales diarios transitados.....	14
Figura 4: Esquema metodológico del modelo Rainfall-Runoff-Inundation (RRI).....	15
Figura 5: Metodología para procesar datos multitemporales de Sentinel-1B SAR.	17
Figura 6: Flujo metodológico para la generación de escenario de riesgo de inundación en las cuencas prioritarias.	18
Figura 7: Representación espacial de las variables topográficas en la cuenca Alto Apurímac.	19
Figura 8: Ubicación espacial de las estaciones virtuales en base al producto PISCO-precipitación.....	20
Figura 9: Representación espacial de la precipitación en base al producto PISCO (climatología 1981-2020).....	21
Figura 10: Representación de los datos de lluvia diaria asimilados por el modelo RRI para la cuenca Alto Apurímac.....	22
Figura 11: Cobertura de suelo en base al producto MODIS para la cuenca Alto Apurímac.	23
Figura 12: Resultados del modelo RRI en la cuenca Alto Apurímac. Superior: Altura de inundación en m. Inferior: Intensidad de inundación (clasificación).	23
Figura 13: Comparación del área de inundación obtenido por el modelo RRI en relación al modelo de susceptibilidad proporcionado por CENEPRED.....	24
Figura 14: Predictores: Pendiente, Máxima precipitación antecedente, precipitación diaria extrema, índice topográfico de humedad en la cuenca Alto Apurímac.	26
Figura 15: Predictores: Cobertura de suelo, Elevación, Geología, Geomorfología, índice de vegetación de diferencia normalizada en la cuenca Alto Apurímac.	27
Figura 16: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a su altitud (msnm).	28
Figura 17: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de cobertura de suelo.	28
Figura 18: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de geología.	29



Figura 19: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de geomorfología.....	29
Figura 20: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	30
Figura 21: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la pendiente (radianes).....	30
Figura 22: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la máxima precipitación antecedente.....	31
Figura 23: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la precipitación extrema diaria.....	31
Figura 24: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al índice topográfico de humedad (TWI).....	32
Figura 25: Precisión del modelo en función de los parámetros que se utilizaron en el modelo de RF (mtry y ntree son dos parámetros importantes del modelo de RF).....	32
Figura 26: Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca Alto Apurímac.....	33
Figura 27: Resultados del modelo de clasificación Random Forest en la cuenca Alto Apurímac. Superior: Susceptibilidad de inundación en probabilidad. Inferior: Susceptibilidad clasificada de inundación.....	35
Figura 28: Comparación del área de inundación obtenido por el modelo RRI en relación a las imágenes SAR para la cuenca Alto Apurímac.....	39

TABLAS

Tabla 1: Registros de inundaciones en la cuenca de Alto Apurímac.....	9
Tabla 2: Estaciones hidrométricas seleccionadas dentro de las cuencas priorizadas por CENEPRED. La cobertura de datos [%] se considera desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de marzo de 2020.....	10
Tabla 3: Descripción de valores de cobertura de suelo.....	22
Tabla 4: Clasificación de los valores de susceptibilidad.....	34
Tabla 5: Clasificación de ocurrencias de inundación de acuerdo a los resultados del modelo de susceptibilidad para la cuenca Alto Apurímac.....	34
Tabla 6: Vulnerabilidad de las líneas de transmisión en la cuenca Alto Apurímac.....	36
Tabla 7: Vulnerabilidad de la red vial en la cuenca Alto Apurímac.....	36



Tabla 8: Vulnerabilidad en otra infraestructura vial en la cuenca Alto Apurímac.	36
Tabla 9: Vulnerabilidad de manzanas urbanas en la cuenca Alto Apurímac.	37
Tabla 10: Vulnerabilidad de las instituciones educativas en la cuenca Alto Apurímac. ..	37
Tabla 11: Vulnerabilidad de la zona agraria vial en la cuenca Alto Apurímac.....	37
Tabla 12: Vulnerabilidad de los centros poblados en la cuenca Alto Apurímac.	37
Tabla 13: Vulnerabilidad del transporte aéreo en la cuenca Alto Apurímac.....	38
Tabla 14.: Vulnerabilidad de agencias bancarias en la cuenca Alto Apurímac.	38
Tabla 15: Vulnerabilidad de centrales hidroeléctricas en la cuenca Alto Apurímac.	38



ESCENARIO DE RIESGO POR INUNDACIONES DE LA CUENCA ALTO APURÍMAC

I. Introducción

Las inundaciones son desastres naturales que generan diversas repercusiones socioeconómicas (Bui et al. 2018) , que provocan varias consecuencias, como erosión, deslizamientos de tierra y sumideros (Arabameri et al. 2019). Por lo cual, se requiere monitorear las inundaciones utilizando técnicas avanzadas y desarrollar modelos precisos de riesgo de inundaciones (Samanta et al. 2018). Las inundaciones y los deslizamientos de tierra pueden ocurrir como consecuencia de períodos prolongados de fuertes lluvias en las laderas empinadas de las montañas (Joshi y Kumar 2006). La susceptibilidad al peligro a menudo se relaciona con las condiciones climáticas, las características de la cuenca y los procedimientos dentro de los cauces montañosos (Wagner 2007). Estos desastres tienen el potencial de matar a muchas personas y dañar seriamente la infraestructura, la vivienda y el transporte (Nguyen et al. 2021). La gravedad de estos sucesos está determinada por varios elementos, incluida la intensidad de las lluvias, la geografía diversa, las propiedades topográficas, el cambio climático, las actividades humanas, el grado de desarrollo socioeconómico y las condiciones de drenaje de una región específica (Alam et al. 2018).

En el territorio peruano, la ocurrencia del fenómeno del niño de los años 82 -83, 97-98, 2017 y recientemente el 2023, generaron eventos climáticos de carácter extraordinario, resultando en cuantiosas pérdidas socioeconómicas para las zonas afectadas en el país. Su ocurrencia causa distintas alteraciones sobre los niveles y temporalidad de las lluvias. En el 2017, luego de 20 años de la presencia del último Fenómeno el Niño de carácter extraordinario, el Niño Costero desencadenó lluvias torrenciales. Estas alteraciones se iniciaron hacia fines de diciembre del 2016 y se prolongó hasta finales de mayo de 2017. Este nivel de lluvias causó huaycos, inundaciones, deslizamientos, derrumbes, tormentas, afectando a 1,782,316 personas, principalmente, en la zona de la Libertad, Lambayeque, Ica, Loreto y Piura. Se registraron daños en 413,983 viviendas, establecimientos de salud y educación (INDECI, 2017). Mientras que, en la zona costera del Perú, el fenómeno del



niño ocasiona un aumento extremo de las precipitaciones, en la zona de la sierra se presentan sequías. Daños similares se registraron en los años 82 y 83 con pérdidas valoradas en USD 1,000 millones en infraestructura, producción, y pérdidas sociales; mientras que en el 97-98 los daños ascendieron a USD 3,500 millones en los sectores de agricultura y pesca; infraestructura y servicios básicos; vivienda y construcción; salud; transporte y turismo (CAF, 2000).

En tal sentido, existe la urgente necesidad de contar con herramientas que den soporte a su monitoreo y previsión de inundaciones; sin embargo, la implementación de un sistema de alerta frente a inundaciones se encuentra limitada por la baja densidad de estaciones hidrométricas a lo largo del territorio nacional. En ese contexto, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), viene desarrollando herramientas que permiten identificar zonas potenciales de inundación, basado en el desarrollo de modelos hidrológicos y la aplicación de técnicas de regionalización hidrológica que permitan simular caudales sobre la extensa red hídrica nacional, evaluar la hidrología de cuencas con escasa información, y dar soporte a la gestión de peligros hidrológicos (SENAMHI 2021).

Por lo cual, el presente estudio propone el desarrollo de metodologías que permitan identificar los niveles de riesgo ante inundaciones en el ámbito geográfico de las cuencas priorizadas (Alto Apurímac), a fin que los profesionales de los gobiernos locales y regionales cuenten con un instrumento técnico para la focalización de sus intervenciones.

Para tal fin, se utilizará la información existente de instituciones del estado como SENAMHI, ANA, IGP, MINAM, MINAGRI, INDECI, CENEPRED, INEI, etc. Estos datos e información permitirán el análisis y zonificación de la susceptibilidad o peligro por inundaciones para los escenarios de riesgo por inundaciones, como también el análisis de elementos expuestos a inundaciones en las cuencas priorizadas (Alto Apurímac).

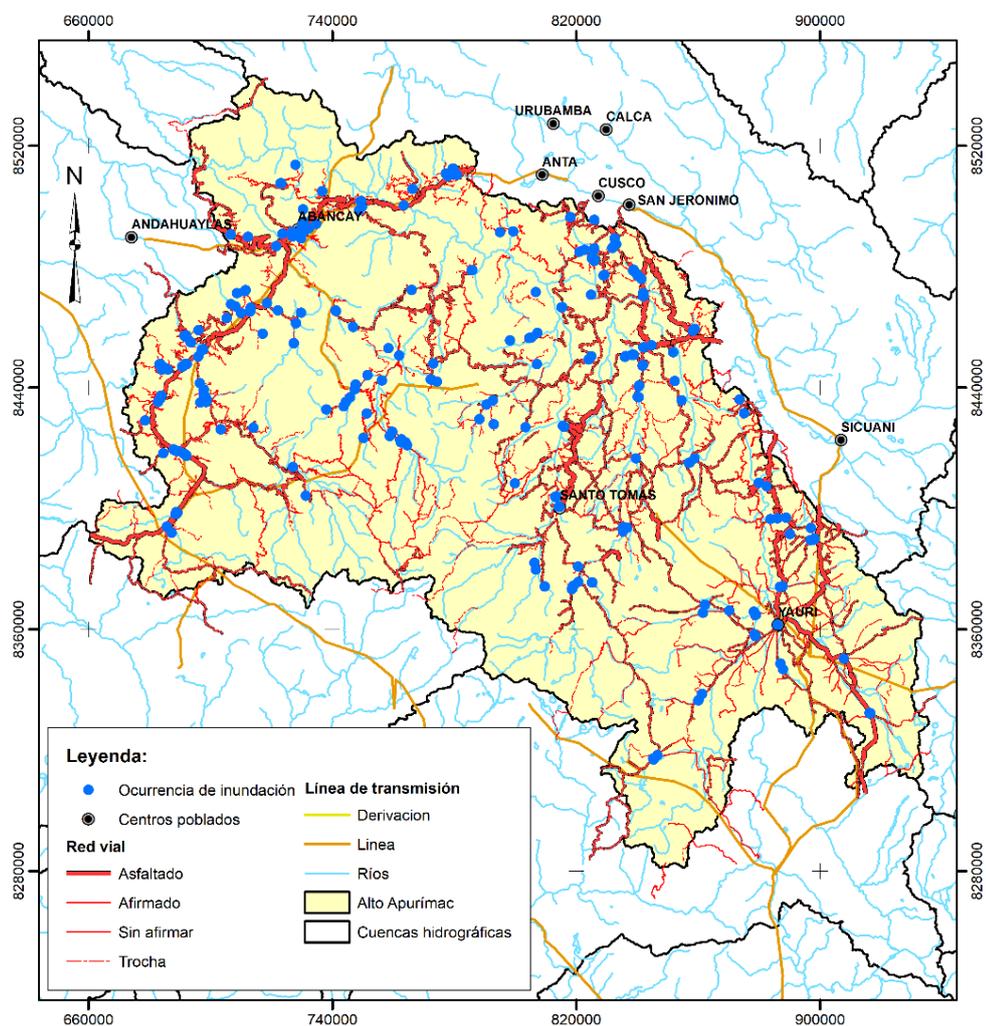


II. Área de estudio

El área de estudio está representada por las cuencas priorizadas por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), las cuales son las cuencas hidrográficas:

- Cuenca hidrográfica del Alto Apurímac.

Figura 1: Ubicación de la cuenca hidrográfica Alto Apurímac.





III. Datos

3.1 Datos de ocurrencia de inundaciones

Los datos de ocurrencia de inundaciones están representados por los proporcionados por CENEPRED de las fuentes de: ANA, INGEMMET, INDECI. Teniendo la siguiente distribución luego de un proceso de depuración de registros duplicados.

Tabla 1: Registros de inundaciones en la cuenca de Alto Apurímac

Fuente	Registros
ANA	185
INDECI	125
INGEMMET	09

El criterio de selección de las ocurrencias fue mediante la descripción de los registros en la base de datos proporcionada por CENEPRED, en los cuales se seleccionaron los referentes a zonas vulnerables ante inundaciones, registros de inundaciones, emergencias registradas, identificados como puntos críticos de riesgo de inundación, siempre teniendo el criterio de seleccionar los referidos al evento de inundación.

3.2 Producto PISCO

El conjunto de datos hidrometeorológicos PISCO tiene cobertura en todo territorio peruano incluyendo cuencas transfronterizas. Contiene subproductos grillados de precipitación (P), temperatura del aire (TA) y evapotranspiración potencial (PET); con una resolución espacial de 0. 1° y temporal de un día. Los productos PISCOP, TA, PET están disponibles para el periodo de 1981 al 2016 (versión estable). Sin embargo, existe una versión inestable desarrollada para PISCOP, la cual se actualiza diariamente para los fines operativos del SENAMHI. PISCOP (Aybar et al. 2020) se genera mediante el uso de métodos geoestadísticos y determinísticos que incluyen tres fuentes de precipitación: (a) el conjunto de datos de pluviómetros nacionales con control de calidad, (b) climatologías de precipitación combinadas con indicadores de radar, y (c) el Climate Hazards Group Infrared Precipitation (CHIRP). De manera similar, PISCOTA se obtiene de: a) series de tiempo de datos de temperatura del aire máxima y mínima, (b) producto de temperatura del suelo del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y (c) predictores geográficos (elevación, longitud, latitud e índice de disección topográfica).



PISCOPEPET se deriva a partir de PISCOTA siguiendo la metodología propuesta por (Hargreaves and Samani, 1985). El conjunto de datos de PISCO está disponible gratuitamente en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO>. Para la implementación del modelo RRI se utilizaron los datos de precipitación principalmente.

3.3 Caudales diarios

Se seleccionaron las series de tiempo de caudales diarios observados en 01 estación hidrométrica, la cual es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). En concreto, en la región amazónica (vertiente del atlántico). El detalle de las estaciones seleccionadas se resume en la Tabla 2.

