


Artículo original


ZONAS DE VULNERABILIDAD Y PELIGROS AMBIENTALES EN LA CUENCA DEL RÍO MOQUEGUA

AREAS OF VULNERABILITY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS IN THE MOQUEGUA RIVER BASIN

NAYSHA MISHELL NINA DILAS¹

 <https://orcid.org/0000-0003-3452-6767>

CARMEN ROSA ROMÁN ARCE²

 <https://orcid.org/0000-0003-1601-1794>

Recibido: 22/12/2021

Aceptado: 15/03/2022

Publicado: 5/05/2022

^{1,2} Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Privada de Tacna. Tacna, Perú

E-mail: ¹ mishelln.d@hotmail.com, ² carromana@virtual.upt.pe

Resumen

La investigación tiene como objetivo evaluar las zonas de vulnerabilidad y peligros ambientales identificados en la cuenca del río Moquegua mediante un modelamiento geoespacial. La evaluación de peligros, según Crepani y et al. (2001), consiste en realizar mapas temáticos mediante un análisis de factores, ponderación de atributos y álgebra de mapas. Los resultados obtenidos muestran que el río Moquegua presenta niveles de amenazas por deslizamientos e inundaciones en niveles muy alto, alto, moderado y bajo. La vulnerabilidad ambiental de la cuenca se determinó mediante la relación entre zonas de vulnerabilidad ambiental y peligros al integrar los mapas de amenazas identificadas en el área de estudio. Se obtuvo un grado muy alto, significando que la ocurrencia de inundaciones o deslizamiento tienden a ser más susceptibles frente a actividades antropogénicas o de contaminación en la cuenca, observándose que existe un peligro alto cerca de la microcuenca. En época de avenidas, existe la probabilidad de que ocurra un desbordamiento, pudiendo afectar a la población cercana.

Palabras clave: Deslizamientos; inundaciones; vulnerabilidad ambiental.

Abstract

The objective of the research is to evaluate the vulnerability zones and environmental hazards identified in the Moquegua river basin through geospatial modeling. The evaluation of hazards was carried out according to Crepani et al. (2001), which consists on making thematic maps through factor analysis, attribute weighting and map algebra. The results obtained show that the Moquegua River has very high, high, moderate and low levels of landslide and flood hazards. The environmental vulnerability of the basin was determined by the relationship between environmental vulnerability zones and hazards, and by integrating the hazard maps identified in the study area. A very high degree was obtained, which means that the occurrence of floods or landslides tends to be more susceptible to anthropogenic activities or contamination in the basin, and that there is high danger near the micro-watershed. In times of flooding, there is a probability of overflowing, which could affect the nearby population.

Keywords: Landslides; floods; environmental vulnerability.

1. Introducción

El cambio climático en los últimos tiempos se ha acentuado en todas partes del planeta afectando a las poblaciones más vulnerables, siendo grave en países en desarrollo, tanto es así que para el 2023, más de 100 millones de personas caerán en la pobreza a consecuencia de ella (Hallegatte et al., 2016), ningún nivel de mitigación protegerá a las personas vulnerables de los países en desarrollo de los mayores riesgos del cambio climático a que se ven enfrentados en la actualidad, ni del calentamiento global en que está afectando el mundo Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2007). La frecuencia de desastres naturales como inundaciones, sequías, ciclones y terremotos está aumentando tanto en América Latina y el Caribe (ALC) como en el resto del mundo. Durante los años de 1960 y 1970, ocurrieron menos de 20 desastres por año. En la década de 2000, el promedio aumentó a 50 desastres por año. Si bien los desastres naturales son menos fatales, se vuelven más costosos (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2020).

Según Santillán et al. (2005) en el Perú las principales amenazas están relacionadas con la ocurrencia de sismos, deslizamientos, inundaciones, aluviones, sequías y heladas; en menor grado las erupciones volcánicas y tsunamis. Sin embargo, estas amenazas no son las mismas en todas las regiones. Esta condición de susceptibilidad del país hace que los fenómenos destructivos tengan un mayor impacto; por ejemplo, en aquellas zonas de deforestación, las sequías tienen un mayor impacto, a diferencia de las zonas que han incorporado medidas que no perjudiquen el ambiente. Algunas regiones, como Moquegua, están expuestas a los efectos de los peligros generados por fenómenos de origen natural. Debido a su ubicación en el llamado *Anillo de Fuego del Pacífico*, es susceptible a terremotos, tsunamis y actividad volcánica. Asimismo, por ser una zona tropical y subtropical de la costa, los peligros naturales se incrementan con el cambio climático; por ejemplo, el fenómeno El Niño, lluvias intensas, inundaciones, sequías, heladas, granizadas, vientos fuertes, entre otros. También se encuentra expuesto a fenómenos geológicos adversos como ocurrencia de deslizamientos, huaicos debido a su morfología. A nivel regional, existen otro tipo de peligros relacionados con las diversas actividades provocadas por la actividad humana, estos incluyen incendios, explosiones, contaminación ambiental, entre otros.

En el año 2020, un informe del Instituto de Defensa Civil (INDECI) reportó fuertes precipitaciones pluviales en el distrito de Samegua ubicada en la región Moquegua, que produjo el desborde del Río Tumilaca, el cual tuvo efectos serios sobre vías vecinales, canales de riego, bocatomas, redes de agua; así mismo este evento tuvo efectos significativos en el distrito de Torata debido al incremento del caudal del río Tumilaca y su posterior desborde ocasionó la activación de las quebradas, afectando medios de vida, infraestructura de los canales de riego y bocatomas.

Eventos similares han ocurrido en diversos años, afectando incluso la ciudad de Moquegua, que es la capital de la región, al respecto en un informe técnico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2020), indica que existe antecedentes de erosión fluvial y zonas afectadas por inundación en el Río Tumilaca, el cual está comprendido en el tramo de Samegua y la ciudad de Moquegua, estos eventos de movimiento de masa fueron registrados en los años 1997, 2015, 2016, 2019 y 2020. La particularidad del año 2020 es que se produjo entre las localidades de Samegua y Moquegua, una lluvia extraordinaria,

describirá la metodología utilizada:

Análisis y ponderación de las variables

En la identificación de peligros múltiples se consideró factores condicionantes y detonantes, de los cuales 4 son factores condicionantes y un factor detonante. Cada factor es representado por un parámetro, evaluado en la mayoría entre 1 a 5 y para la ponderación final cada factor de análisis tiene su ponderación en función al grado de ocurrencia. Esta metodología utilizada es un método indirecto basado en criterios de expertos; por este motivo, cabe señalar que estas ponderaciones pueden variar según el análisis que se realice y la situación local.

