UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGIA, GEOFISICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

ESTUDIO DE RIESGOS GEOLÓGICOS DEBIDO A LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL DISTRITO DE CABANACONDE-VALLE DEL COLCA

TESIS PRESENTADA POR EL BACHILLER:
PEDRO MANFRED FLORES SANCHEZ

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Geólogo

ASESOR: Msc. Ing. Pablo Ruben Meza Arestegui

AREQUIPA – PERU

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGIA, GEOFISICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

ESTUDIO DE RIESGOS GEOLÓGICOS DEBIDO A LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL DISTRITO DE CABANACONDE-VALLE DEL COLCA

TESIS PRESENTADA POR EL BACHILLER:
PEDRO MANFRED FLORES SANCHEZ

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Geólogo

ASESOR: Msc. Ing. Pablo Ruben Meza Arestegui

Jurados:

Presidente: Dr. Fredy Fortunato Garcia Zuñiga

Vocal: MSc. Pablo Ruben Meza Arestegui

Secretario: MSc. Salome Guadalupe Chacón Arcaya

AREQUIPA – PERU

2020

Nadie puede salvarte sino tú mismo

y mereces salvarte.

No es una guerra fácil de ganar

pero si algo merece la pena ganar, es esto.

Piénsalo, piensa en salvarte a ti mismo ...

Charles Bukowski

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Juana Sanchez y Pedro Flores por haberme guiado por el camino de la humildad, la verdad y la libertad.

A mis hermanos Claudia, Lucero, Soledad, Victoria y Jhon por haber sido compañía constante en los caminos abruptos de la vida.

Al Ing. Pablo Meza por haber sido mentor y consejero en la realización de este proyecto.

A mis grandes amigos Geraldine, Cristhian, Gustavo y Nilton, por haberme dado su confianza, amistad y haberme motivado en mi vida profesional y personal.

Finalmente agradezco a todo aquel que con su presencia ayudo de alguna manera a modelar la persona que soy y seré.

RESUMEN

La localidad de Cabanaconde se ha visto afectada por actividad sísmica constante en los últimos años, ejemplos recientes de esta actividad se reflejan en los sismos del año 2013 (5.7 ML) y 2015 (4.5 ML), el Instituto Geofísico del Perú, indicó que ambos sismos fueron generados por el sistema de Fallas Solarpampa al sur de la localidad, poniendo así en evidencia la tectónica activa que tiene lugar en el Valle del Colca y la necesidad de estudiar el impacto que tendría un sismo de gran magnitud en las localidades cercanas.

El presente proyecto de investigación aborda el análisis del riesgo geológico debido a la actividad sísmica en la localidad de Cabanaconde y toma en consideración las metodologías sugeridas por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres detallados en el "Manual para la Evaluación de Riesgos Naturales originados por Fenómenos Naturales, 2da versión".

El análisis del peligro sísmico a través del modelo determinístico de Abrahamson y Silva en la localidad de Cabanaconde, permite proponer un escenario probable de riesgo que implica un sismo de 6.00 Mw y un epicentro a una distancia de 3-4 kilómetros de distancia, este escenario arroja valores de aceleración sísmica de entre 0.13 g a 0.25 g, ubicando la localidad dentro de la zona de peligro sísmico "bajo"

Por otra parte, teniendo en cuenta los fenómenos detonados por sismos de gran magnitud, la localidad de Cabanaconde también se vería afectada por fenómenos de remoción en masa, aplicando el análisis de susceptibilidad y el proceso de análisis jerárquico, concluimos que la localidad de Cabanaconde y alrededores se encuentra en un nivel de peligrosidad "bajo" a "muy alto" frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos.

El análisis de la vulnerabilidad frente a un fenómeno de remoción en masa indica niveles de vulnerabilidad "alto" y "muy alto" principalmente debido a la fragilidad de la infraestructura de la localidad. La conjunción de un estado de peligrosidad "baja" a "muy alta" y un estado de vulnerabilidad "alto", colocan a la localidad de Cabanaconde frente a los fenómenos de remoción en masa en un estado de riesgo "medio".