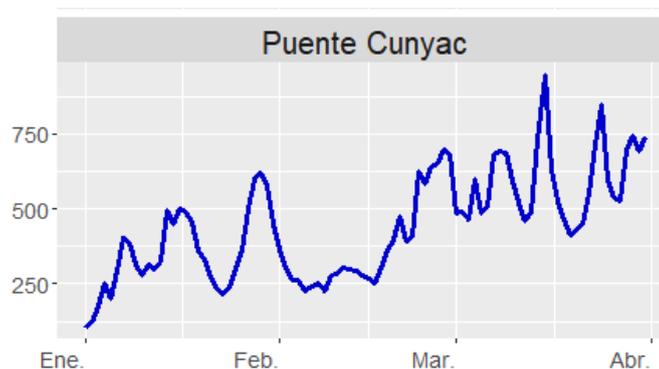
Los datos de caudales observados fueron utilizados para establecer las condiciones límite del río en dos ubicaciones para la cuenca Alto Apurímac, durante la ocurrencia del fenómeno del niño del 2017.

Tabla 2: Estaciones hidrométricas seleccionadas dentro de las cuencas priorizadas por CENEPRED. La cobertura de datos [%] se considera desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de marzo de 2020.

Vertiente	Estación	Abrev.	Latitud	Longitud	Cuenca	Fuente	% Datos
Atlántico	Puente Cunyac	PCU	-13.5600	-72.5740	Apurímac	SENAMHI	26.9

FUENTE: (SENAMHI 2021)

Figura 2: Caudales observados en las cuencas de estudio para el periodo de análisis enero a marzo 2017.





3.4 Respuesta de modelo hidrológico de SENAMHI

SENAMHI, viene desarrollando un modelo hidrológico bajo un enfoque de modelación acoplado (MHC+MTH: modelo hidrológico conceptual + modelo de tránsito hidrológico) para simular descargas sobre toda la red hídrica de la cuenca. Los datos del producto PISCO (P y PET) se utilizan para forzar un MHC (lluvia-escorrentía) que proporciona volúmenes diarios de escorrentía (RU) como entradas para un MTH para estimar descargas diarias (Qsim) en toda la red hidrográfica nacional. Este modelo ha sido desarrollado mediante los modelos hidrológicos ARNO/VIC e hidráulico RAPID para la generación de caudales transitados en los tramos de los ríos (SENAMHI 2021). En caso de no existir información observada en estaciones hidrométricas en la cuenca de análisis, se puede utilizar las salidas de caudales del modelo implementado por SENAMHI, como condiciones de borde para el modelo RRI.

3.5 Información de elementos del territorio del área de estudio (elementos expuestos)

Consiste en la recopilación de información cartográfica de medios de vida e infraestructura dentro de la cuenca de estudio, como:

a) Áreas agrícolas

Representa a la cartografía del catastro de las parcelas rurales sobre las cuales se realiza actividad agrícola. Información recopilada de ministerio de agricultura, municipalidades, gobiernos regionales.

b) Centros poblados

Representa a la cartografía de los centros poblados. Información recopilada del instituto nacional de estadística e informática (INEI), municipalidades, gobiernos regionales.

c) Instituciones educativas

Representa a la cartografía de los centros educativos. Información recopilada del instituto nacional de estadística e informática (INEI), ministerio de educación, municipalidades, gobiernos regionales.

d) Red vial

Representa a la cartografía de las carreteras. Información recopilada ministerio de transporte y comunicaciones, municipalidades, gobiernos regionales.

e) Centros de salud



Representa a la cartografía de los centros de salud. Información recopilada del instituto nacional de estadística e informática (INEI), ministerio de salud, municipalidades, gobiernos regionales.

f) Otros

Información cartográfica adicional a las mencionadas, como líneas de transmisión, aeropuertos, sectores de enumeración agraria.

3.6 datos de sensoramiento remoto

Referido a los datos de sensoramiento remoto de teledetección de teledetección radar (SENTINEL 1) para la zona de estudio representada por las cuencas hidrográficas de Alto Apurímac.



IV. Proceso metodológico

El desarrollo del presente trabajo se realizará de acuerdo al desarrollo de las siguientes actividades:

4.1 Revisión de información y modelos existentes

Consiste en la revisión de datos, informes, reportes de información y modelos existentes referente al modelamiento hidrológico, hidráulico y de susceptibilidad física ante inundaciones dentro de las cuencas prioritarias, la cual conlleva las siguientes actividades:

- Revisión de modelos hidrológicos en la cuenca

Consiste en la revisión de los modelos hidrológicos existentes dentro de las cuencas prioritarias, en ese sentido SENAMHI cuenta con un modelo hidrológico a paso diario con tránsito (ARNO/VIC + RAPID). Usado en caso no exista información de caudales en estaciones hidrométricas.

- Revisión de modelos hidráulicos en la cuenca

Consiste en la revisión de los modelos hidráulicos existentes dentro de las cuencas prioritarias, que dentro de su conceptualización permita identificar la zona de inundación ante un evento extraordinario. Es importante identificar si el modelo existente ha generado la zona inundación ante un evento extraordinario. En la cuenca Alto Apurímac no existe modelo hidráulico, si un modelo de susceptibilidad.

- Revisión de mapa de susceptibilidad ante inundaciones

Consiste en la revisión del mapa de susceptibilidad ante inundaciones (antecedentes de instituciones como INGEMMET y CENEPRED) en las cuencas prioritarias. Servirá para hacer un contraste con los resultados obtenidos.

- Revisión de datos de sensoramiento remoto y registro de eventos de inundaciones

Consiste en la revisión y recopilación de datos de sensoramiento remoto (óptica y radar) en las cuencas hidrográficas priorizadas, así como el registro de eventos de inundaciones de instituciones de CENEPRED, INGEMMET, ANA. Este proceso se realizará en el informe final de la consultoría para las dos cuencas de análisis.

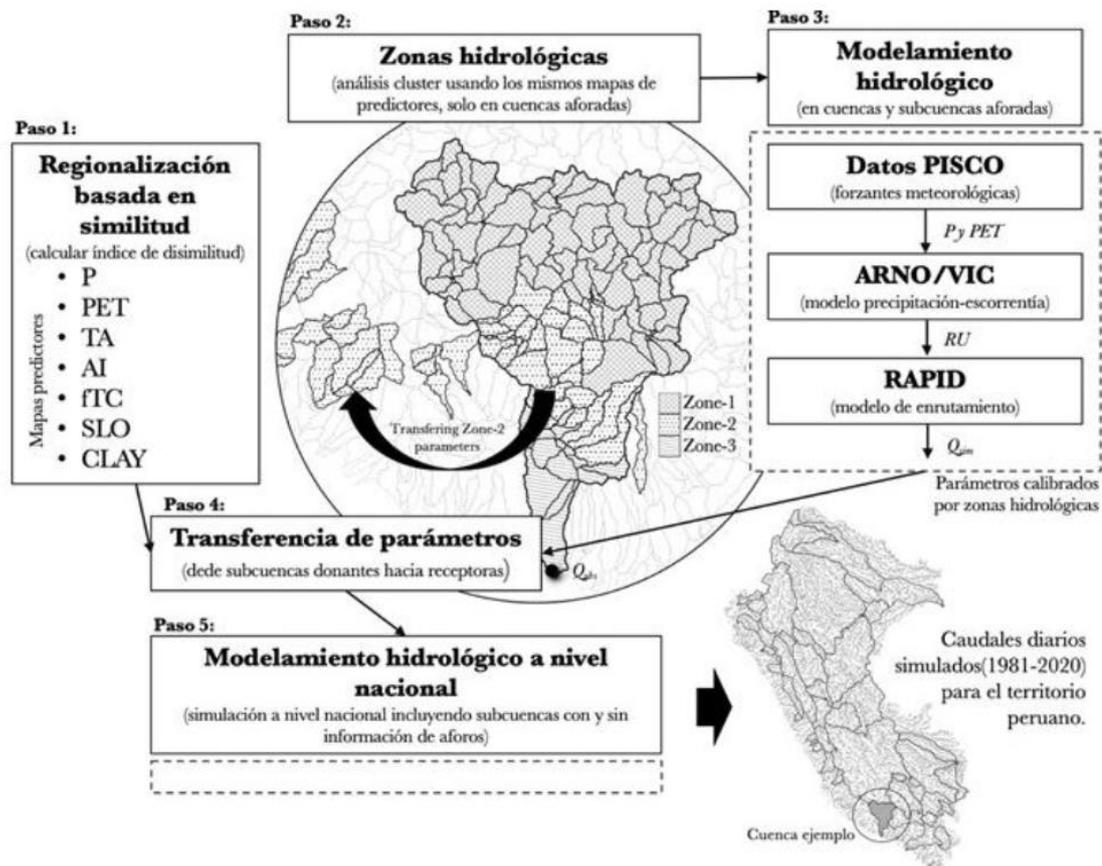
4.2 Implementación y complementos a modelos para la susceptibilidad de riesgo por inundación



Consiste en la complementación e implementación de modelos existentes (Modelo de susceptibilidad ante inundaciones de SENAMHI), revisión de la susceptibilidad, contraste con eventos de inundación registrada, datos de sensoramiento remoto, modelos de susceptibilidad en base a ocurrencias registradas.

Modelo hidrológico de generación de caudales (SENAMHI: modelo ARNO/VIC + RAPID) para el uso de los caudales en los tramos del río de las cuencas priorizadas. El proceso metodológico del modelo para la generación de caudales diarios se presenta en la siguiente figura.

Figura 3: Proceso metodológico para la generación de caudales diarios transitados.



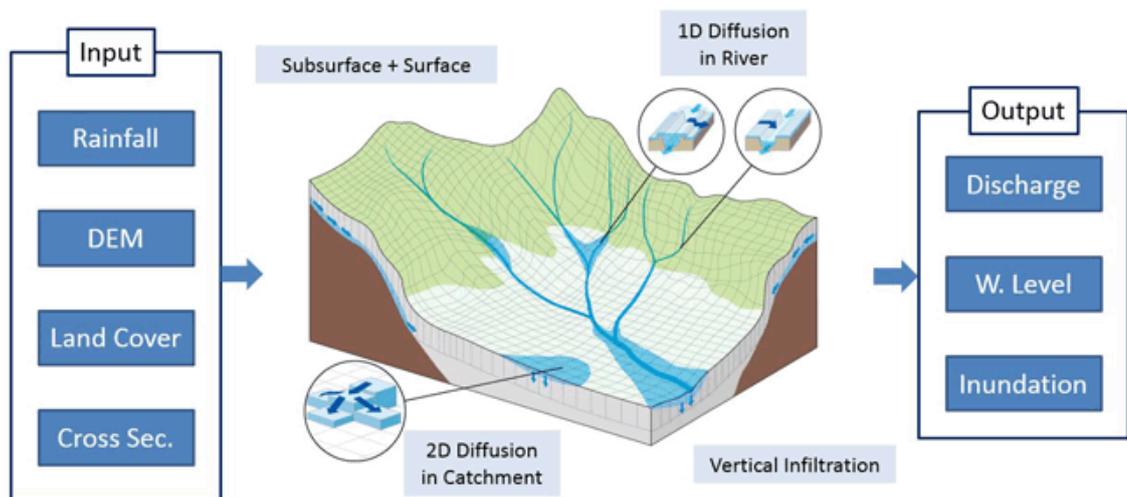
FUENTE: (SENAMHI 2021)

- Modelo de susceptibilidad ante inundaciones, SENAMHI viene implementando el modelo RRI (modelo Lluvia-Escorrentía-Inundación), el cual es un modelo bidimensional capaz de simular lluvia-escorrentía e inundación por inundación simultáneamente (Sayama et al. 2015). El modelo trata las pendientes y los cauces de los ríos por separado. En una celda de cuadrícula en la que se encuentra el canal



de un río, el modelo asume que tanto la pendiente como el río están ubicados dentro de la misma celda de cuadrícula. El canal se discretiza como una sola línea a lo largo de su línea central de la celda de cuadrícula de pendiente suprayacente. El flujo en las celdas de la cuadrícula de pendiente se calcula con el modelo de onda difusiva 2D, mientras que el flujo del canal se calcula con el modelo de onda difusiva 1D. Para obtener mejores representaciones de los procesos lluvia-escorrentía-inundación, el modelo RRI simula también el flujo subsuperficial lateral, el flujo de infiltración vertical y el flujo superficial. El flujo subsuperficial lateral, que suele ser más importante en las regiones montañosas, se trata en términos de la relación descarga-gradiente hidráulico, que tiene en cuenta tanto los flujos subsuperficiales saturados como los superficiales. Por otro lado, el flujo de infiltración vertical se estima utilizando el modelo Green-Ampt. La interacción de flujo entre el cauce del río y la pendiente se estima con base en diferentes fórmulas de desbordamiento, dependiendo del nivel del agua y las condiciones de altura del dique. El proceso metodológico del modelo para la generación de área de inundaciones se presenta a continuación(Sayama et al. 2015).

Figura 4: Esquema metodológico del modelo Rainfall-Runoff-Inundation (RRI).



FUENTE: (Sayama et al. 2015)

- Complementación de los resultados de los modelos con datos de ocurrencia de eventos de inundaciones, datos de sensoramiento remoto (imágenes radar), modelos de clasificación a partir de ocurrencia de eventos y covariables (modelos de predicción de ocurrencia de eventos como *Random Forest*).



a) Imágenes Synthetic Aperture Radar (SAR)

Otra herramienta para analizar las áreas de afectación de peligros de inundaciones son datos de sensoramiento remoto, a través de un catálogo de imágenes Synthetic Aperture Radar (SAR) disponibles de la constelación Copernicus. Sentinel-1 es uno de los mejores para sistemas SAR. En este documento, se considera el método de umbral y el procesamiento multitemporal de las imágenes SAR Sentinel-1.

Se requieren dos conjuntos de imágenes satelitales para detectar la inundación y estimar su extensión. Un conjunto consiste en la imagen adquirida antes del evento y el otro comprende las imágenes adquiridas durante/posterior a la ocurrencia del evento de inundación. La imagen previa generalmente se usa como referencia. Éstas imágenes se pueden usar para buscar y mapear las áreas inundadas (**Anusha y Bharathi 2019**).