Los *factores condicionantes* para el área de estudio: pendiente, geología, Cobertura Vegetal y suelo, mientras que los *factores detonantes*: la precipitación en función a la clasificación climática se tomó en cuenta entre los factores desencadenantes; ya que existe información sobre deslizamientos en el área de estudio, según INGEMMET e INDECI se conoce que en época lluviosa se presentan eventos de fuertes precipitaciones pluviales en los distritos de Samegua y Torata que afectan a las poblaciones ocasionando daños en viviendas, vía vecinal, canales de riego, bocatomas y red de agua.

Determinación de vulnerabilidad ambiental

Se caracterizó la vulnerabilidad ambiental por inundación y deslizamiento en la Cuenca del río Moquegua, usando el Sistema de Información Geográfica (SIG). Para obtener el mapa temático se integró el modelo cartográfico de inundaciones y deslizamientos. A través de él, es posible obtener un análisis integrado de las variables, lo que permite señalar las áreas de vulnerabilidad ambiental en el área de estudio.

3.2. Identificación de peligros múltiples

Después de la recopilación y revisión, la información fue sistematizada y consolidada en función a la metodología propuesta por Crepani et al. (2001). Con la finalidad de procesar la información estandarizada, realizando una representación cartográfica mediante un software libre, con la finalidad de generar mapas temáticos de geología - litología, pendiente, clima, cobertura vegetal, fisiografía y suelo, para caracterizar y describir la cuenca del río Moquegua.

Elaboración de información temática física

En esta etapa se actualizaron los mapas temáticos, haciendo uso de la herramienta proporcionada por la plataforma ArcGis mientras que para la identificación de peligros

múltiples se describe la metodología utilizada.

Análisis y ponderación de las variables

Para la identificación de peligros múltiples se consideró factores condicionantes y detonantes, siendo cuatro condicionantes (Pendiente, Geología, Cobertura Vegetal y suelo) y uno detonante (Precipitación). Cada factor es representado por un parámetro, evaluado en la mayoría entre 1 a 5 y para la ponderación final cada factor de análisis tiene su ponderación en función al grado de ocurrencia. Esta metodología utilizada es un método indirecto basado en criterios de expertos; por este motivo, cabe señalar que estas ponderaciones pueden variar según el análisis que se realice y la situación local.

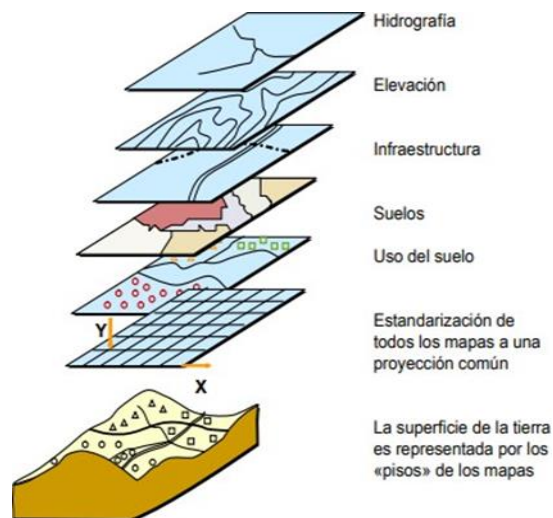
3.3. Determinación de vulnerabilidad ambiental

Elaboración de la base de datos geoespacial

Según Meza (2010), la elaboración de base de datos geoespacial consiste en la utilización de un SIG, con base a una secuencia lógica. En ese sentido, el análisis y modelamiento se realiza en secuencia de primero con la *generalización cartográfica*, que consiste en simplificar las características de un mapa cartográfico, con la finalidad de que sea menos complejo el modelo global, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Modelamiento geoespacial



Nota. Tomado por Meza (2010)

Seguidamente, se realizó el *Análisis espacial* que consta de funciones que realizan cálculos sobre las entidades gráficas siendo: superposición de mapas, reclasificación,

conectividad de elementos geográficos.

Posteriormente se desarrolló el modelo cartográfico de peligros múltiples, se estableció en función a las variables (físicas y bióticas) y sus atributos (unidades litológicas, rango de clasificación climática, rango de pendiente y rango de unidad de suelos), esto permitió evaluar el nivel de peligro que se encuentra expuesta la cuenca del Río Moquegua.

La selección de variables fueron de acuerdo con la incidencia e importancia. Para el desarrollo del modelo cartográfico de peligros se requerirá la generación del modelamiento cartográfico de inundaciones, este se desarrolla una vez se haya analizado los factores conocidas como peligros múltiples, luego de su ponderación individual, se superponen las capas conocido como *Álgebra de mapas*. La asignación del valor de ponderación para cada factor dependerá de la importancia del peligro analizado, por ello se asignó las siguientes ponderaciones para cada factor: Pendiente 15 %, factor de Precipitación 25 %, Cobertura Vegetal 35 %, Suelo 30 %. Para la determinación del modelo de inundaciones se utilizó la siguiente fórmula (1):

$$MAI=(MPR*0,15)+(MPPR*0,25)+(MCVR*0,35)+(MTSR*0,10)+(MPSR*0,10) \quad (1)$$

Donde:

MAI= Mapa de Amenaza de Inundaciones; MPR= Mapa de pendientes reclasificado; MPPR= Mapa de precipitaciones reclasificado; MCVR=Mapa de cobertura vegetal reclasificado; MTSR=Mapa de suelos-textura reclasificado; MPSR= Mapa de profundidad-suelo reclasificado.

Para la culminación del modelo cartográfico de peligros múltiples, se generó el Modelo Cartográfico de Deslizamientos, considerando los factores que luego de su ponderación individual, serán superpuestos, mediante el método de *Álgebra de mapas*, para ello se le asignara a cada factor la siguiente ponderación: Al factor pendiente un peso del 30 %, al factor litológico el 25 %, a la cobertura vegetal 20 %, suelo el 15 % y a la precipitación un 20 %. Para la determinación del modelo de movimientos en masa se utilizó la siguiente fórmula (2):

$$MAD=(MPR*0,30)+(MLR*0,25)+(MCVR*0,20)+(MTSR*0,10)+(MPPR*0,20) \quad (2)$$

Donde:

MAD= Mapa de Amenaza de Deslizamiento; MPR= Mapa de Pendientes reclasificado; MLR= Mapa de Litología-Formaciones Geológicas reclasificad; MCVR=Mapa de Cobertura Vegetal reclasificado; MTSR=Mapa de Suelos-Textura reclasificado; MPPR= Mapa de Precipitaciones reclasificado.

Finalmente, después de diseñar los submodelos cartográficos, se modela la realidad operacional del Modelo Global de Peligros.

Determinación y desarrollo de modelo cartográfico de vulnerabilidad ambiental

Se caracterizó la vulnerabilidad ambiental por inundación y deslizamiento en la Cuenca del río Moquegua, usando el sistema de información geográfico (SIG). Para obtener el mapa temático se integró el modelo cartográfico de inundaciones y deslizamientos utilizando la siguiente fórmula (3):

$$MVA=(MD*0,50)+(MI*0,50) \quad (3)$$

Donde:

MVA= Mapa de vulnerabilidad ambiental; MD= Mapa de amenaza de deslizamiento; MI= Mapa de amenaza de inundación.