Finalmente se concluye la necesidad de la ejecución del Plan de Gestión de Desastres en un nivel de priorización III, teniendo como finalidad principal disminuir el nivel de riesgo sísmico al cual se encuentra expuesto la localidad de Cabanaconde

Palabras Clave: actividad sísmica, remoción en masa, riesgo, Cabanaconde

ABSTRACT

The town of Cabanaconde has been affected by constant seismic activity in recent years, recent examples of this activity are reflected in the earthquakes of 2013 (5.7 ML) and 2015 (4.5 ML), the Geophysical Institute of Peru, indicated that both earthquakes were generated by the Solarpampa Fault system to the south of the town, thus highlighting the active tectonics that takes place in the Colca Valley and the need to study the impact that a large earthquake would have on nearby towns.

This research project addresses the analysis of geological risk caused by seismic activity in the town of Cabanaconde, taking into consideration the methodologies suggested by the National Center for Estimation, Prevention and Reduction of Disaster Risk detailed in the "Guide for the Evaluation of Natural Risks originated by Natural Phenomena, second version".

The analysis of the seismic hazard through the deterministic model of Abrahamson and Silva in the town of Cabanaconde, allows to propose a probable risk scenario that implies an earthquake of 6.00 Mw and an epicenter at a distance of 3-4 kilometers away, this scenario yields seismic acceleration values of between 0.13 g to 0.25 g, locating the town within the zone of "low" seismic hazard.

On the other hand, taking into account the phenomena triggered by earthquakes of great magnitude, the town of Cabanaconde would also be affected by mass removal phenomena, applying the susceptibility analysis and the hierarchical analysis process, we conclude that the town of Cabanaconde and surroundings is at a level of "low" to "very high" hazard facing mass removal phenomena triggered by earthquakes

.

The analysis of vulnerability to a phenomenon of mass removal indicates "high" and "very high" levels of vulnerability due to the fragility of the local infrastructure. The conjunction of a "low" to "very high" state of hazard and a "high" state of vulnerability places the town of Cabanaconde in a "medium risk" state facing mass removal phenomena.

Finally, the need to execute the Disaster Management Plan is concluded at a level III of prioritization, with the main purpose of reducing the seismic risk to which the town of Cabanaconde is exposed.

Key Words: seismic activity, mass movements, risk, Cabanaconde

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION 1

1.1. Ubicación y Accesibilidad 1
1.1.1. Ubicación 1
1.1.2. Accesib ilidad 1
1.2. Justificación 3
1.3. Planteamiento del Problema 3
1.3.1. Descripción del problema 3
1.3.2. Formulación del problema 3
1.3.2.1. Problema principal 3
1.3.2.2. Problemas secundarios 4
1.4. Alcances y Limitaciones 4
1.4.1. Alcances 4
1.4.2. Limitaciones 5
1.5. Variables e Indicadores 5
1.5.1. Variables independientes 5
1.5.2. Variables dependientes 5
1.5.3. Indicadores 5
1.6. Objetivos 6
1.6.1. Objetivo general 6
1.6.2. Objetivos secundarios 6
1.7. Hipótesis 7
1.7.1. Hipótesis general 7
1.7.2. Hipótesis secundarias 7

2. MARCO TEORICO 8

2.1. Antecedentes 8
2.1.1. Antecedentes bibliográficos 8
2.1.2. Antecedentes históricos 16
2.2. Marco Normativo 19
2.3. Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales 20
2.3.1. Definiciones Básicas 21
2.3.1.1. Peligro 21
2.3.1.2. Desastre 21
2.3.1.3. Riesgo 21
2.3.1.4. Preparación 22
2.3.1.5. Prevención 22
2.3.1.6. Mitigación 22
2.3.2. Peligros generados por fenómenos de origen natural 22