Las imágenes SAR comprenden un sistema de percepción remota que no depende de la energía electromagnética del sol o de las propiedades térmicas de la tierra. Los datos satelitales de microondas (SAR) son la herramienta preferida para el mapeo de inundaciones desde el espacio debido a su capacidad de capturar las imágenes tanto de día y de noche, independientemente de las condiciones climáticas.

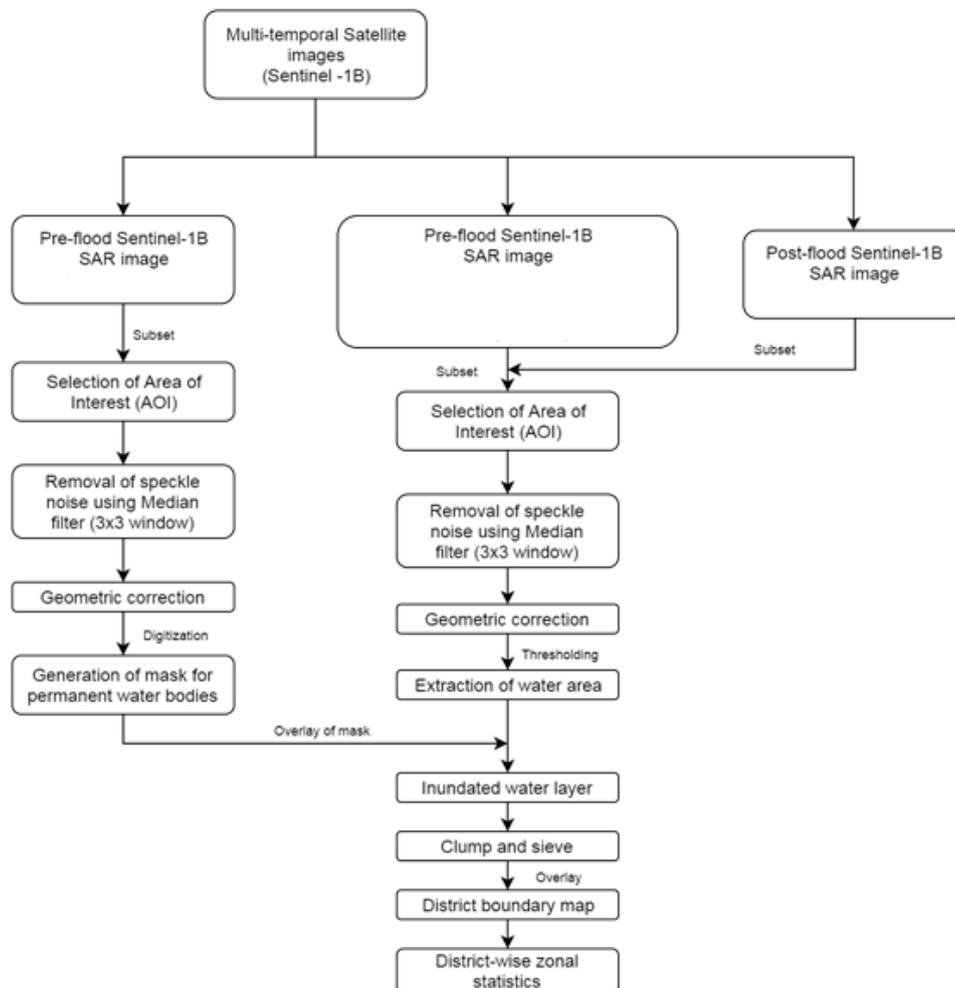
El procedimiento metodológico consta de las siguientes etapas:

- Pre-procesamiento: Las imágenes SAR se degradan por el ruido moteado (speckle noise). La eliminación del “speckle noise” se realiza utilizando un filtro mediano de tamaño de ventana 3x3. Luego, la rectificación geométrica de las imágenes se realiza de imagen a imagen.
- Estimación de la mancha de inundación: a partir de la imagen previa a la inundación, la máscara de agua se genera aplicando la técnica de digitalización. El umbral (Rahman y Thakur 2018) es la técnica aplicada en las imágenes durante la inundación para discriminar los cuerpos de agua y las áreas no acuáticas de la imagen SAR.
- Pos-procesamiento: el mapeo de inundaciones se realiza superponiendo la capa inundada en el mapa a nivel de pixel para el evento del Niño Costero 2017.

El citado procedimiento metodológico se muestra en el siguiente gráfico:



Figura 5: Metodología para procesar datos multitemporales de Sentinel-1B SAR.



b) Recopilación de información cartográfica de medios de vida e infraestructura (medios expuestos)

Consiste en la recopilación de información cartográfica de medios de vida e infraestructura (medios expuestos) dentro de las cuencas prioritarias (descritas en el ítem 3.5).

c) Escenarios de riesgo por inundación

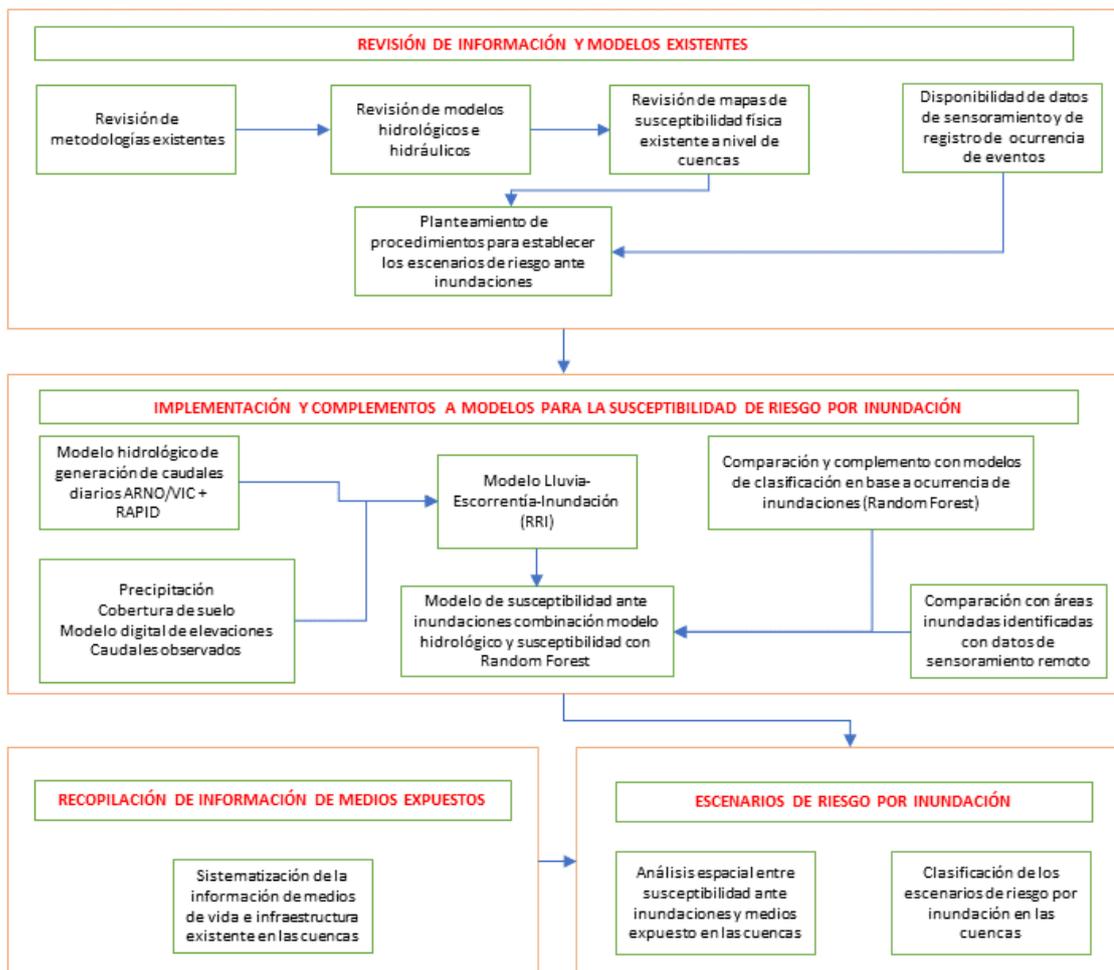
consiste en el proceso de análisis espacial entre las áreas susceptibles a la inundación y los medios de vida e infraestructura existente en la cuenca, para lo cual se deberá realizar las siguientes actividades:

- Identificar las áreas de inundación a partir de los modelos descritos anteriormente, ocurrencia de eventos, datos de sensoramiento remoto para eventos extraordinarios en las cuencas priorizadas.



- Sistematizar la cartografía de medios de vida e infraestructura existente (elementos expuestos) en las cuencas priorizadas.
- Realizar el análisis espacial de superposición de capas entre las áreas susceptibles a inundación con los medios de vida e infraestructura en la cuenca (medios expuestos).
- Las áreas coincidentes serán establecidas como los medios de vida e infraestructura impactada/afectadas ante inundaciones en las cuencas prioritarias.
- Clasificación de los escenarios de riesgo por inundación en las cuencas prioritarias.

Figura 6: Flujo metodológico para la generación de escenario de riesgo de inundación en las cuencas prioritarias.



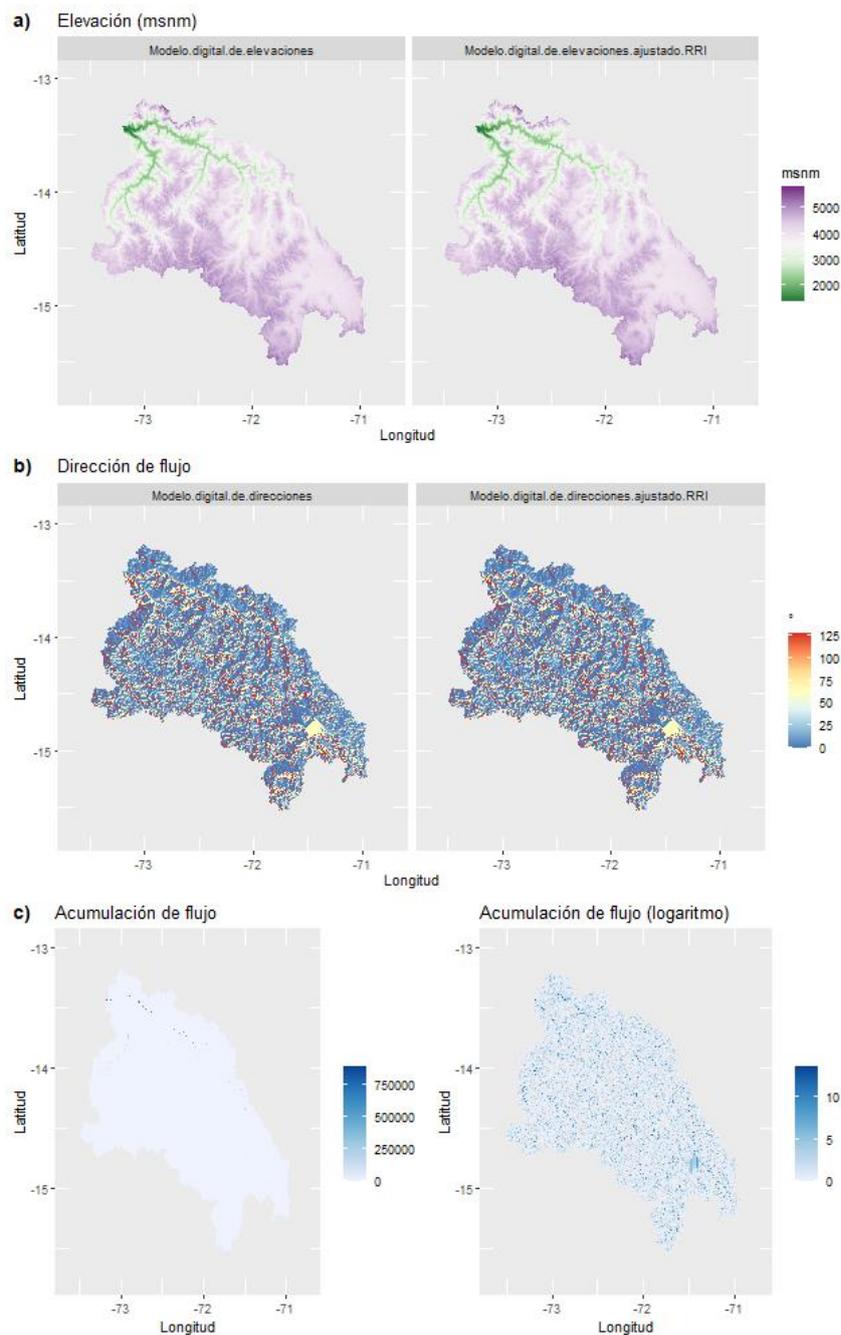


V. Resultados

5.1 Modelo Lluvia-Escorrentía-Inundación (RRI) para la cuenca Alto Apurímac

Para el modelamiento de inundación con RRI se requiere principalmente los datos de topografía (modelo digital del terreno) de la cuenca, variables meteorológicas como la precipitación diaria, cobertura de suelo. En la cuenca Alto Apurímac se realizó el modelamiento para el periodo húmedo del 2017 (enero a marzo) en el cual ocurrió el fenómeno del niño en el territorio peruano.

Figura 7: Representación espacial de las variables topográficas en la cuenca Alto Apurímac.





a) Topografía

Para la representación de la topografía en la cuenca Alto Apurímac se utilizó el modelo digital de elevaciones de la SRTM, con la cual se obtuvieron el modelo digital de orientaciones y acumulación de flujo, además de las correcciones o ajustes para el modelo RRI usando el programa demAdjust2.exe. La representación de la topografía en la cuenca se muestra en la figura 7.

b) Precipitación

Para la representación de la precipitación en la cuenca Alto Apurímac se utilizó el producto PISCO-precipitación de SENAMHI, se generaron estaciones virtuales en cada celda para obtener la lluvia con representación espacial, la asimilación de los datos al modelo RRI se realizó mediante el programa rainThiessen.exe. La representación espacial de las estaciones virtuales en la cuenca se muestra en la figura 8.

Figura 8: Ubicación espacial de las estaciones virtuales en base al producto PISCO-precipitación.