Por otro lado, para la determinación de la vulnerabilidad ambiental se tomó en cuenta la metodología utilizada por Coromoto y et al. (2017).

Cuantificación del deterioro de cobertura vegetal de la cuenca del Río Moquegua

Para cuantificar el deterioro de cobertura vegetal, se empleó el Software ArcGIS basándose en la técnica de teledetección, que permite hacer un seguimiento a los cambios que se producen en los recursos terrestres de una determinada área. En primer lugar, se seleccionó y descargó de imágenes satelitales Landsat 8, seleccionando las imágenes donde existía poca presencia de nubosidad durante un periodo de 8 años (2013-2020), la descarga se realizó del sitio web: USGS Earth Explorer.

Seguidamente, se realizó el procesamiento que consiste en la recopilación de datos del satélite Landsat 8, en base de la zona de estudio, luego se creó un dataset ráster que contenga un subconjunto de las bandas de dataset ráster originales. Luego, se ejecutó la combinación de bandas color infrarrojo (vegetación) 5, 4 ,3; esta banda nos permite distinguir la cobertura vegetal, zona urbana y cuerpos de agua. En tercer lugar, se analizó las imágenes satelitales; empleando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y las bandas Landsat 8 para el periodo 2013 – 2020 a través de la calculadora ráster a través del software ArcGIS 10.4.1. El resultado de la combinación varía de -1 a 1, por lo que cuanto más cerca de 1, mayor evidencia de presencia de vegetación, y cuanto más cerca de -1, mayor evidencia de presencia de suelo expuesto.

Finalmente, se reclasificó el NDVI y cálculo las áreas, donde Luego de crear el raster se utiliza la herramienta de análisis espacial *Reclass*, con la finalidad de reclasificar los valores del raster del área de estudio, finalmente se calcula el área en la tabla de atributos y se realiza la suma mediante *Summarize*, el cual permite resumir en una tabla la suma de cada valor en la imagen reclasificada.

4. Resultados

Características socioeconómicas de área de estudio

El área de influencia de la región Moquegua se encuentra en la costa sur del Perú, políticamente incluye parte de las provincias de Mariscal Nieto, es drenado por el río Moquegua, que está formado por la confluencia de los ríos Huaracane y Torata, a 2 km al oeste de la ciudad de Moquegua y tiene un afluente adicional en su margen izquierda a unos 2 km aguas abajo de su nacimiento; el río Tumilaca. Las principales vías de acceso son a través de la carrera panamericana Sur, y la carretera interoceánica (tramo 5, ramal 2), también es posible acceder vía marítima al puerto de Ilo.

La temperatura, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), en el periodo 2017 a 2020, fue variable, su temperatura máxima fue entre 11 a 26 °C y el promedio de temperatura mínima entre 5 a 15 °C, humedad relativa 68,88 % aproximadamente, precipitación variable entre las zonas de monitoreo siendo mayor en las partes altas (2,97 mm/día en distrito de Carumas) y menor a nivel de costa (0,21 mm/día en Moquegua) para el año 2020. Respecto a la población; según el Instituto Nacional de Estadística (INEI, 2017) a nivel provincial tiene 85 379 habitantes (88,2 % de la región), así mismo la provincia de Mariscal Nieto se ubican 41 068 viviendas, distribuidas un 80,4 % en el área urbana y 19,6 % en el área rural, de los cuales el 74 % de viviendas cuenta con instalaciones de red pública de agua potable. Sin embargo, el 2,1 % de las viviendas se abastece de río, acequia o manantial.

Por otro lado, respecto a educación, según el INEI (2017), la mayor parte de la población mayor de 15 años alcanzó el nivel superior (45,5 %), seguido del nivel de secundaria completa con el 35 % de la población. En cuanto a su economía, en la provincia de Mariscal Nieto, el 78,4 % de su población se encuentra en edad de trabajar (PET), es decir, de 14 años a más. En cuanto a las actividades económicas principales, destaca la agricultura y ganadería, a la cual se dedica un 21,5 % de la población, la administración pública (13,6 %), el comercio por menor (12,1 %) y la construcción (10,3 %).

Características de los recursos naturales y biodiversidad

Reportes del ministerio del ambiente (2013), indican que la ocupación de suelos en la cuenca de Moquegua, corresponde a los suelos de planicie costera y estribaciones andinas sin vegetación (64,68 %), suelos de matorrales (15,02 %) y luego suelos de pajonales y césped de puna (12,81 %). Las zonas de cultivos agropecuarios apenas representan el 1,89 % del total y los suelos de bofedales para la ganadería representa un 0,18 %. En cuanto a la flora está conformada por especies de plantas vasculares, las especies herbáceas alcanzan los valores más altos, mientras que no existe un inventario formal de fauna, no obstante se sabe existen fauna en las partes altas como el Suri (*Rhea pennata*), guanaco (*Lama guanicoe*), vicuña (*Vicugna vicugna*) entre otros maníferos, también se puede encontrar especies de aves a nivel costero.

Por otro lado, según el Ministerio del Ambiente (2013) en la región Moquegua, existe

cuatro ecosistemas de suma importancia para la conservación de la biodiversidad: el bosque de queñoales de Muylaque, zona altoandina de la provincia de Mariscal Nieto, Lomas de Tacahuay y Punta de coles en la provincia de Ilo.

Índice de desempeño ambiental

El Índice de Desempeño Ambiental Departamental mide los comportamientos sustentables e insostenibles que se tiene para la conservación de nuestro medio ambiente, oscila entre los valores de 0 y 1, donde 1 es el mejor desempeño ambiental. Su elaboración, a través del Ministerio del Ambiente, requirió 30 indicadores, los cuales se agrupan en cuatro componentes vinculados a los Ejes de la Política Nacional Ambiental y sus indicadores según lo siguiente; Conservación de los Recursos Naturales (0,1623), Calidad Ambiental (0,593), Gestión Ambiental(0,3717) y Gobernanza Ambiental(0,8805).

Gestión de recursos hídricos

La Junta de Usuarios de Moquegua está conformado por 1 705 usuarios y la Junta de Usuarios de Torata conformado por 1 139 usuarios, así mismo la demanda de agua para la agricultura en la cuenca Moquegua se estimó en 109 464 MMC para el año 2012, con un promedio de 16,09 MMC/ha según el Ministerio del Ambiente (2013), por otro lado, el requerimiento para el sector industrial para el año 2022 es de 1 473 MMC. La tercera demanda importante de agua proviene del sector minería, por lo que en el ámbito de la cuenca las principales mineras grandes y medianas son; la unidad minera Cuajone (subcuenca del río Torata) que es una de las más importantes productoras de cobre del país, igual que la minera Quellaveco de Anglomerados (microcuenca del río Asana, subcuenca del río Tumilaca), en la provincia de Mariscal Nieto, que tiene un requerimiento de 22 MMC.