2.3.3. Análisis de peligrosidad 25
2.3.3.1. Recopilación de información 26
2.3.3.2. Identificación del área de influencia probable del peligro 27
2.3.3.3. Parámetros de evaluación de peligros 27
2.3.3.4. Susceptibilidad 28
2.3.3.5. Matriz de peligrosidad 29
2.3.3.6. Mapa de peligrosidad 30
2.3.4. Vulnerabilidad 31
2.3.4.1. Exposición 31
2.3.4.2. Fragilidad 32
2.3.4.3. Resiliencia 32
2.3.5. Análisis de vulnerabilidad 32
2.3.5.1. Vulnerabilidad de la dimensión social 32
2.3.5.2. Vulnerabilidad de la dimensión económica 32
2.3.5.3. Vulnerabilidad de la dimensión ambiental 34
2.3.5.4. Niveles de vulnerabilidad 34
2.3.5.5. Matriz de vulnerabilidad 34
2.3.5.6. Mapa de vulnerabilidad 35
2.3.6. Estimación de riesgo 36
2.3.6.1. Identificación de zonas de riesgo potencial significativo 37
2.3.6.2. Niveles de riesgo 37
2.3.6.3. Matriz de riesgo 38
2.3.6.4. Mapa de niveles de riesgos 38
2.3.6.5. Zonificación territorial del riesgo 38
2.3.7. Impactos Negativos y Cuantificación de Perdidas 41
2.3.7.1. Impacto probable a la dimensión social 41
2.3.7.2. Impacto Probable a la dimensión económica 42
2.3.7.3. Impacto Probable a la dimensión ambiental 42
2.3.8. Control de riesgos 42
2.3.8.1. Aceptabilidad o tolerancia del riesgo 43
2.3.8.2. Análisis de costo, beneficio de proyectos de gestión de riesgos 46
2.3.8.3. Medidas de control 47
2.3.9. Gestión de Riesgos de Desastres 48
2.3.9.1. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) 49
2.3.9.2. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 50
2.3.9.3. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 51
2.4. Marco Climatológico 53
2.4.1. Temperatura media promedio 55
2.4.2. Temperatura máxima promedio 55
2.4.3. Temperatura mínima promedio 56
2.5. Marco Hidrográfico 57
2.6. Marco Geomorfológico 58

2.6.1. Unidades de carácter tectónico degradacional y denudacional.....60
2.6.1.1. Montañas y colinas estructural - denudacionales en rocas sedimentarias (RM-rs, RCL-rs, RMC-rs, RMCE-rs, RME-rs).....60
2.6.1.2. Montañas y colinas en rocas plutónicas (RM-ri, RMC-ri) 60
2.6.1.3. Montañas y laderas en rocas metamórficas (RM-rm).....60
2.6.1.4. Montañas, laderas, colinas y mesetas en rocas volcánicas y volcánoclasticas (RM-rv, RMC-rv, RMC-rvs, RCL-rv, RM-cgl) 61
2.6.1.5. Laderas con flujos de lava asociado a estratovolcanes (Es-v) 61
2.6.1.6. Colinas, lomadas y mesetas en flujos piroclásticos (Sfp).....62
2.6.1.7. Coladas o campos de lavas basalto-andesíticas (Ca-la).....62
2.6.2. Unidades de carácter deposicional o agradacional 62
2.6.2.1. Abanicos de piedemonte (Ab) 62
2.6.2.2. Morrenas (Mo).....63
2.6.2.3. Vertiente aluviolacustre (V-al) 63
2.6.2.4. Vertiente de detritos indiferenciada (V-d, V-cd).....63
2.6.2.5. Vertiente glaciofluvial (V-gfl).....64
2.6.2.6. Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd) 64
2.6.2.7. Vertiente o piedemonte aluviolacustre (P-al) 64
2.6.2.8. Llanura aluvial o cauce inundable (Pl-al) 65
2.6.2.9. Terrazas aluviales (Ta-al) 65

2.7. Marco Geológico Regional.....67
2.7.1. Complejo Basal de la Costa (PE-gn) 67
2.7.2. Grupo Yura 68
2.7.2.1. Formación Socosani (Jm-so).....68
2.7.2.2. Formación Puente (Jm-pu).....68
2.7.2.3. Formación Cachíos (Jm-ca) 68
2.7.2.4. Formación Labra (Js-la).....69
2.7.2.5. Formación Gramadal (Js-gr).....69
2.7.2.6. Formación Hualhuani (Ki-hu).....69
2.7.2.7. Formación Murco (Ki-mu) 70
2.7.2.8. Formación Arcurquina (Kis-ar) 70
2.7.2.9. Formación Huanca.....70
2.7.3. Grupo Tacaza.....71
2.7.3.1. Tacaza Indiviso (PN-ta).....71
2.7.3.2. Formación Orcopampa.....71
2.7.4. Grupo Barroso.....72
2.7.4.1. Complejo Volcánico Mismi.....72
2.7.4.2. Complejo Volcánico Hualca Hualca.....72
2.7.4.3. Complejo Volcánico Ampato 73
2.7.5. Grupo Andahua.....73
2.7.6. Depósitos Cuaternarios 74
2.7.6.1. Depósitos morrénicos (Qpl-mo) 74
2.7.6.2. Depósitos de deslizamientos (Qpl-de) 74