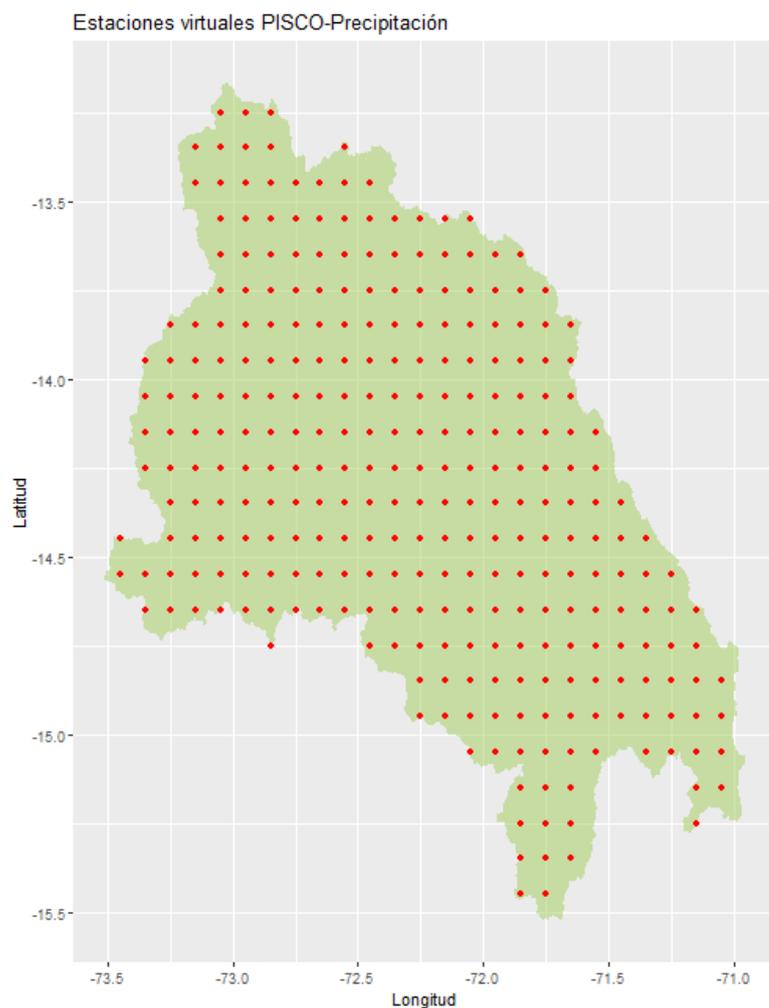
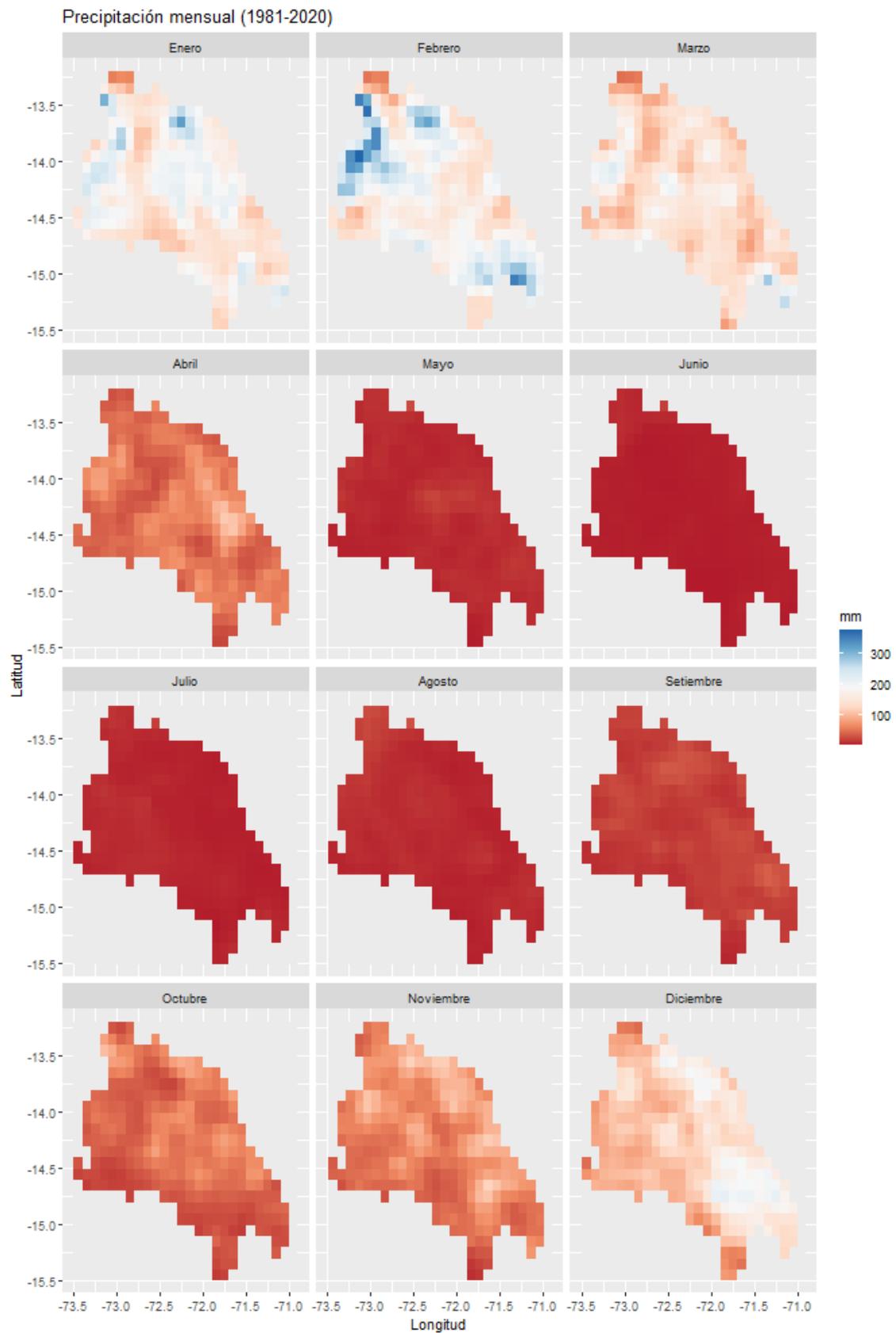




Figura 9: Representación espacial de la precipitación en base al producto PISCO (climatología 1981-2020)





El modelo RRI asimila los datos de lluvia a partir de la ubicación (coordenadas) y el valor de lluvia diaria y horario, en este caso se utilizó la lluvia diaria de enero a marzo de 2017, la representación alfanumérica de los datos se muestra en la figura 10.

Figura 10: Representación de los datos de lluvia diaria asimilados por el modelo RRI para la cuenca Alto Apurímac.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	296														
	lat	-13.2500	-13.2500	-13.2500	-13.3500	-13.3500	-13.3500	-13.3500	-13.3500	-13.4500	-13.4500	-13.4500	-13.4500	-13.4500	-13.4500
	lon	-73.0500	-72.9500	-72.8500	-73.1500	-73.0500	-72.9500	-72.8500	-72.5500	-73.1500	-73.0500	-72.9500	-72.8500	-72.7500	-72.6500
1/01/2017 00:00	0	2.32	2.58	2.33	7.15	4.90	4.18	3.13	5.19	12.51	9.26	5.60	4.10	2.89	3.15
2/01/2017 00:00	86400	3.49	3.88	3.42	11.50	8.10	7.31	5.92	7.36	21.27	16.67	11.54	11.29	11.22	9.41
3/01/2017 00:00	172800	1.89	2.06	1.81	6.23	4.22	3.63	2.79	4.20	11.31	8.38	5.31	4.48	3.88	3.63
4/01/2017 00:00	259200	3.42	3.67	3.10	10.89	7.33	6.04	4.27	5.79	19.26	14.04	8.17	5.45	3.29	3.84
5/01/2017 00:00	345600	2.30	2.69	2.56	6.85	5.04	4.66	3.80	7.18	12.03	9.81	6.65	5.75	4.92	5.05
6/01/2017 00:00	432000	2.70	2.98	2.58	8.61	6.06	5.22	3.87	5.46	15.71	12.15	7.57	5.58	3.91	4.28
7/01/2017 00:00	518400	2.07	2.33	2.10	7.34	5.06	4.63	3.92	4.76	15.13	11.00	7.71	8.31	9.04	7.16
8/01/2017 00:00	604800	1.77	2.06	1.90	5.57	3.94	3.52	2.77	5.26	10.57	7.85	4.97	3.94	3.07	3.51
9/01/2017 00:00	691200	1.78	1.90	1.61	5.75	3.84	3.19	2.30	2.85	10.25	7.44	4.45	3.30	2.44	2.40
10/01/2017 00:00	777600	3.84	3.94	3.14	12.67	8.36	6.69	4.54	5.09	22.39	16.20	9.26	6.02	3.52	3.92
11/01/2017 00:00	864000	2.42	2.69	2.34	7.66	5.42	4.83	3.81	4.52	13.85	10.85	7.32	6.77	6.39	5.49
12/01/2017 00:00	950400	3.97	4.30	3.67	12.83	8.87	7.64	5.78	7.39	23.01	17.59	11.25	9.37	7.94	7.33
13/01/2017 00:00	1036800	5.93	6.38	5.41	19.80	13.37	11.37	8.59	10.46	36.81	26.89	16.91	14.33	12.54	11.25
14/01/2017 00:00	1123200	7.12	7.57	6.27	23.52	16.04	13.53	9.91	11.82	42.69	32.14	19.94	15.68	12.45	11.89
15/01/2017 00:00	1209600	6.40	6.70	5.55	21.26	14.10	11.56	8.28	10.33	38.31	27.68	16.43	12.17	9.06	8.84
16/01/2017 00:00	1296000	3.61	3.94	3.42	11.31	7.82	6.60	4.78	7.14	19.91	15.10	9.04	6.17	3.81	4.49

c) Cobertura de suelo

La representación espacial de la cobertura de suelo se obtuvo del producto MODIS, obtenidos de la plataforma *Google Earth Engine*:

https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD12Q1

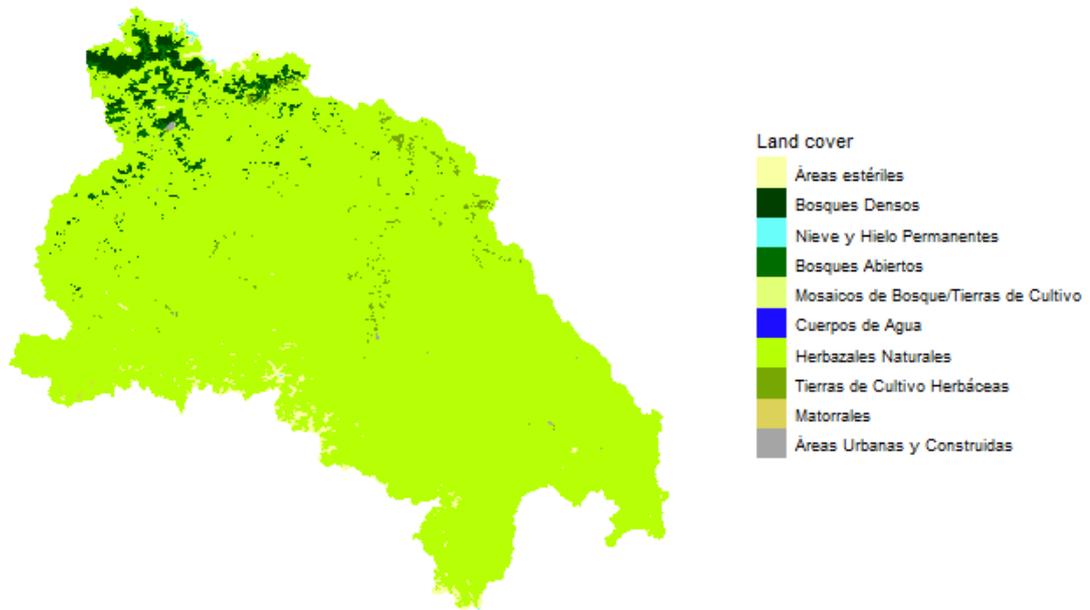
La descripción de los valores del producto se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Descripción de valores de cobertura de suelo.

Valor	Descripción
1	Áreas estériles
2	Nieve y Hielo Permanentes
3	Cuerpos de Agua
9	Áreas Urbanas y Construidas
10	Bosques Densos
20	Bosques Abiertos
25	Mosaicos de Bosque/Tierras de Cultivo
30	Herbazales Naturales
35	Mosaicos de Herbáceas Naturales/Tierras de Cultivo
36	Tierras de Cultivo Herbáceas
40	Matorrales



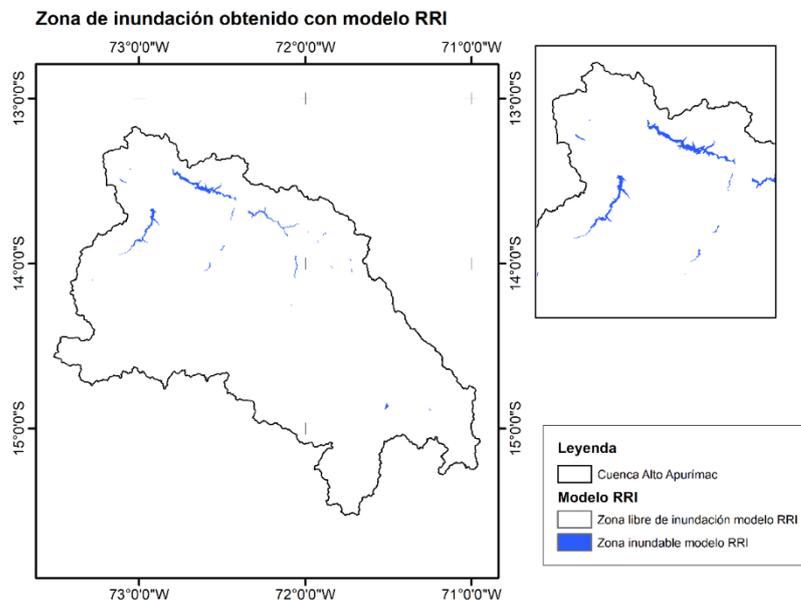
Figura 11: Cobertura de suelo en base al producto MODIS para la cuenca Alto Apurímac.



d) Resultado de inundación en base al modelo RRI

Los resultados obtenidos en base a la precipitación ocurrida en enero a marzo del 2017 para la cuenca del Alto Apurímac se muestran en la figura 12. Se muestra la altura de inundación, así como la clasificación de intensidad la inundación en base a los resultados del modelo RRI.