La oferta actual de agua proviene de los escurrimientos superficiales por la lluvia y las aguas reguladas por el embalse Pasto Grande, proveniente de la subcuenca alta del río Vizcachas. Otras fuentes menores son las aguas subterráneas, aguas de emanantes y agua de recuperación.

Modelamiento geoespacial de peligros múltiples

El factor de cobertura vegetal tiene un papel esencial, ya que determina la estabilidad del territorio, debido al tipo, densidad, capacidad de infiltración, estas constituyen factores de resistencia a procesos erosivos o deslizamientos. La presencia de vegetación, plantaciones, bosques densos frena la velocidad de escorrentía superficial e infiltraciones del agua producto de las lluvias, por lo que existe una baja influencia en peligros. Sin embargo, si hay presencia de terrenos degradados, terrenos con vegetación escasa y afloramientos rocosos, cultivos agrícolas y aún más si existe la presencia de cuerpos de agua, será más probable de una muy alta influencia sobre los peligros. En la Figura 2A se observa una afluencia *muy alta* de áreas altoandinas con escasa y sin vegetación y desierto costero entre la parte baja y media de la

cuenca del río Moquegua, es decir en estas zonas tienen más susceptibilidad a deslizamientos, y en menor proporción en la parte alta de la cuenca, asimismo se observa que en la parte alta de la cuenca existe una afluencia alta de bosque relicto altoandino y cardonal y moderado con la presencia de Agricultura costera y andina, bofedal, matorral arbustivo y pajonal andino.

Por otro lado, para la ponderación del factor geológico, se consideró la litología, como indicador fundamental, puesto que este interviene en la naturaleza y composición fisicoquímica de las rocas, estas influyen en el relieve debido a los cambios de sus características de la roca como: dureza, adherencia, compactación, meteorización, fragilidad, consolidación. Este factor permite determinar que formaciones geológicas tienen más susceptibilidad para que se dé el proceso de movimiento de masas o rocas en la superficie terrestre. Posterior a esto se transformó a formato raster el mapa generado, y se realizó una reclasificación, teniendo como resultado el mapa de formaciones geológicas reclasificado, la reclasificación se realizó mediante la herramienta reclassify del software ArcGIS. En la Figura 2B se aprecia que en la zona media y parte baja de la cuenca existe una muy alta afluencia de sedimentos, lo cual nos indica que existe una mayor susceptibilidad a peligros, en la parte alta de la cuenca se observa que existe una afluencia moderada de rocas ígneas volcánicas, se evidencia también que entre la parte baja y media de la cuenca existe la presencia alta de rocas sedimentarias y se observa que en la parte baja de la cuenca existe la afluencia de rocas ígneas plutónicas y de gravas y arenas.

Así mismo, en la ponderación para deslizamientos, se considera que a mayor pendiente, mayor es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento, para la generación del mapa de pendientes reclasificado se utilizó el Modelo Digital de Elevación, utilizando la herramienta slope se creó el mapa de pendientes, luego con la herramienta reclassify se realizó una reclasificación de los valores donde se aprecia que en la cuenca del río Moquegua existe una pendiente con >50 con un nivel *muy alto* en la parte alta de la cuenca y en la parte baja de la cuenca, y en menor proporción existe pendientes entre $<2 - 50$.

Respecto a la clasificación del suelo, se encontró áreas propensas a deslizamientos e inundaciones. En la Figura 1C, se puede apreciar la clasificación de suelo del área donde existe *muy alta* presencia de las unidades de suelo; Solonchak háplico - Leptosol éútrico y Fluvisol éútrico - Regosol éútrico; así mismo se evidencia un grado alto de afluencia de las siguientes unidades de suelo; Leptosol lítico - Afloramiento lítico, Leptosol dístrico - Andosol vítrico y Leptosol dístrico - Afloramiento lítico, el cual ocupa la mayor área de estudio

La precipitación como factor hidrológico es importante en la estabilidad de pendientes, por ello en la ponderación se consideró en función al tipo de clima, ya que, si existen zonas con clima lluvioso o húmedo, generarían inundaciones provocando deslizamientos o movimientos de masa, bajo este criterio se basa en que las zonas donde el clima es lluvioso o húmedo son más propensas a sufrir deslizamientos.

Para la generación del mapa de precipitaciones reclasificado se convirtió el mapa de precipitaciones a archivo raster y la reclasificación. En la figura 2D, se puede observar que, en la parte alta de la cuenca del río Moquegua, evidencia que el clima lluvioso (otoño-seco-invierno seco) semifrigido-húmedo, este tipo de clima genera inundaciones y pueden provocar deslizamientos. En la parte de baja indica que existe una deficiencia de lluvias, en la parte media de la cuenca existe un *grado alto*, indicando que existe un clima semiárido y *grado moderado* un clima semiseco en la cuenca del río Moquegua.

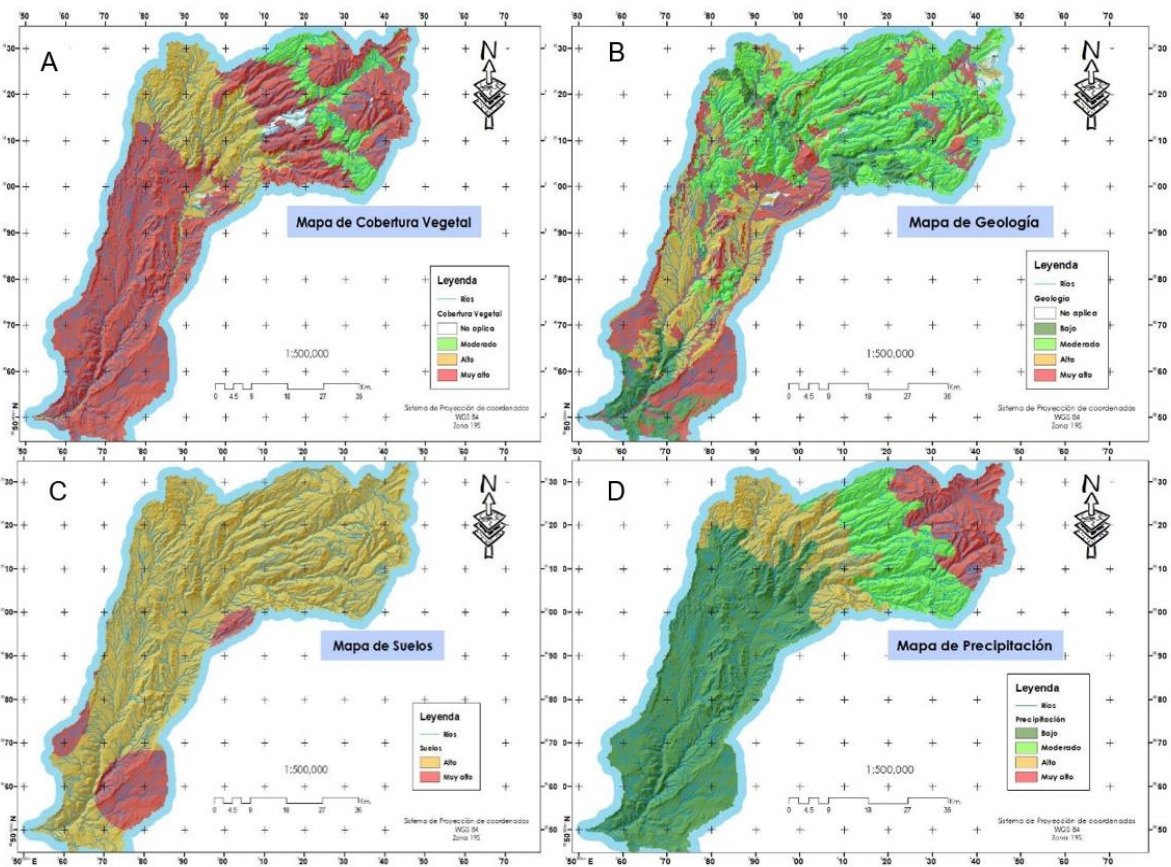
Modelo cartográfico para amenaza de deslizamientos e inundaciones