2.7.6.3. Depósitos lacustres (Qpl-la) 74
2.7.6.4. Depósitos aluviales (Qpl-al/Qh-al) 74
2.7.6.5. Depósitos fluviales (Qpl-fl) 74
2.7.6.6. Depósitos coluvio-aluviales (Qh-co-al) 75
2.7.6.7. Depósitos de travertinos (Qpl-tr) 75
2.7.7. Rocas Intrusivas 75
2.7.7.1. Plutón Llanca (Ks-ti/gd) 75
2.7.7.2. Plutón Choco (Ks-ti/gd) 76
2.7.7.3. Stock Chigri (Ks-ti/di) 76

2.8. Marco Tectónico Regional 78
2.8.1. Evolución Tectono-Sedimentaria de la Cordillera de la Costa 78
2.8.1.1. Acreción del Bloque Alóctono Arequipa o Cratón Arequipa - Antofalla 78
2.8.1.2. Sedimentación post-acreción y Tectonismo Herciniano 79
2.8.1.3. Rift Continental Pérmico-Cretácico Inferior y Sedimentación sin-Rift 80
2.8.2. Evolución de la Cuenca Arequipa e inicio de la Tectónica Andina 80
2.8.2.1. Fase Tectónica Distensiva 80
2.8.2.2. Fase Tectónica Compresiva 81
2.8.3. Evolución del Arco Magmático o Cordillera Occidental 81
2.8.4. Evolución de las Cuencas sinorogénicas Cenozoicas 82
2.8.4.1. Sedimentación en las cuencas antearco Cenozoicas 82
2.8.4.2. Sedimentación en las cuencas trasarco e intraarco Cenozoicas 82

2.9. Sismicidad 83
2.9.1. Sismicidad histórica 84
2.9.2. Sismicidad instrumental 86
2.9.3. Fuentes sismogénicas 87
2.9.3.1. Sismos interplaca 87
2.9.3.2. Sismos intraplaca 87
2.9.4. Distribución espacial de la actividad sísmica 88
2.9.4.1. Sismos con foco superficial ($h \leq 60$ km) 89
2.9.4.2. Sismos con foco intermedio ($60 < h \leq 300$ km) 91
2.9.4.3. Sismos con foco profundo ($h > 300$ km) 93
2.9.5. Procesos geológicos detonados por sismos 93
2.9.5.1. Fenómenos de remoción en masa 93

2.10. Análisis Remoto 95
2.10.1. Procesos del análisis remoto 95
2.10.2. Imágenes satelitales 97
2.10.2.1. Resolución espacial 97
2.10.2.2. Resolución espectral 98
2.10.2.3. Resolución temporal 98
2.10.3. LANDSAT 8 98
2.10.4. Modelos de Elevación Digital 100

3. MATERIALES DE ESTUDIO 102

3.1. Delimitación del Área de Estudio 102

3.2. Fisiografía 103
3.2.1. Pendiente 103
3.2.2. Uso actual del suelo 105
3.2.1. Cobertura Vegetal 105

3.3. Geomorfología Local 109
3.3.1. Relieves Volcánicos 109
3.3.1.1. Flujos de lava erosionados por glaciares 110
3.3.1.2. Conos de lava erosionados por glaciares 110
3.3.2. Relieves Exógenos 110
3.3.2.1. Geoformas glaciares 111
3.3.2.2. Geoformas fluviales 111
3.3.2.3. Geoformas aluviolacustres 112

3.4. Geología Local 114
3.4.1. Depósitos del Complejo Volcánico Hualca Hualca 114
3.4.2. Grupo Andahua (Qpl-an_s) 115
3.4.3. Depósitos Aluviales (Qpl-al) 115