Figura 12: Resultados del modelo RRI en la cuenca Alto Apurímac. Superior: Altura de inundación en m. Inferior: Intensidad de inundación (clasificación).

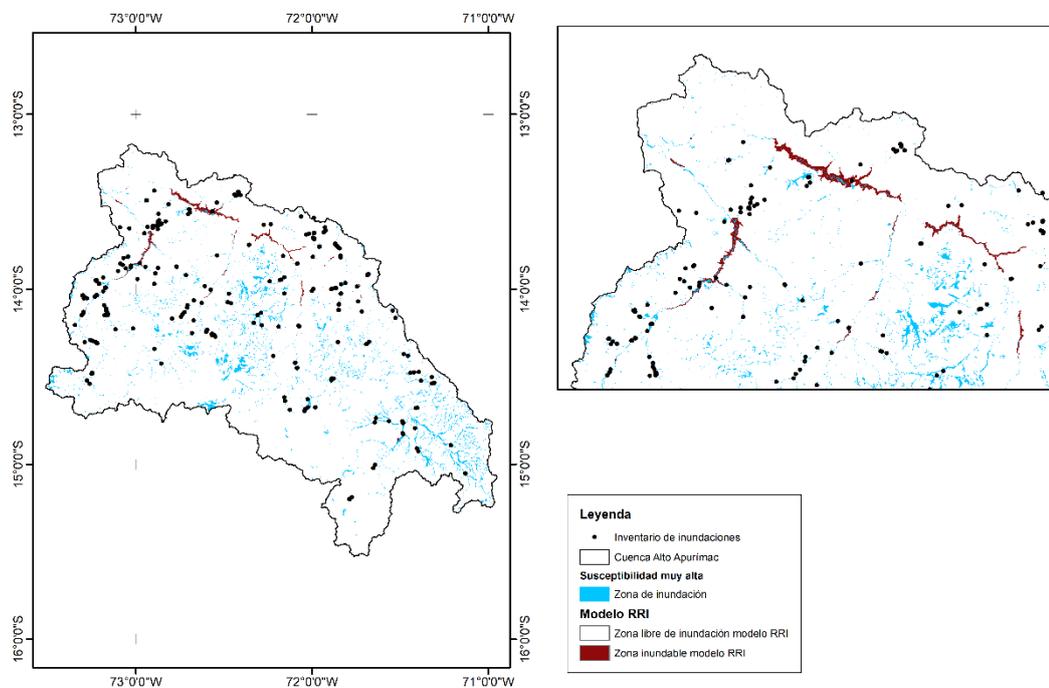




e) Comparación de los resultados de inundación del modelo RRI

Los resultados obtenidos en el modelo de inundación RRI se compararon con los resultados de susceptibilidad proporcionados por CENEPRED, y el inventario de ocurrencia de inundaciones. Se muestran resultados similares en la parte baja de la cuenca (valle), y muchas coincidencias con el inventario de ocurrencia (figura 13). Sin embargo, para complementar los resultados y obtener el modelo de susceptibilidad ante ocurrencia de inundaciones clasificado en riesgo, los resultados del modelo RRI se complementará con un modelo de clasificación usando Random Forest, basado en predictores y el inventario de ocurrencia de inundaciones en la cuenca.

Figura 13: Comparación del área de inundación obtenido por el modelo RRI en relación al modelo de susceptibilidad proporcionado por CENEPRED.



5.2 Modelo de susceptibilidad a inundaciones usando modelo de clasificación Random Forest

Para desarrollar el modelo de clasificación usando *Random Forest* en la cuenca Alto Apurímac se utilizó el inventario de ocurrencia de inundaciones (ver figura 1), y 09 predictores: elevación (EV), pendiente (SL), índice topográfico de humedad (TWI), precipitación diaria extrema (EP), lluvia antecedente con una ventana de 08 días considerando los meses de noviembre-abril: máxima (MAP), índice de vegetación de



diferencia normalizada (NDVI), cobertura de suelo – MODIS (SC), geología (GEOL), geomorfología (GEOM). los cual se detallan a continuación.

a) Predictores

variables de terreno: Elevación: obtenido del catálogo de datos de la plataforma Google Earth Engine (GEE): MERIT Hydro: global hydrography datasets a una resolución espacial de 90 m. Pendiente: obtenido como la primera derivada del modelo digital de elevaciones. Aspecto: obtenido del catálogo de datos de la plataforma Google Earth Engine (GEE): MERIT Hydro: global hydrography datasets a una resolución espacial de 90 m. Geomorfología: obtenido a partir del catálogo de datos del Ministerio del Ambiente (MINAM), en la cual presente 54 unidades geomorfológicas en el territorio peruano.

Variables hidrológicas: El TWI combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de la misma, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como (Sørensen, Zinko, & Seibert, 2006):

$$TWI = \ln \left[\frac{A}{\tan(\beta)} \right]$$

A es el área local drenada para un punto de cálculo, y β , es la pendiente direccional de la celda de interés (y de las 8 vecinas en el caso de utilizar un algoritmo D8).

Variables meteorológicas: Precipitación diaria extrema: obtenido a partir del producto PISCO - precipitación diaria como el máximo extremo diario (1981-2020). Lluvia antecedente (ventana de 08 días (noviembre-abril): obtenido a partir del producto PISCO - precipitación diaria como la sumatoria de precipitación diaria de los últimos ocho días, considerando solo los meses de noviembre a abril (1981-2020).

Variables de cobertura y de suelo: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI): obtenido del producto MOD13A2.006 *Terra Vegetation Indices 16-Day Global* 1km, disponible en el catálogo de datos del GEE. Cobertura de suelo (MODIS): obtenido del producto MCD12Q1.006 *MODIS Land Cover Type Yearly Global* 500m, disponible en el catálogo de datos del GEE. Geología: obtenido de INGEMMET (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>).



Figura 14: Predictores: Pendiente, Máxima precipitación antecedente, precipitación diaria extrema, índice topográfico de humedad en la cuenca Alto Apurímac.

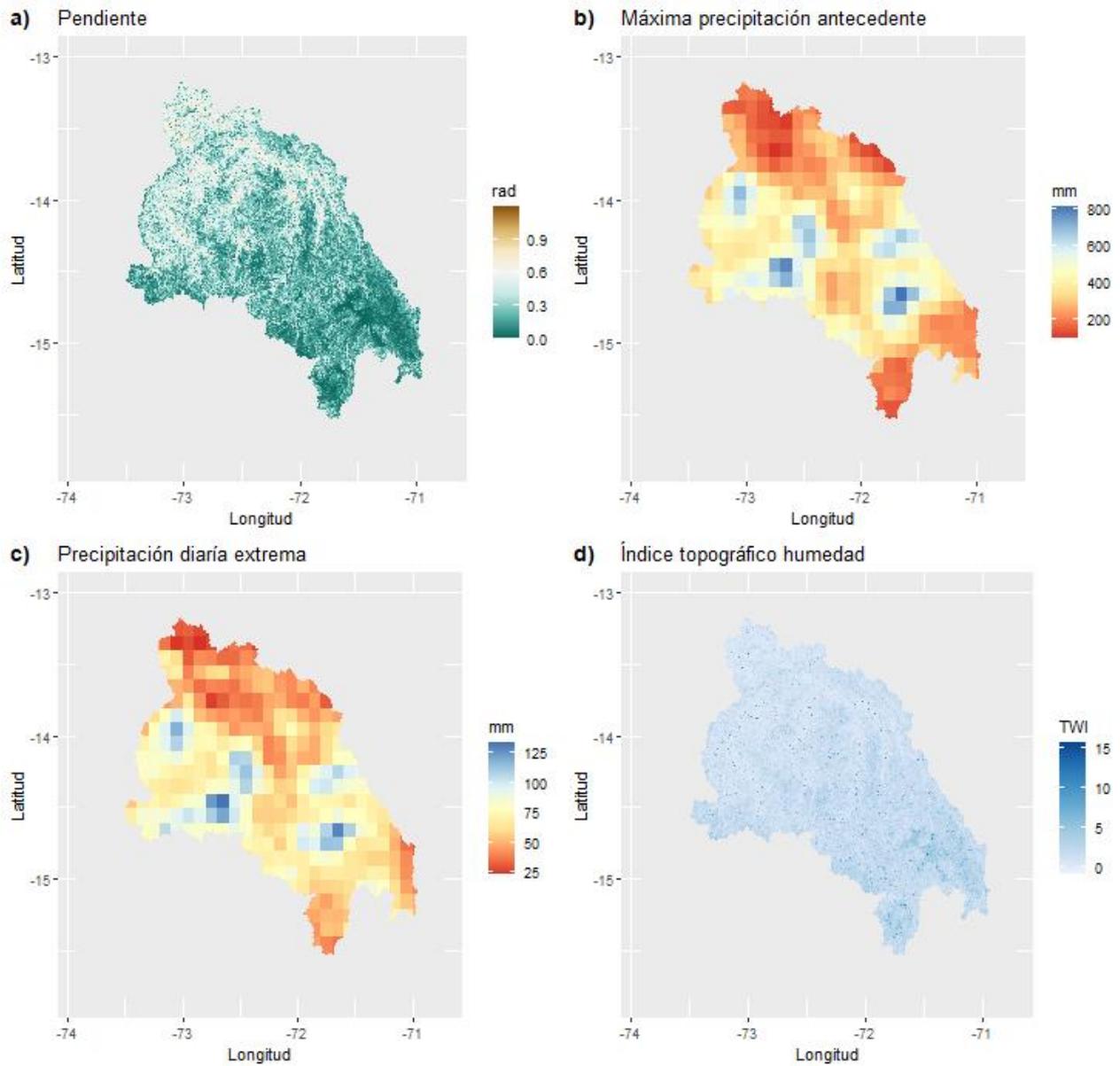
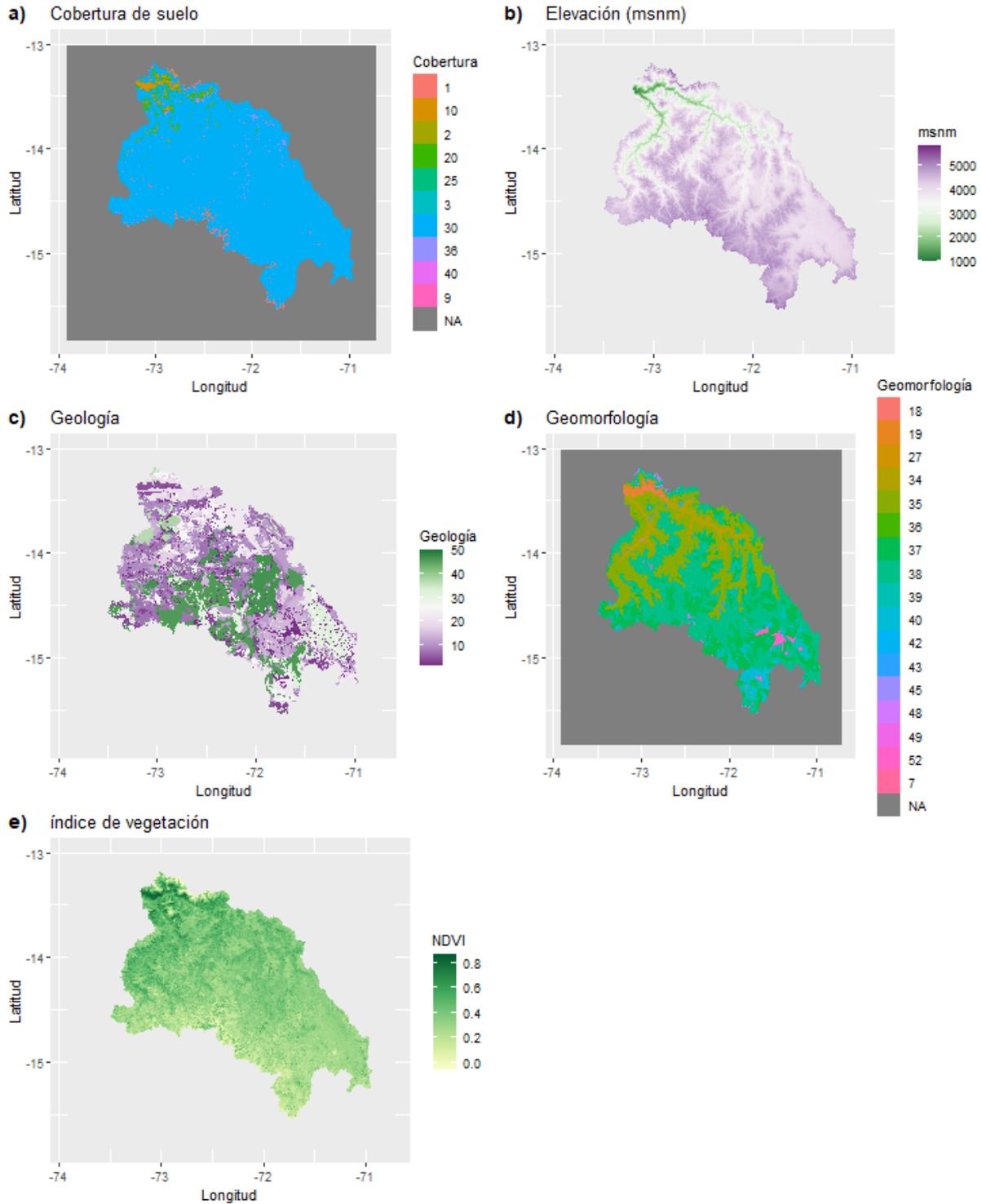




Figura 15: Predictores: Cobertura de suelo, Elevación, Geología, Geomorfología, índice de vegetación de diferencia normalizada en la cuenca Alto Apurímac.





b) Análisis de las ocurrencias de inundación en relación a los predictores

Se realizó el análisis de las ocurrencias de eventos de inundación en base a la ubicación espacial, obteniéndose así los valores correspondientes de cada predictor en dichas ubicaciones. Esto permite identificar las zonas más propensas a inundarse. Las siguientes figuras muestran las relaciones de las ubicaciones con los predictores. La figura 16 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en la parte media de la cuenca (alrededor de los 3000 msnm), correspondiente a registros de emergencias, identificadas como riesgo de inundaciones.