El modelo cartográficos de amenazas de deslizamientos se realizó en función de los factores previamente analizados, posteriormente se ejecutó la ponderación individual, luego se integraron utilizando el procedimiento álgebra de mapas. Finalmente, el resultado obtenido del modelo se reclasificó, con la finalidad de agrupar mejor los valores. En la figura 3A se puede apreciar que el grado muy alto, caracteriza a zonas más propensas a la ocurrencia de deslizamientos, estas deben mantenerse como áreas de protección, porque se ubican en la parte alta y media de la cuenca del Río Moquegua.

De forma similar, el mapa de inundaciones según su ponderación individual pasa a la respectiva combinación de capas, cada factor está influenciado por un valor ponderado de acuerdo a su importancia para la amenaza analizada. En la figura 3B se observa el mapa de amenaza de inundaciones del modelo aplicado, mostrando alto, medio y bajo grado de amenaza, observándose que en las microcuencas y ríos se evidencia una mayor amenaza de inundación.

Figura 2

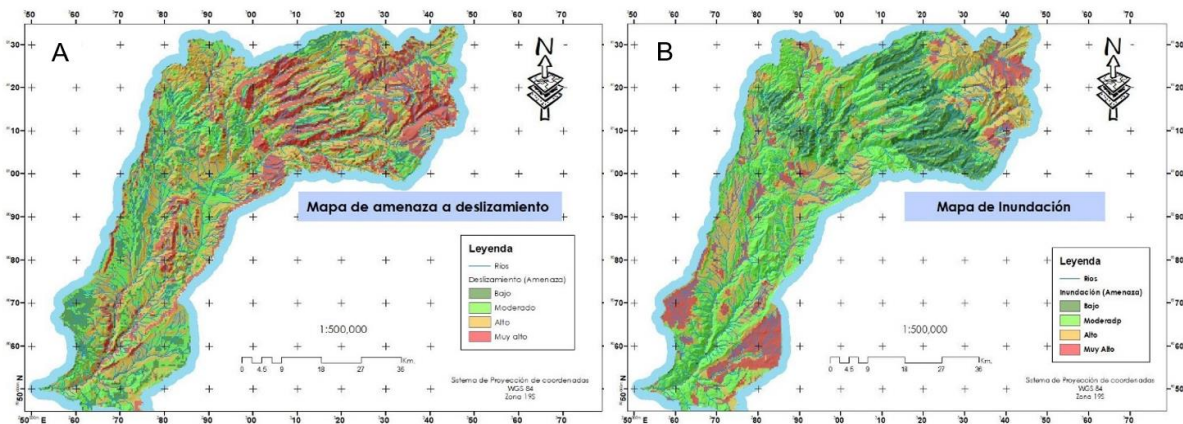
Modelamiento cartográfico para amenaza de deslizamiento



Nota. A = Mapa de cobertura vegetal, B=Mapa de geología, C=Mapa de suelos, D=Mapa de precipitación.

Figura 3

Mapas de deslizamientos y amenazas



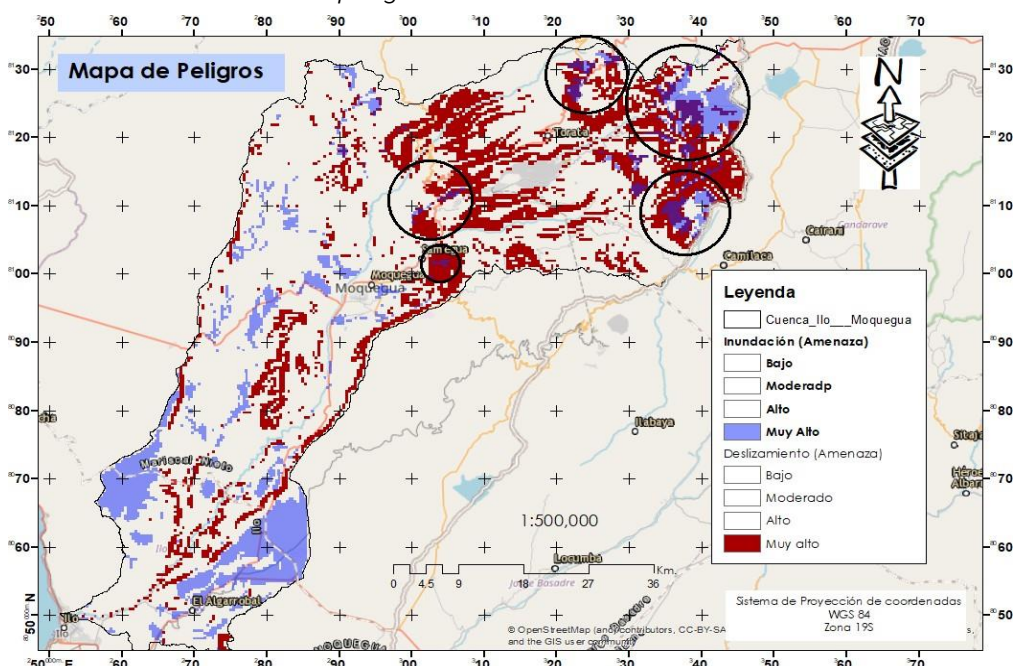
Nota. A=mapa de deslizamientos, B= mapa de amenazas.