3.5. Neotectónica 118
3.5.1. Falla Solarpampa-Puye Puye-Pillo 118
3.5.2. Falla Trigal 120

3.6. Procesamiento y análisis de imágenes LANDSAT 8 con Sistemas de Información Geográfica (SIG) 121
3.6.1. Preprocesamiento 122
3.6.1.1. Corrección radiométrica 122
3.6.1.2. Corrección atmosférica 122
3.6.2. Procesamiento y análisis 123
3.6.2.1. Composición de bandas espectrales 123
3.6.2.2. Clasificación de imágenes 124
3.6.2.3. Realce espectral 125
3.6.2.4. Realce radiométrico 126
3.6.2.5. Realce espacial 126
3.6.3. Imágenes satelitales en la Gestión de Riesgos de Desastres 126

3.7. Procesamiento y análisis de los Modelos de Elevación Digital (MDE) con Sistemas de Información Geográfica (SIG) 127
3.7.1.1. ALOS PALSAR 128

3.8. Modelo de Atenuación Sísmica 130
3.8.1. Fallas activas en la zona de estudio 130
3.8.2. Aceleración sísmica y curvas de atenuación 132
3.8.3. Modelo de atenuación sísmica de Abrahamson y Silva (2007) 132

4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION 134

4.1. Introducción 134

4.2. Fase de Recopilación Bibliográfica 134

4.3. Fase de Gabinete 134

4.4. Fase de Estudio de Campo 135

4.4. Fase de Procesamiento e Integración de Datos 135

4.5. Fase de redacción del informe final 136

5. EVALUACIÓN DEL RIESGO GEOLOGICO DEBIDO A LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA LOCALIDAD DE CABANACONDE 137

5.1. Introducción 137

5.2. Amenaza Sísmica 137

5.3. Peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos 140

5.3.1. Análisis de susceptibilidad 141

5.3.1.1. Factores condicionantes 141

5.3.1.2. Factor desencadenante 145

5.3.1.3. Parámetros de evaluación 146

5.3.1.4. Duración del sismo 147

5.3.1.5. Frecuencia del sismo 147

5.3.2. Matriz de peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos 148

5.4. Análisis de Vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa 151

5.4.1. Vulnerabilidad de la dimensión social 152

5.4.1.1. Exposición social 153

5.4.1.2. Fragilidad Social 154

5.4.1.3. Resiliencia social 157

5.4.2. Vulnerabilidad de la dimensión económica 160

5.4.2.1. Exposición económica 161

5.4.2.2. Fragilidad económica 162

5.4.2.3. Resiliencia económica 166

5.4.3. Matriz de vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos 169

5.5. Análisis de riesgo en localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonado por sismos 171

5.5.1. Escenario de riesgo 171

5.5.2. Niveles de riesgo 172

5.5.3. Matriz de Riesgo 172

5.5.4. Delimitación territorial del riesgo 175

5.5.5. Impactos significativos y consecuencias negativas potenciales 175

5.5.5.1. Niveles de consecuencias....176
5.5.5.2. Niveles de frecuencia de ocurrencia....176
5.5.6. Niveles cualitativos de consecuencias y daños....177
5.6. Control de Riesgos....178
5.6.1. Aceptabilidad o tolerancia de riesgo de fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde....178
5.6.2. Medidas de control....180
5.6.2.1. Medidas de protección....180
5.6.2.2. Medidas de reducción....180
5.6.2.3. Transferencia y compartimiento del riesgo....180
6. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS....181
7. CONCLUSIONES....183
8. RECOMENDACIONES....1834
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS....185
10. ANEXOS....194

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Accesibilidad a la localidad de Cabanaconde 1

Tabla 2. Antecedentes históricos de fenómenos naturales en el Distrito de Cabanaconde 17

Tabla 3. Factores Desencadenantes 28

Tabla 4. Factores Condicionantes 29

Tabla 5. Principales terremotos ocurridos en Perú entre 1513 y 1959 85

Tabla 6. Bandas espectrales LANDSAT 8 100

Tabla 7. Intervalos de Pendientes 103

Tabla 8. Uso actual del suelo en la localidad de Cabanaconde 105

Tabla 9. Cobertura vegetal en la localidad de Cabanaconde 107

Tabla 10. Composiciones comunes de bandas espectrales 124

Tabla 11. Caracteristicas de las fallas en la zona de interes 131

Tabla 12. Definición de parámetros usados en el modelo de atenuación 133

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la localidad de Cabanaconde 1