Figura 16: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a su altitud (msnm).

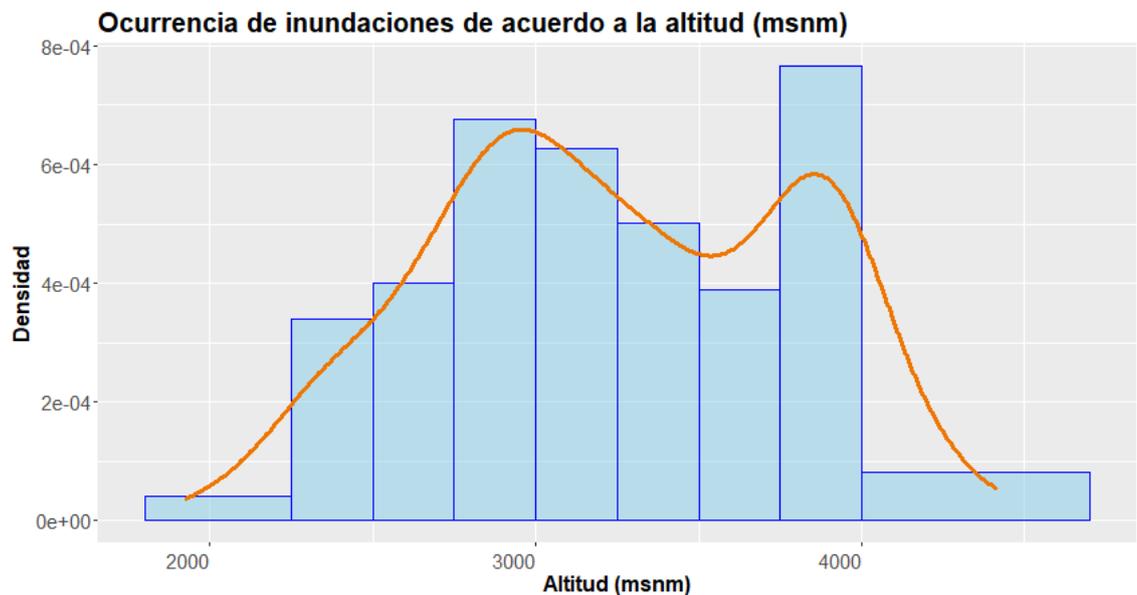
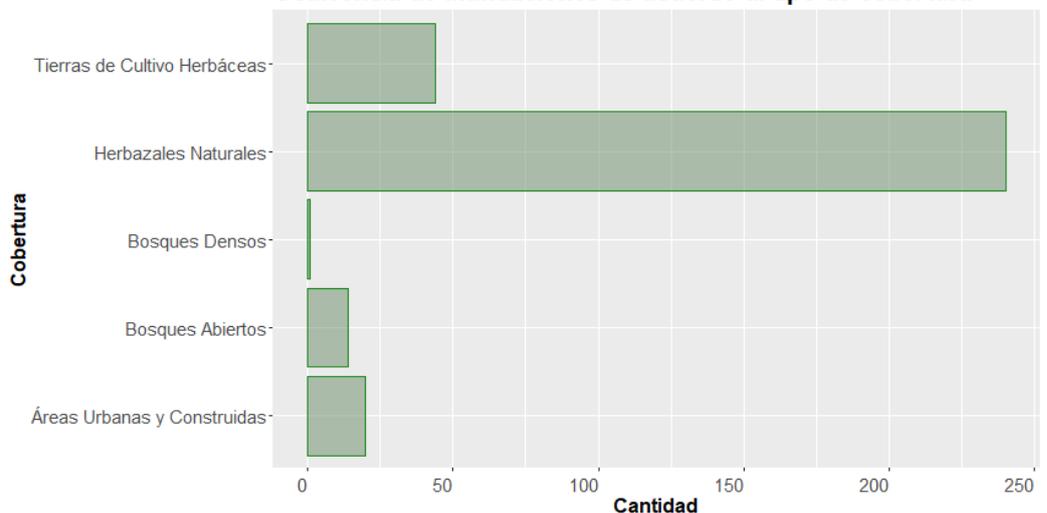


Figura 17: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de cobertura de suelo.

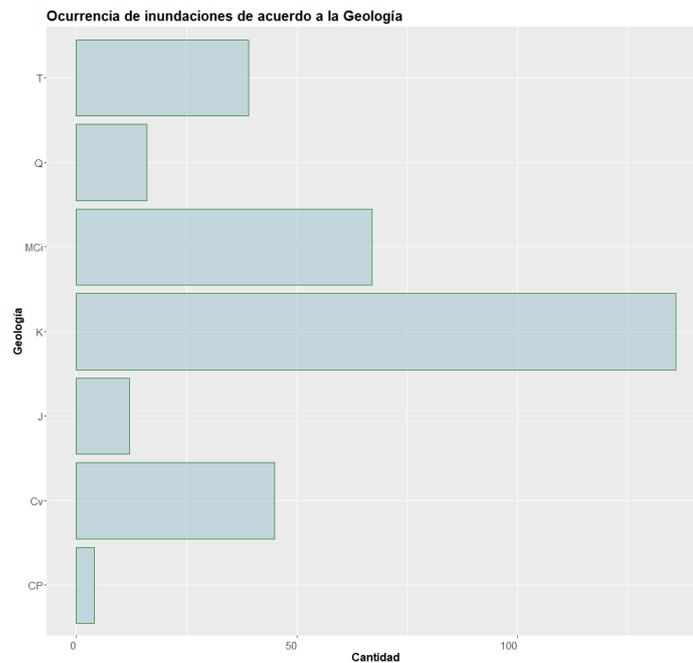




La figura 17 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en las zonas de herbazales naturales, tierras de cultivos con herbazales y áreas urbanas.

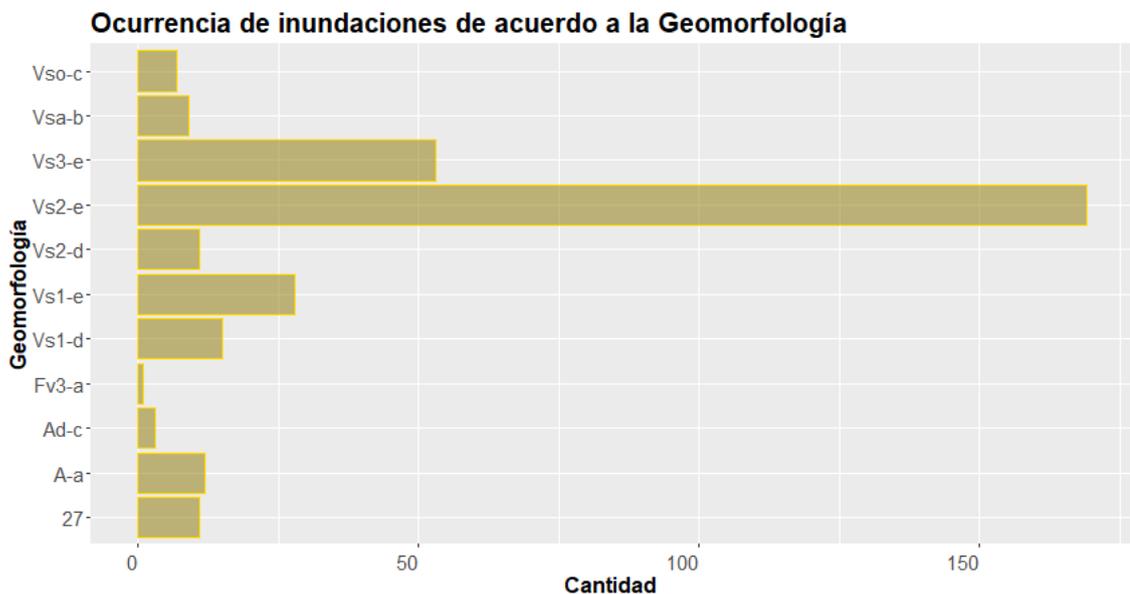
La figura 18 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en las zonas con geología K, MCI, Cv, T.

Figura 18: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de geología.



La figura 19 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en las zonas con geomorfológicas de tipo Vs3-e (elevación de 300 a 1000 m de altura y pendiente mayores), Vs2-e (elevación de 300 a más de 1000m de altura y pendiente).

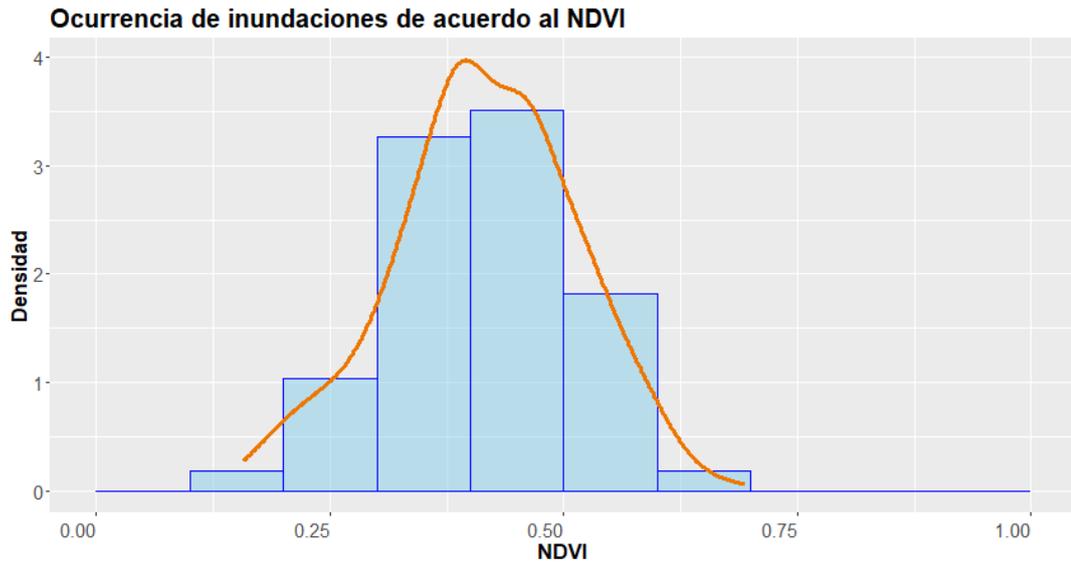
Figura 19: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al tipo de geomorfología.





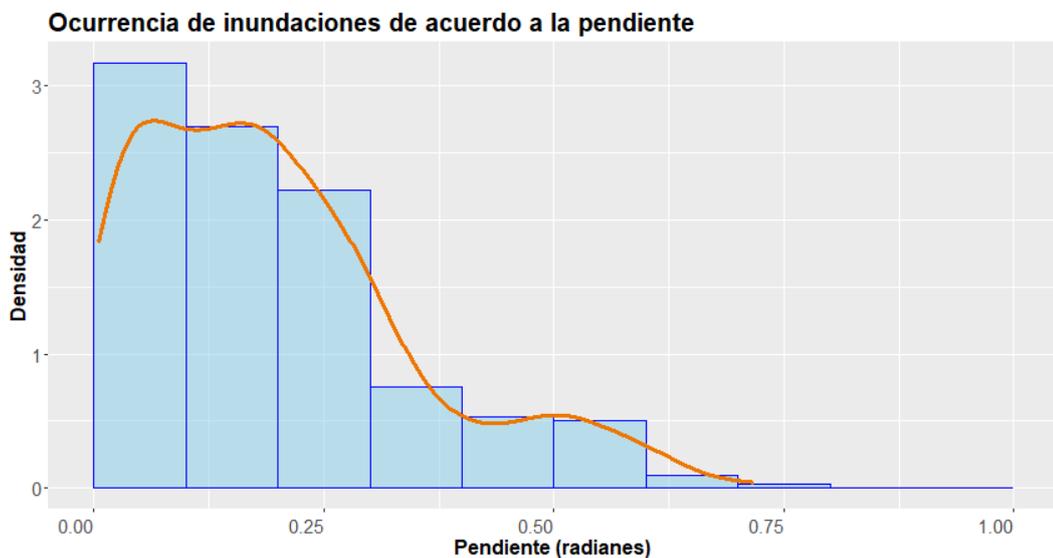
La figura 20 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en las zonas vegetación vigorosa, húmeda, esto se debe a que las zonas inundables se encuentran en los valles de la cuenca, donde se desarrolla la agricultura y también existen herbazales naturales.

Figura 20: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).



La figura 21 muestra que, la mayor cantidad de registro de inundaciones se presentan en zona de baja pendiente, esto es entendible debido a que las zonas inundables se encuentran en los valles de la cuenca, las cuales presentan pendientes suaves. Los datos de ocurrencias de pendientes altas están referidos a las emergencias registradas, puntos críticos de riesgo de inundación.

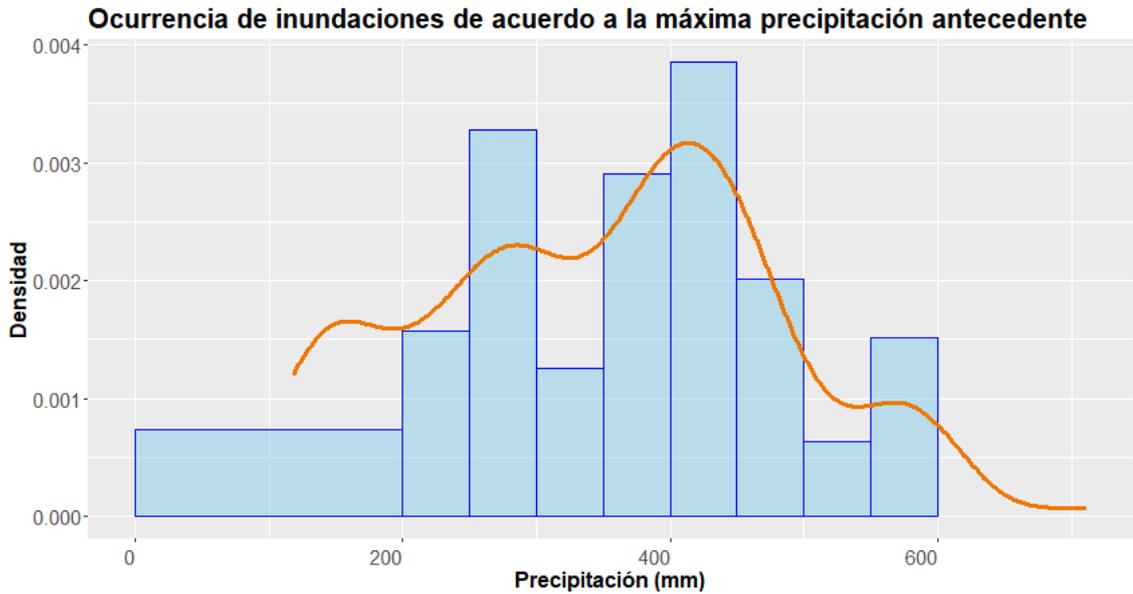
Figura 21: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la pendiente (radianes).