Modelamiento cartográfico para peligros

Este modelo es el resultado de la integración lógica de los submodelos de inundación y deslizamiento. En la Figura 4, muestra la distribución de áreas con múltiples peligros debidamente clasificados en niveles de peligro *muy alto*, *alto*, *moderado* y *bajo*, asociados con la ocurrencia de inundaciones y deslizamientos. Se puede apreciar que en la zona del distrito de Samegua existe un grado muy alto de amenaza y de inundación debido a la cercanía de la cuenca del río Moquegua, en la parte alta de la cuenca, cerca al distrito de Torata, existe un nivel muy alto de deslizamientos e inundaciones.

Figura 4

Distribución de áreas con peligros



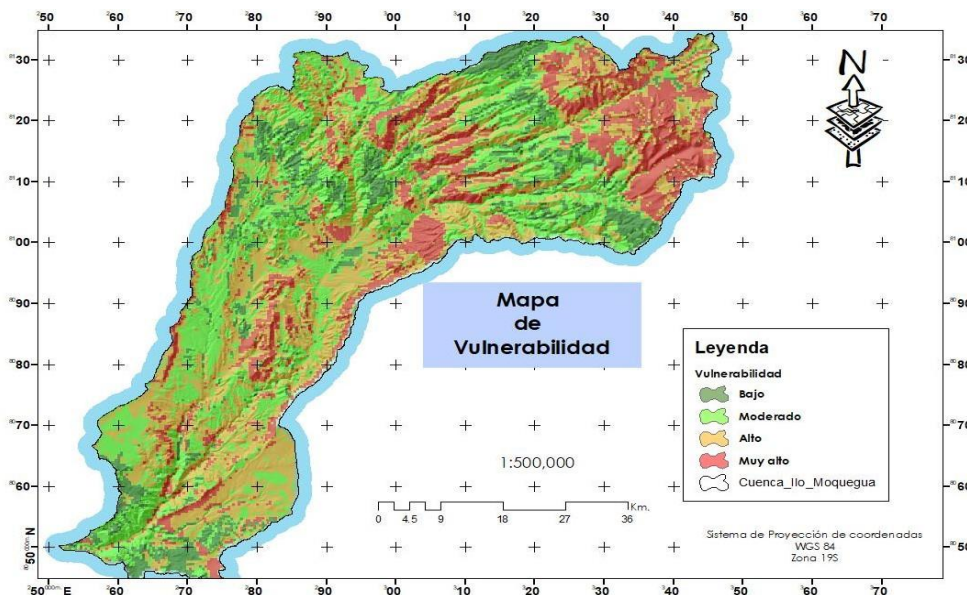
Vulnerabilidad ambiental de la Cuenca del Río Moquegua

La integración de información temática realizada a partir de cálculos algebraicos entre los mapas permitió establecer los parámetros para la elaboración del mapa de Vulnerabilidad Ambiental final del área de estudio. La ponderación pretendía indicar la influencia ante inundaciones y deslizamientos, el cual puede distinguir o influir en la mayor o menor vulnerabilidad del área. Los valores encontrados en el mapa de Vulnerabilidad Ambiental reflejan la susceptibilidad de las zonas a actividades antropogénicas o contaminación.

En la Figura 5, se aprecia el mapa de vulnerabilidad ambiental, donde se observa que en las zonas sombreadas de color rojo con grado muy alto indican que tienen más susceptibilidad a las actividades antropogénicas o de contaminación. Esto se debe a la presencia de unidades mineras, ante la ocurrencia de inundaciones o deslizamiento tienden a tener una mayor susceptibilidad a una contaminación de la cuenca del río Moquegua, también se observa que en la parte alta existe un grado muy alto, de acuerdo a una investigación por Sanchez (2019) durante época de estiaje la concentración de Al, Pb y Sr fueron bajas, no representando riesgo alguno para la vegetación, animales, personas y el ambiente. Sin embargo, en época de avenida, la concentración de aluminio, se elevó en un 85 %, esto compromete seriamente a la flora y fauna de la cuenca, siendo una zona de mayor susceptibilidad a la contaminación y toxicidad. También existe un reporte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2014) en el cual se identificaron en la cuenca alta y baja del río Moquegua llo, vertimiento de aguas residuales, que en época de avenida puede significar una vulnerabilidad muy alta para la flora, fauna y población cercana.

Figura 5

Mapa de vulnerabilidad ambiental



Deterioro de cobertura vegetal en la Cuenca del Río Moquegua

Para determinar la cobertura vegetal, se cuantificó en valores de NDVI que detallan que los

valores negativos indican que el suelo está expuesto y no existe vegetación, por el contrario, valores positivos indican mayor evidencia de vegetación, tal como se puede apreciar en la tabla 1 y la figura 6, los valores encontrados indican que en términos de variación del área de cobertura vegetal, con una ligera tendencia a disminuir de manera gradual, esto puede ser un indicador de susceptibilidad ante diferentes amenazas como inundaciones, deslizamientos, actividad antrópica y contaminación.