Figura 2. Probabilidad de excedencia (p) de un proceso de vida útil de una estructura para un periodo de retorno determinado. 26

Figura 3. Mapa de peligrosidad por inundación de la provincia de Tucumán 30

Figura 4. Mapa de Vulnerabilidad de Colonia relacionado a olas de calor 35

Figura 5. Matriz de niveles de riesgo 38

Figura 6. Mapa de riesgo a nivel de manzanas del distrito de chorrillos 39

Figura 7. Niveles de riesgo para la zonificación territorial del riesgo 40

Figura 8. Matriz de consecuencias y daños 43

Figura 9. Niveles de consecuencias 44

Figura 10. Niveles de frecuencia de ocurrencia 44

Figura 11. Matriz de aceptabilidad y/o tolerancia del riesgo 45

Figura 12. Aceptabilidad o tolerancia del riesgo 45

Figura 13. Niveles de priorización 45

Figura 14. Estructura General del Sistema de Gestión del Riesgo de Desastres 49

Figura 15. Mapa de Unidades Hidrográficas del Valle del Colca 58

Figura 16. Mapa Geomorfológico del Valle del Colca 66

Figura 17. Mapa Geológico del Valle del Colca 77

Figura 18. Evolución del macizo de Arequipa durante el Mesoproterozoico 79

Figura 19. Sismos según el margen continental activo. 88

Figura 20. Mapa de Zonamiento Sísmico Regional 90

Figura 21. Mapa Sísmico del Perú: Periodo (1960-2019) 92

Figura 22. Clasificación general de fenómenos de remoción en masa 94

Figura 23. Elementos del análisis remoto 96

Figura 24. Comparación de las bandas espectrales LANDSAT 7 y LANDSAT 8.....99
Figura 25. Imagen satelital de la zona de interés 102
Figura 26. Mapa de pendientes de la localidad de Cabanaconde.....104
Figura 27. Mapa de Uso de Suelos de la localidad de Cabanaconde.....106
Figura 28. Uso de suelos y cobertura vegetal 107
Figura 29. Mapa de Cobertura Vegetal de localidad de Cabanaconde 108
Figura 30. Relieve volcánico denudacional 110
Figura 31. Pared de cañón.....111
Figura 32. Vertientes aluviolacustres.....112
Figura 33. Mapa Geomorfológico de la localidad de Cabanaconde 113
Figura 34. Depósitos del Complejo Volcánico Hualca Hualca.....115
Figura 35. Coladas de lava del Grupo Andahua 116
Figura 36. Mapa Geológico de la localidad de Cabanaconde.....117
Figura 37. Fallas activas en el Valle del Colca – sector Cabanaconde 119
Figura 38. Escarpe del sistema de fallas Solarpampa – Puye Puye - Pillo 120
Figura 39. Imagen satelital del área de estudio.....121
Figura 40. Corrección radiométrica 122
Figura 41.Imagen satelital en color natural.....123
Figura 42. Imagen satelital compuesta en ratios 125
Figura 43. Imagen satelital de la margen izquierda del Rio Colca 127
Figura 44. Modelo de elevación digital de la zona sur del Perú 129
Figura 45. Modelo de sombras del sur del Perú.....130
Figura 46. Grados de aceleración sísmica.....138
Figura 47. Mapa de Amenaza Sísmica de la localidad de Cabanaconde 139

Figura 49. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de los factores condicionantes. 141
Figura 50. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de los factores condicionantes. 141
Figura 51. Matriz de comparación de pares del parámetro pendiente. 142
Figura 52. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro pendiente. 142
Figura 53. Matriz de comparación de pares del parámetro geomorfología. 143
Figura 54. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro geomorfología 143
Figura 55. Matriz de comparación de pares del parámetro geología. 143
Figura 56. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro geología. . 144
Figura 57. Matriz de comparación de pares del parámetro cobertura vegetal. 144
Figura 58. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro cobertura vegetal. 144
Figura 59. Matriz de comparación de pares del parámetro uso de suelos. 145
Figura 60. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro uso de suelos. 145
Figura 61. Matriz de comparación de pares del parámetro aceleración sísmica. 146
Figura 62. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro aceleración sísmica. 146
Figura 63. Matriz de comparación de pares del parámetro duración del sismo 147
Figura 64. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro duración del sismo. 147
Figura 65. Matriz de comparación de pares del parámetro frecuencia de sismos 148