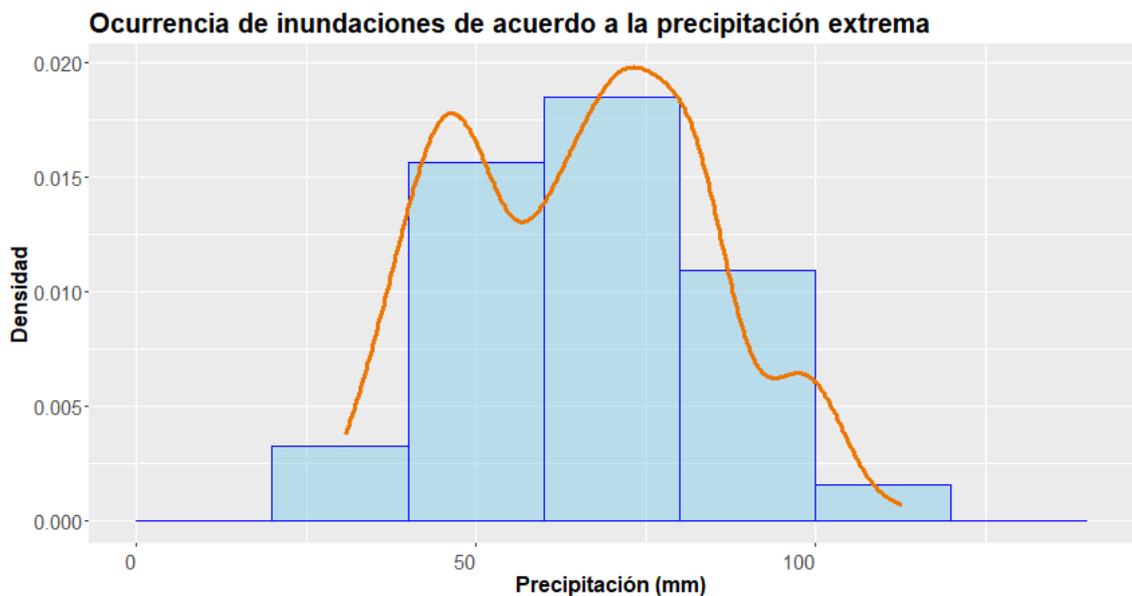
La figura 22 muestra que las mayores ocurrencias se dan entre los 300-400 mm de lluvia antecedente (lo cual estaría haciendo referencia a las zonas inundables de la parte media y baja de la cuenca) (ver figura 13 b, tasa de precipitación en la cuenca).

Figura 22: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la máxima precipitación antecedente.



La figura 23 muestra que las ocurrencias de inundación se dan entre los 50-100 mm de lluvia diaria extrema (lo cual estaría haciendo referencia a las zonas inundables de la parte media y baja de la cuenca) (ver figura 13 c, tasa de precipitación en la cuenca).

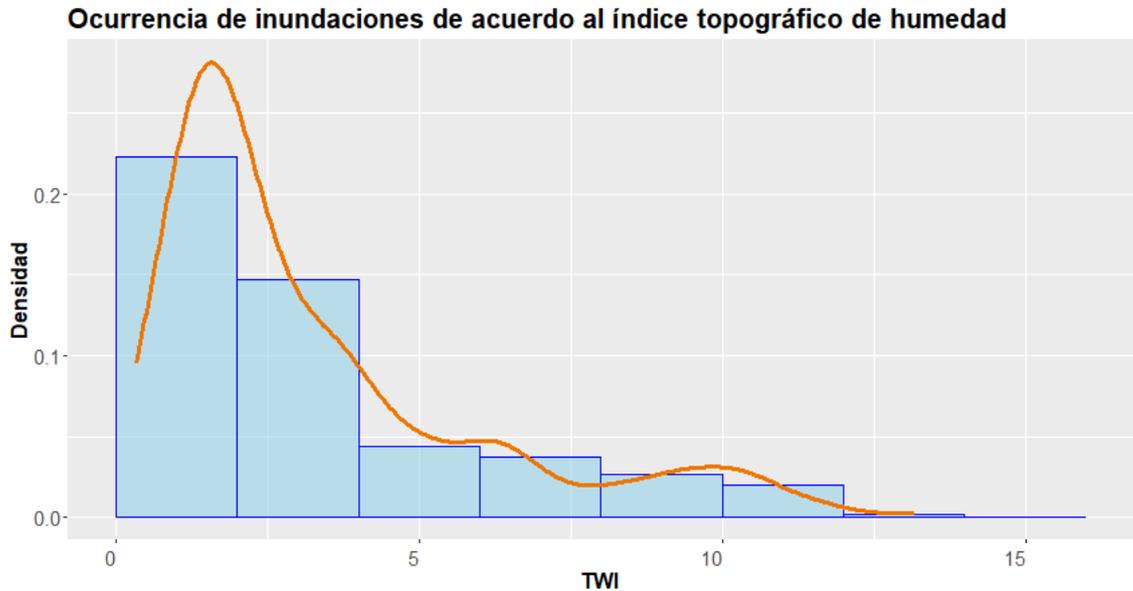
Figura 23: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo a la precipitación extrema diaria.





La figura 24 muestra que, las ocurrencias de inundaciones se presentan en los valores bajos de TWI (correspondientes a zonas que estructuralmente y topográficamente son propicias para la acumulación de humedad).

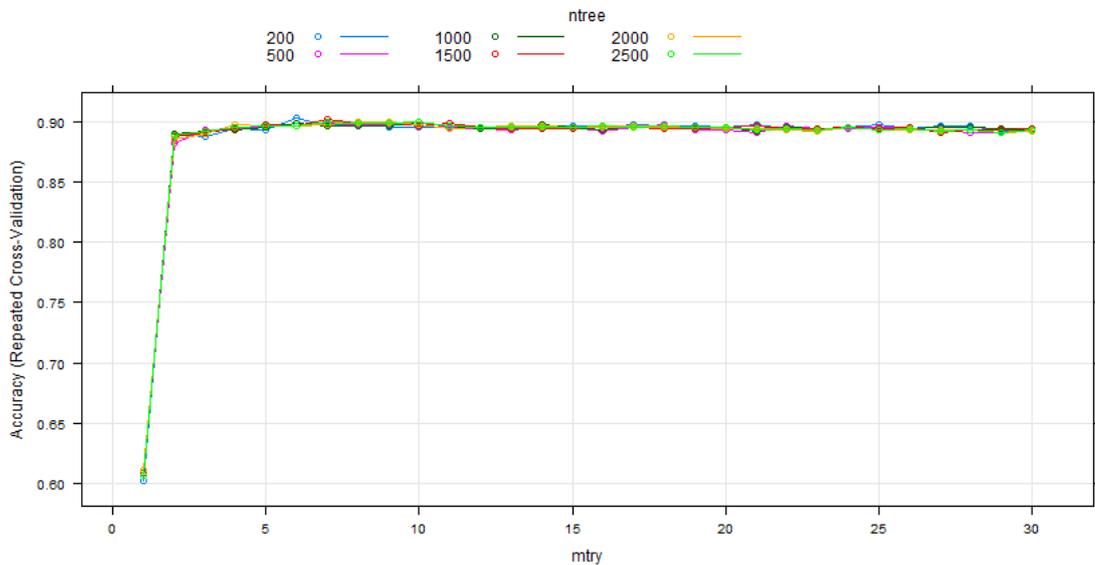
Figura 24: Distribución de las ocurrencias de inundación de acuerdo al índice topográfico de humedad (TWI).



c) Sensibilidad de los parámetros e importancia de los predictores en el modelo

El entrenamiento y la validación de modelos son fundamentales para la aplicación exitosa de los modelos de RF, mtry y ntree son los dos parámetros más importantes que afectan significativamente la precisión del modelo. Por tanto, la validación cruzada se basó en el modelo de RF con 09 predictores para analizar la sensibilidad de los dos parámetros.

Figura 25: Precisión del modelo en función de los parámetros que se utilizaron en el modelo de RF (mtry y ntree son dos parámetros importantes del modelo de RF).

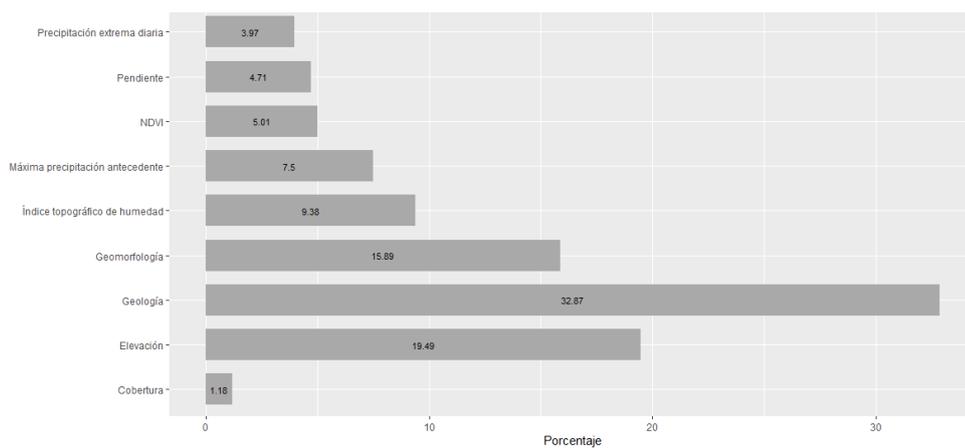




La Figura 25 muestra la verificación del *mtry* y *ntree* óptimos comparando la precisión del modelo con los datos de entrenamiento (80 % de los datos). La precisión aumenta con la cantidad de *mtry*, teniéndose un valor óptimo con 10, el valor de *ntree* no muestra una variación significativa, los mejores parámetros fueron utilizados para el modelo RF (*mtry* 6, *ntree* 200).

El modelo RF puede medir la importancia de una característica e incorporarla a los resultados finales. El modelo puede evaluar la contribución relativa de cada factor permutando los valores de cada característica en cada observación en el conjunto de datos y midiendo cuánto peor se vuelve el MSE después de la permutación. La Figura 26 muestra las contribuciones relativas de cada variable de entrada a la susceptibilidad a las inundaciones.

Figura 26: Importancia relativa de los factores de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones en la cuenca Alto Apurímac.



d) Resultado de susceptibilidad de inundación en base al modelo *Random Forest*

Los resultados obtenidos en base al modelo de clasificación con *Random Forest* en base al inventario de ocurrencia de eventos de inundación, y variables predictoras se muestran en la figura 27. Se muestra la susceptibilidad a ocurrencia de inundación, así como la clasificación de susceptibilidad de ocurrencia de inundación en base a los resultados del modelo de clasificación con *Random Forest*. La clasificación se realizó de acuerdo a la distribución de los valores de susceptibilidad dentro de la cuenca de estudio, teniendo en cuenta las ocurrencias de inundaciones, en el caso de la cuenca Alto Apurímac se ha tomado el valor de 0.75 como punto de corte, donde los que se encuentran por encima de dicho valor representan susceptibilidad alta y muy alta (zona de inundación obtenido por



el modelo RRI), esto referido a que capture la mayor cantidad de ocurrencias registradas, la tabla que muestra la cantidad de ocurrencias por cada clase se muestran en la tabla 5. La clasificación inicial se muestra en la tabla 4, a esta clasificación la clase muy alta fue reemplazada por los resultados obtenidos con el modelo hidrológico de inundación RRI.

Tabla 4: Clasificación de los valores de susceptibilidad.