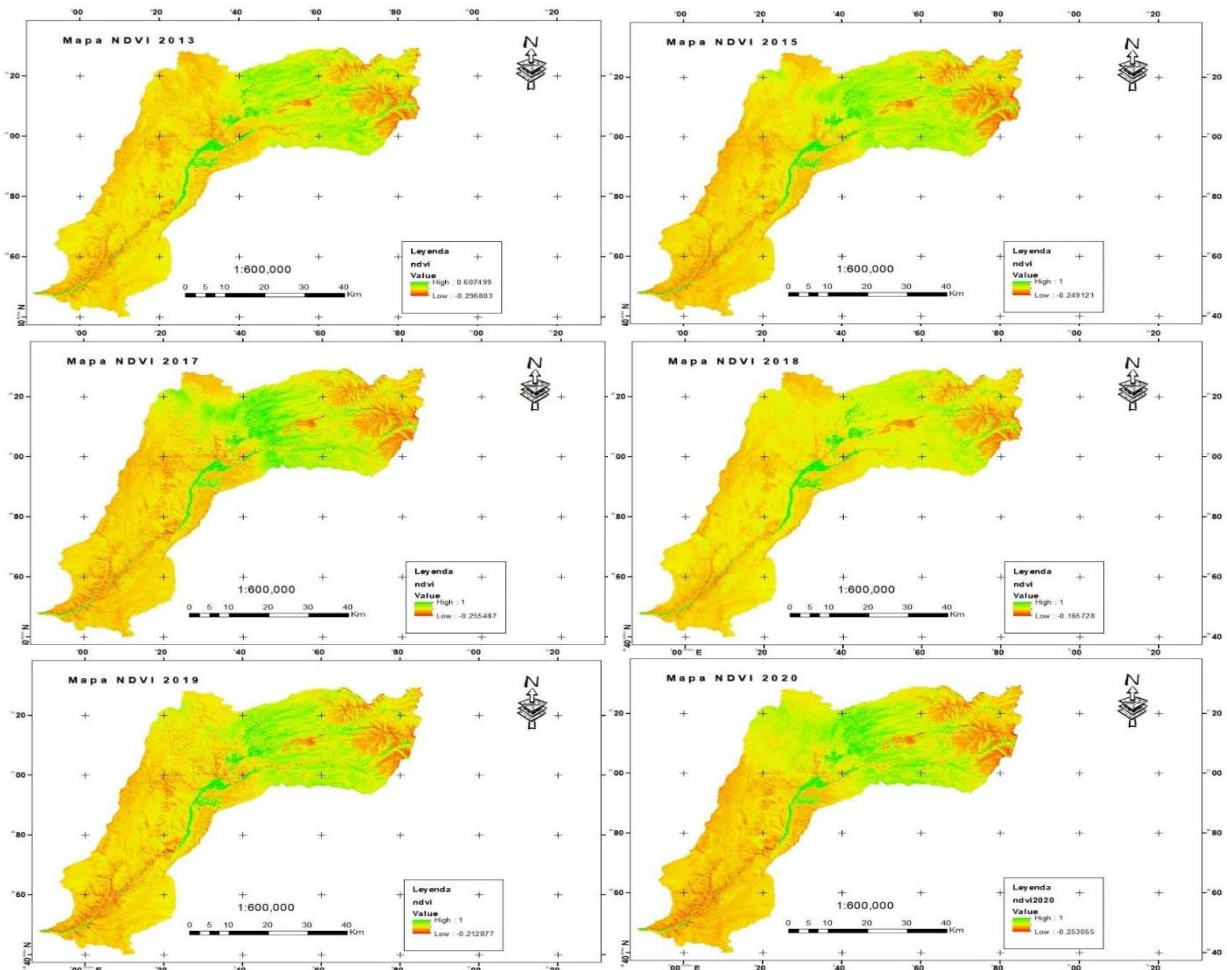
Tabla 1

Valores NDVI y variación de cobertura vegetal entre los años 2013 - 20

Año	Valor NDVI		Cobertura vegetal (km ²)
	Suelo expuesto	Áreas con mayor densidad de vegetación	
2013	-0,29	0,60	3 406,60
2014	-0,17	1,0	3 400,54
2015	-0,24	1,0	3 405,25
2016	-0,24	0,59	3 406,61
2017	-0,25	1,0	3 397,36
2018	-0,16	1,0	3 406,56
2019	-0,21	1,0	3 393,17
2020	-0,25	1,0	3 397,72

Figura 6

Mapas NDVI del 2013 al 2020



5. Discusión

Mediante la modelación geoespacial se determinó las áreas de vulnerabilidad ambiental al superponer mapas de amenazas a deslizamientos e inundaciones, así como reclasificar las áreas más susceptibles a actividades antropogénicas o contaminación, que resulta en grado muy alto, alto, moderado y bajo. Asimismo, los peligros múltiples se determinaron analizando y ponderando los factores que favorecen su aparición, trasladados a un modelo cartográfico resultando que la cuenca del río Moquegua presenta niveles de amenazas por deslizamientos e inundaciones (muy alto, alto, moderado y bajo).

Al identificar el deterioro de cobertura vegetal haciendo uso de un SIG en la cuenca del río Moquegua, se observa la cuantificación de área de cobertura vegetal en el periodo 2013 al 2020. Por otro lado, existe un nivel muy alto grado (>4) de peligro por deslizamiento en la parte alta y media de la cuenca del río Moquegua, así mismo existe un nivel muy alto grado (>4) de peligro por inundación.

También se evidencia que existe una relación entre las zonas de vulnerabilidad ambiental y peligros múltiples en la cuenca del río Moquegua, mediante la integración de mapas de amenazas de inundaciones y deslizamientos, resultado que mientras se tenga un grado muy alto en las zonas por inundación o deslizamientos, existe mayor susceptibilidad por contaminación o actividad antrópica.

En esa línea, Meza (2010) al establecer un modelo cartográfico adecuado que sirva para la identificación de las áreas críticas, los cambios del río y el impacto ambiental, tuvo como resultado la identificación de los centros poblados urbanos y rurales que están expuestos a los riesgos. Asimismo, la elaboración de los mapas georreferenciados y su base de datos: litoestratigráfico, unidades geomorfológicas, cobertura vegetal, cambios del río, centros poblados urbanos y rurales, y los mapas de peligros permitió determinar las limitaciones y potencialidades que tiene el ámbito de estudio. Por otro lado, también se muestra con lo realizado por Meza (2017), quien diseñó el modelamiento geoespacial de las zonas de vulnerabilidad ambiental y peligros múltiples, así como mapas temáticos para identificar los peligros.

La cuantificación del deterioro de cobertura vegetal hecha por Santos y et al. (2016) muestra que para el año 1999, los valores mínimo, medio y máximo del NDVI fueron; -0,4 (cuerpos de agua), 0,12 (suelo expuesto y dunas) y 0,69 (áreas con mayor densidad de vegetación, manglares), mientras que para la imagen de 2014, los valores NDVI mínimo, promedio y máximo fueron -0,23, 0,19 y 0,60 respectivamente; dichos resultados son similares a lo encontrado en el deterioro de cobertura vegetal haciendo uso de un SIG en la cuenca del río Moquegua, donde los valores fluctúan entre 0,60 y -0,29 para el año 2013, siendo 0,60 el valor que indica mayor evidencia de vegetación, para el año 2014, los valores encontrados (1,0 y -0,17), indican como 1,0, el valor de mayor evidencia de vegetación, y el valor -0,17 indica que existe mayor evidencia de presencia de suelo expuesto.

En la investigación de Viltres (2015), al evaluar de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio Sagua de Tánamo, concluye que los factores condicionantes y desencadenantes influyen en la ocurrencia de los deslizamientos, destacando que las clases de peligrosidad se pueden dividir a partir de los pesos asignados a cada mapa (baja, moderada, alta); se identifica los tipos de la peligrosidad a lo largo de la franja donde se acentúan los municipios de la zona,

siendo la peligrosidad alta en algunos consejos populares. Algo similar ocurre en la cuenca del río Moquegua, donde se encontró que existe un nivel muy alto en la parte alta y media de la cuenca del río Moquegua, debido a factores condicionantes y desencadenantes identificados en la zona de estudio.

Al analizar el peligro de inundación, se encontró un nivel muy alto en la parte alta y media de la cuenca del río Moquegua, estos resultados concuerdan con lo encontrado por Peña (2017), quien realizó un modelamiento geoespacial para evaluar la vulnerabilidad ambiental, ante la ocurrencia de inundaciones en la cuenca baja del río Chillón, encontrando que los sectores identificados de la cuenca baja existe un nivel considerado alto.

Por otro lado, para establecer la relación entre las zonas de vulnerabilidad ambiental y peligros múltiples mediante la integración de mapas de amenazas de inundaciones y deslizamientos permitió modelar y analizar el mapa de vulnerabilidad. En la figura 4, se aprecia el mapa de vulnerabilidad, en el cual se visualiza que en las zonas de sombreadas de color rojo con grado muy alto indican tener más susceptibilidad a las actividades antropogénicas o de contaminación. Esto se debe a la presencia de unidades mineras, ante la ocurrencia de inundaciones o deslizamiento tienden a tener una mayor susceptibilidad a una contaminación de la cuenca del río Moquegua, también se observa que en la parte alta existe un grado muy alto. Este resultado es respaldado por estudios realizados por Sánchez (2019), que indica que durante la época de estiaje la concentración de Al, Pb y Sr son bajas, no representando riesgo alguno para la vegetación, animales, personas y el ambiente. Sin embargo, en época de avenida, la concentración de aluminio se eleva en un 85 %, comprometiendo seriamente a la flora y fauna de la cuenca, siendo una zona de mayor susceptibilidad a la contaminación y toxicidad por aluminio. Asimismo, en un reporte por Autoridad Nacional del Agua (2014), identifica que en la cuenca alta y baja del río Moquegua, hay vertimiento de aguas residuales, lo cual en época de avenida puede significar una vulnerabilidad muy alta para la flora, fauna y población cercana, resultados similares han sido reportados por Calderon (2017) al hacer un modelamiento geoespacial para la identificación de zonas críticas vulnerables a peligros múltiples, cuenca hidrográfica Camana-Majes-Colca, Arequipa, identificó zonas vulnerables a peligros múltiples; categorizando el territorio en niveles muy alto, donde se encuentran poblaciones con fisiografía accidentada, escasa cobertura vegetal, intensas precipitaciones y condiciones sociales bajas; nivel alto, que representa el 47,9 % del territorio y nivel medio, que representa el 17,0 % y nivel bajo, que representa el 16,2 % de la cuenca analizada.

6. Conclusiones

La identificación del grado de peligro por deslizamiento en la zona de estudio dio como resultado un nivel alto grado (5) y nivel bajo grado (1), el grado alto se caracteriza a zonas más propensas a la ocurrencia de deslizamientos y no se recomienda la construcción de infraestructura, estas zonas se ubican en la parte alta y media de la cuenca del Río Moquegua.

La identificación del grado de peligro por deslizamiento en la zona de estudio muestra niveles muy alto, alto, moderado y bajo, observándose que existe un peligro alto cerca de las microcuenca, ya que en época de avenidas, existe la probabilidad de que ocurra un desbordamiento de esta, pudiendo afectar a la población cercana.

La determinación de la relación entre zonas de vulnerabilidad ambiental y peligros

múltiples se realizó mediante la integración de mapas de amenazas identificadas en el área de estudio, que permitió identificar las áreas de mayor vulnerabilidad, la ocurrencia de deslizamientos o inundaciones, influyen en la susceptibilidad relacionada con actividades antropogénicas y contaminación ambiental.

7. Referencias Bibliográficas

- Hallegatte, Stéphane; Vogt-Schilb, Adrien; Bangalore, Mook; Rozenberg, Julie. (2017). Unbreakable: Construyendo la resiliencia de los pobres frente a los desastres naturales . Cambio Climático y Desarrollo;. Washington, DC: Banco Mundial. © Banco Mundial. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25335> Licencia: CC BY 3.0 IGO
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe Técnico de Actualización de identificación de fuentes contaminantes en la Cuenca Moquegua Ilo y Sub Cuenca Carumas. Moquegua.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2020). BID Invest. Obtenido de <https://www.iadb.org/es/ove/cambio-climatico-y-la-gestion-de-riesgo-de-desastres>
- Calderon Mendoza, J. (2017). Modelamiento Geoespacial para la Identificación de zonas críticas vulnerables a peligros multiples, cuenca hidrográfica Camana- Majes-Colca, Arequipa. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Coromoto Marín, H., Bravo Medina, C. A., Manjarrez Fuentes, N. N., y Torres Navarrete, E. T. (2017). Análisis de vulnerabilidad ambiental de la cuenca alta del río San Pedro, estado Miranda, Venezuela. Venezuela.
- Crepani, E., Simeão de Medeiros, J., Hernandez Filho, P., Duarte, V., y Faria Barbosa, C. C. (2001). Sensación remota y geoprocado aplicado a la zonificación ecológica y económica y a la planificación territorial. Brasil.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). Manual básico para la estimación del riesgo. Lima.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2020). Precipitaciones pluviales en el departamento de moquegua. Informe de emergencian°427-6/3/2020/COEN-Indeci/18:10horas(InformeN° 66). <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2020/07/Informe-de-emergencia-N%25C2%25BA-427-6JUL2020-Precipitaciones-pluviales-en-el-departamento-de-Moquegua-66.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2020). Informe técnico N° A70791 Evaluación geológica-geodinámica de los flujos de detritos del 26/02/2020 ocurrido en las localidades de Samegua y Moquegua. http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//9802_informe-tecnico-n0-a7079-evaluacion-geologica-geodinamica-de-los-flujos-de-detritos-del-26022020-occurido-en-las-localidades-de-samegua-y-moquegua-dis.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). Población económicamente activa por condición de ocupación y características de la población ocupada. <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones-digitales/Est/Lib1676/03.pdf>
- Meza Arquíñigo, C. (2010). Aplicación del Sistema de Información Geográfica (SIG) en el

- modelamiento del río Ucayali . Lima.
- Ministerio del Ambiente. (2013). Diagnóstico para la gestión del cambio climático en Moquegua. Moquegua.
- Ambiental en la Cuenca del Río Valles. San Luís Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Peña Reyes, M. A. (2017). Modelamiento geoespacial para evaluar la vulnerabilidad ambiental, ante la ocurrencia de inundaciones, en la cuenca baja del río Chillón, 2017". Lima.
- Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2007). Informe sobre desarrollo humano 2007-2008. Nueva York: Grupo Mundi-Prensa.
- Sanchez Valencia, R. R. (2019). Niveles de Metales Pesados (Pb, Al y Sr) en época de avenida y estiaje en el río osmore, Región Moquegua. Arequipa.
- Santillán, G., Fernández, J., y Correia, J. (2005). Manual para la prevención de desastres y respuesta e emergencias. La experiencia de Apurímac y Ayacucho. Lima.
- Santos Sousa, R., Souza Valladares, G., y Mira de Espíndola, G. (2016). Análise do índice de vegetação (ndvi) e vulnerabilidade ambiental da planície costeira do estado do Piauí. Da Casa da Geografia de Sobral, 99.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), (2021) LIMAS DEL PERÚ – Mapa de Clasificación Climática Nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>
- Viltres Milán, Y. (2015). Evaluación de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio Sagua de Tánamo. Cuba.