Susceptibilidad	Clasificación
0-0.4	Muy bajo
0.4-0.6	Bajo
0.6-0.75	Medio
0.75-0.9	Alto
0.9-1.0	Muy alto

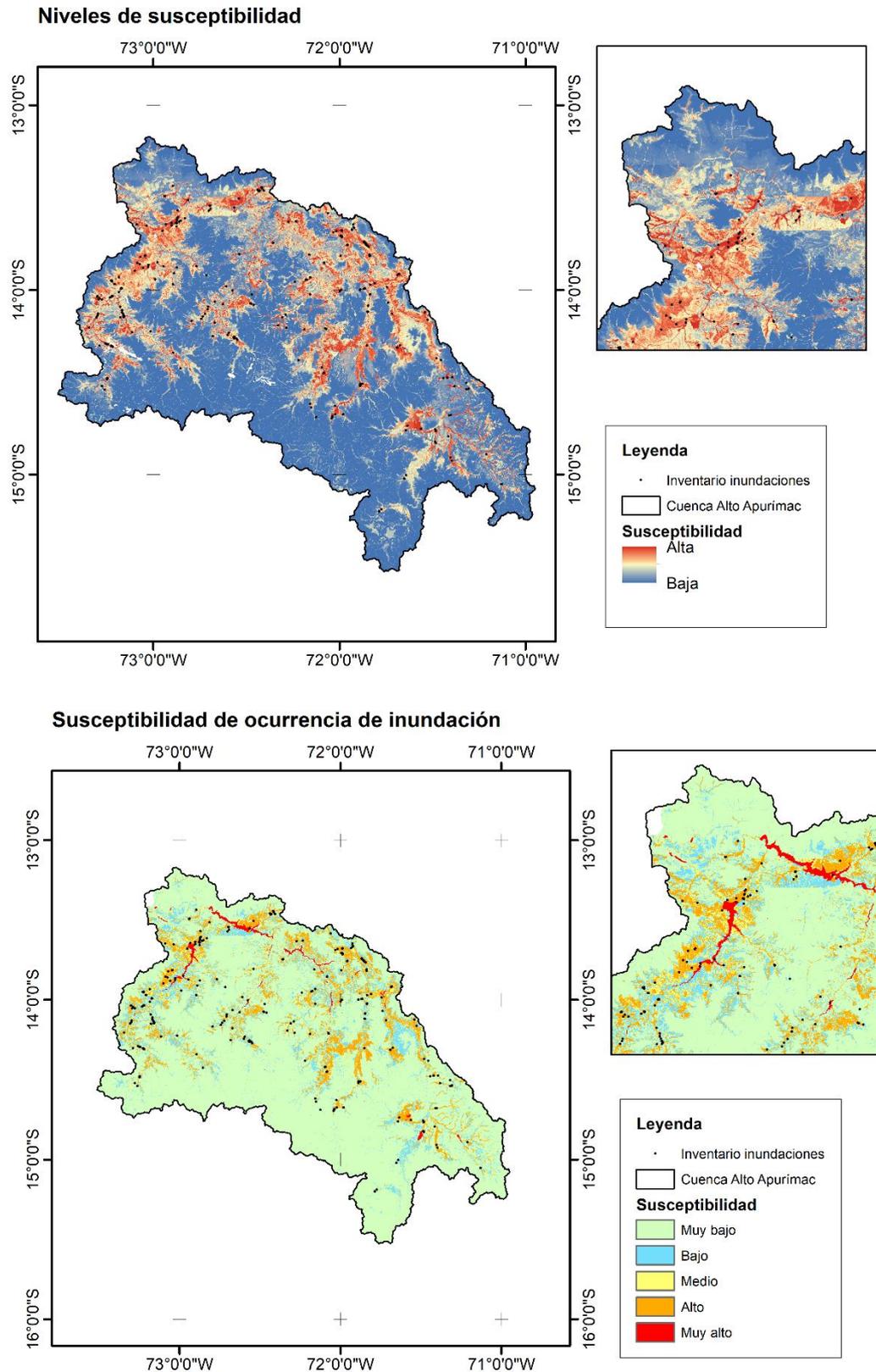
Tabla 5: Clasificación de ocurrencias de inundación de acuerdo a los resultados del modelo de susceptibilidad para la cuenca Alto Apurímac

Susceptibilidad	Ocurrencias	Porcentaje
Muy baja	8	2.51%
Baja	6	1.88%
Media	14	4.39%
Alta	283	88.71%
Muy alta	8	2.51%

La tabla 5 muestra la cantidad y porcentaje de ocurrencias de inundación registradas de acuerdo a la clasificación de susceptibilidad generado por el modelo desarrollado (RRI+ Random Forest), se aprecia que modelo RRI captura el 2.51 % de los registros, esto teniendo en cuenta que el modelo RRI define la huella de inundación para un evento extraordinario seleccionado (fenómeno del niño 2017), el modelo complementario Random Forest captura la susceptibilidad de acuerdo a las ocurrencias como registros de inundaciones, emergencias registradas, identificados como puntos críticos de riesgo de inundación, por lo cual el modelo Random Forest complementa al modelo RRI logrando clasificar la mayor cantidad de registros (283 en total para un 88.71%). Teniendo en cuenta la priorización de las zonas con riesgo alto y muy alto el modelo desarrollado contempla el 91.2% de las ocurrencias registradas.



Figura 27: Resultados del modelo de clasificación Random Forest en la cuenca Alto Apurímac. Superior: Susceptibilidad de inundación en probabilidad. Inferior: Susceptibilidad clasificada de inundación.





VI. Análisis de elementos expuestos

Para el análisis de elementos expuestos, se realizó la consolidación de la zona de inundación (obtenido por el modelo RRI) y el modelo de susceptibilidad usando *Random Forest*, en el cual la zona identificada como zona de inundación corresponde a susceptibilidad muy alta de inundación. En base a esta clasificación se realizó el análisis espacial (superposición geográfica para identificar en cual zona de susceptibilidad se encuentra cada elemento dentro de la cuenca Alto Apurímac), identificando la siguiente vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Líneas de transmisión

Tabla 6: Vulnerabilidad de las líneas de transmisión en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Km
Muy bajo	443.56
Bajo	112.81
Medio	80.94
Alto	141.87
Muy alto	63.57

Red vial

Tabla 7: Vulnerabilidad de la red vial en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Km
Muy bajo	5,379.60
Bajo	1,838.33
Medio	1,312.04
Alto	3,340.20
Muy alto	228.00

Otra infraestructura vial

Tabla 8: Vulnerabilidad en otra infraestructura vial en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Otra infraestructura vial
Muy bajo	25
Bajo	19
Medio	11



Alto	102
Muy alto	22

Fuente: INEI (2017)

Tabla 9: Vulnerabilidad de manzanas urbanas en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Viviendas	HAS	Población
Muy bajo	11,737	340.56	31,389
Bajo	7,708	201.57	20,571
Medio	9,844	195.20	25,998
Alto	55,070	2,564.27	149,879
Muy alto	464	53.30	1,119

Instituciones educativas

Tabla 10: Vulnerabilidad de las instituciones educativas en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Instituciones	Alumnos
Muy bajo	399	17,744
Bajo	217	10,405
Medio	223	7,127
Alto	1,286	69,206
Muy alto	26	1,011

Establecimientos de salud

Tabla 11: Vulnerabilidad de la zona agraria vial en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Unidades
Muy bajo	62
Bajo	27
Medio	39
Alto	268
Muy alto	4

Centros poblados

Tabla 12: Vulnerabilidad de los centros poblados en la cuenca Alto Apurímac.



Vulnerabilidad	Poblados	Población	Viviendas
Muy bajo	2,518	88,813	27,534
Bajo	683	23,239	7,978
Medio	631	32,276	10,945
Alto	2,071	276,882	83,119
Muy alto	68	4,325	1,396

Transporte aéreo

Tabla 13: Vulnerabilidad del transporte aéreo en la cuenca Alto Apurímac.

Nombre	Tipo	Vulnerabilidad
Aeródromo Yauri	Aeródromo	Muy bajo
Helipuerto Las Bambas	Helipuerto	Alto
Helipuerto Diospi Suyana	Helipuerto	Medio

Agencias bancarias

Tabla 14: Vulnerabilidad de agencias bancarias en la cuenca Alto Apurímac.

Vulnerabilidad	Bancos
Muy bajo	4
Medio	1
Alto	15

Centrales hidroeléctricas

Tabla 15: Vulnerabilidad de centrales hidroeléctricas en la cuenca Alto Apurímac.

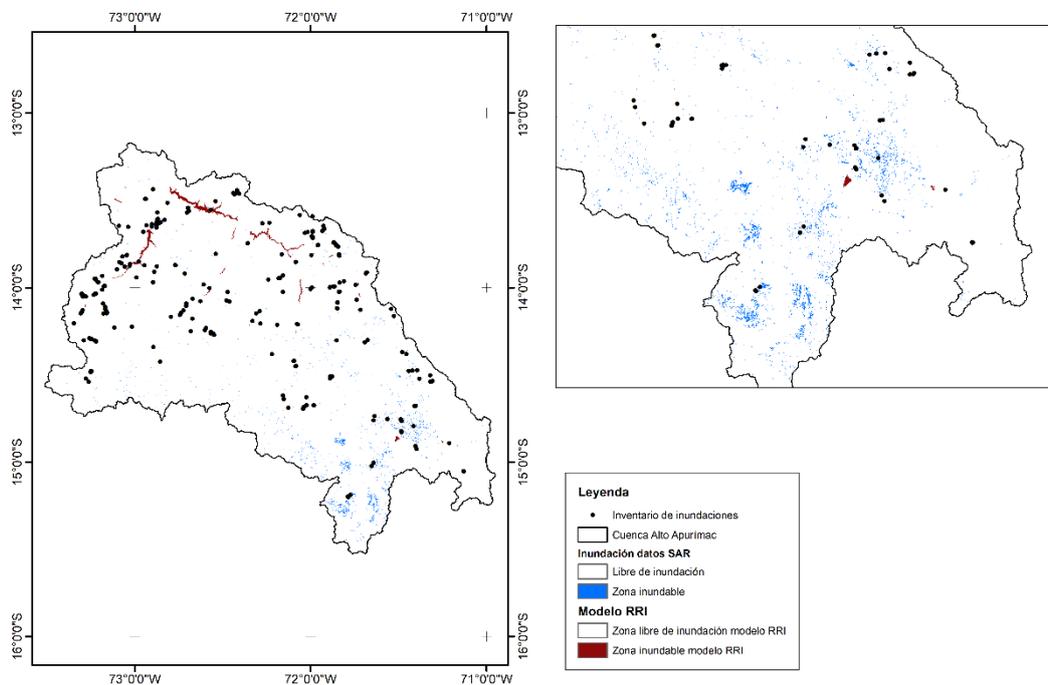
Vulnerabilidad	Nombre	Empresa
Muy bajo	Huayllacho	Sn Power
Muy bajo	San Ignacio	Sn Power
Muy bajo	San Antonio	Sn Power
Alto	Chalhuanca	Electro Sur Este
Alto	Vilcabamba	Electro Sur Este
Alto	Mancahuara	Electro Sur Este
Muy alto	Matara	Electro Sur Este



VII. Análisis de imágenes SAR

Para el análisis de las imágenes SAR, se seleccionaron las imágenes entre el 19 y 26 de enero como condiciones previas a la inundación, las imágenes entre el 12 y 19 de febrero como condiciones posteriores a la inundación, ya que entre el 27 de enero y 11 de febrero se registraron las fuertes precipitaciones en el territorio peruano debido al niño costero. Los resultados obtenidos y la comparación con la zona de inundación obtenida por el modelo RRI para la cuenca Alto Apurímac se muestran en la siguiente figura.

Figura 28: Comparación del área de inundación obtenido por el modelo RRI en relación a las imágenes SAR para la cuenca Alto Apurímac.



Los resultados obtenidos en el modelo de inundación RRI se compararon con el resultado del análisis de imágenes SENTINEL 1A previa y posterior a las lluvias ocurridas durante el fenómeno del niño costero. Se muestran resultados similares en la parte media y alta de la cuenca. Sin embargo, para complementar los resultados y obtener el modelo de susceptibilidad ante ocurrencia de inundaciones clasificado en riesgo, los resultados del modelo RRI se complementará con un modelo de clasificación usando Random Forest, basado en predictores y el inventario de ocurrencia de inundaciones en la cuenca.



VIII. Anexos

- INFORME: contiene el presente informe en versión PDF y Word, actas de reuniones
- TABLAS: contiene los archivos Excel de datos (caudales, ocurrencias, otros)
- FIGURAS: contiene las figuras generadas para el informe
- SHAPE: contiene los archivos shapefile del análisis de elementos expuestos y el modelo de susceptibilidad en formato vectorial.
- ANEXO: contiene los mapas de visualización en formato pdf, además de las siguientes carpetas adicionales
- MODELO: contiene los resultados del modelo de inundación y modelo de susceptibilidad en formato TIF.
- OCURRENCIAS: contiene el shapefile de ocurrencia de eventos de inundaciones
- PREDICTORES: contiene los archivos de predictores usados en el modelo *Random forest*.
- PRE_PROCESO: contiene los mapas utilizados para el modelo RRI.
- PISCO: contiene los datos de precipitación en formato netcdf de SENAMHI.
- SAR: resultados del análisis de los datos SAR.
- BIBLIOGRAFÍA: contiene los documentos de consulta durante el desarrollo de la consultoría.



IX. Referencias bibliográficas

- Alam, A; Bhat, MS; Ahmad, HF; Ahmad, B; Ahmad, S; Sheikh, AH. 2018. Flood risk assessment of Srinagar city in Jammu and Kashmir, India. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment* 6(1):102-116.
- Arabameri, A; Rezaei, K; Cerdà, A; Conoscenti, C; Kalantari, Z. 2019. A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran (en línea). *Science of the Total Environment* 660:443-458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.021>.
- Aybar, C; Fernández, C; Huerta, A; Lavado, W; Vega, F; Felipe-Obando, O. 2020. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day (en línea). *Hydrological Sciences Journal* 65(5):770-785. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>.
- Bui, DT; Khosravi, K; Li, S; Shahabi, H; Panahi, M; Singh, VP; Chapi, K; Shirzadi, A; Panahi, S; Chen, W; Bin Ahmad, B. 2018. New hybrids of ANFIS with several optimization algorithms for flood susceptibility modeling. *Water (Switzerland)* 10(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/w10091210>.
- Joshi, V; Kumar, K. 2006. Extreme rainfall events and associated natural hazards in Alaknanda valley, Indian Himalayan region. *Journal of Mountain Science* 3(3):228-236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-006-0228-0>.
- Nguyen, VP; Pham, DH; Bui, PD; Bui, NT; Nguyen, DVA. 2021. Research the Possibility of Using Sea Sand in Roadbed Construction in Vietnam. *International Journal of GEOMATE* 20(77):123-131. DOI: <https://doi.org/10.21660/2020.77.47890>.
- Samanta, S; Pal, DK; Palsamanta, B. 2018. Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model (en línea). *Applied Water Science* 8(2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0710-1>.
- Sayama, T; Tatebe, Y; Iwami, Y; Tanaka, S. 2015. Hydrologic sensitivity of flood runoff and inundation: 2011 Thailand floods in the Chao Phraya River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15(7):1617-1630. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1617-2015>.
- SENAMHI. 2021. Estudio de modelamiento hidrológico a paso diario a nivel nacional para el monitoreo de potenciales inundaciones. .
- SENAMHI. 2022. Inventario de datos de eventos de inundaciones del Perú. .



Wagner, K. 2007. Mental models of flash floods and landslides. *Risk Analysis* 27(3):671-682. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00916.x>.



Av. Del Parque Norte 313 - 319. San Isidro Lima - Perú
Central Telefónica: (051) 2013550

<https://www.gob.pe/cenepred>

 CENEPRED

 @CENEPRED

 CENEPRED

 CENEPRED PERU