Figura 66. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro frecuencia de sismos 148
Figura 67. Matriz de peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos. 149
Figura 68. Mapa de Peligrosidad por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde 150
Figura 70.Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad social. 152
Figura 71. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad social. 152
Figura 72. Matriz de comparación de pares del parámetro grupo etario. 153
Figura 73. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro grupo etario. 153
Figura 74. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la fragilidad social. 154
Figura 75. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la fragilidad social. 154
Figura 76. Matriz de comparación de pares del parámetro abastecimiento de agua. 155
Figura 77. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro abastecimiento de agua. 155
Figura 78. Matriz de comparación de pares del parámetro servicio higiénico. 156
Figura 79. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro servicio higiénico. 156
Figura 80. Matriz de comparación de pares del parámetro tipo de alumbrado. 156

Figura 81. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro tipo de alumbrado. 157
Figura 82. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la resiliencia social. 158
Figura 83. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la resiliencia social. 158
Figura 84. Matriz de comparación de pares del parámetro experiencia de la población ante sismos. 158
Figura 85. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro experiencia de la población ante sismos. 159
Figura 86. Matriz de comparación de pares del parámetro capacitación en temas de sismos. 159
Figura 87. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro capacitación en temas de sismos. 159
Figura 88. Matriz de comparación de pares del parámetro preparación frente a un sismo. 160
Figura 89. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro preparación frente a un sismo. 160
Figura 90. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la dimensión económica. 161
Figura 91. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la dimensión económica. 161
Figura 92. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación exposición económica. 161

Figura 93. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro exposición económica. 162
Figura 94. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la fragilidad económica. 162
Figura 95. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la fragilidad económica. 163
Figura 96. Matriz de comparación de pares del parámetro material de construcción.....163
Figura 97. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro material de construcción. 164
Figura 98. Matriz de comparación de pares del parámetro antigüedad de la infraestructura. 164
Figura 99. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro antigüedad de la infraestructura.....165
Figura 100. Matriz de comparación de pares del parámetro estado de conservación. 165
Figura 101.Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro estado de conservación.....165
Figura 102. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la resiliencia económica. 166
Figura 103. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la resiliencia económica.. 166
Figura 104. Matriz de comparación de pares del parámetro ingreso promedio familiar.. 166
Figura 105. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro ingreso promedio familiar. 167
Figura 106. Matriz de comparación de pares del parámetro actividad laboral. 167

Figura 107. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro actividad laboral. 168
Figura 108. Matriz de comparación de pares del parámetro ocupación principal. 168
Figura 109. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro ocupación principal. 168
Figura 110. Matriz de vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos. 169
Figura 111. Mapa de Vulnerabilidad por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde 170
Figura 112. Matriz de niveles de riesgo 172
Figura 113. Matriz de riesgo de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos.. 173
Figura 114. Mapa de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde 174
Figura 115. Matriz de nivel de consecuencias 176
Figura 116. Matriz de nivel de frecuencia de ocurrencia. 176
Figura 117. Matriz de consecuencias y daños 177
Figura 118. Medidas cualitativas de consecuencia y daño 177
Figura 119. Matriz de tolerancia al riesgo. 178
Figura 120. Matriz cualitativa de tolerancia al riesgo. 179
Figura 121. Matriz de nivel de priorización. 179

TABLA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Peligros generados por fenómenos de origen natural.....23

Diagrama 2. Peligros Hidrológicos.....24

Diagrama 3. Peligros Geotectónicos.....24

Diagrama 4. Parámetros generales de evaluación de peligro sísmico.....27

Diagrama 5. Exposición de la dimensión social 33

Diagrama 6. Exposición de la dimensión económica 33

Diagrama 7. Exposición de la dimensión ambiental.....34

Diagrama 8. Esquema General del PLANAGERD 2014-2021 52

Diagrama 9. Precipitación Mensual Acumulada (2008-2018) – Estación Madrigal 54

Diagrama 10. Precipitación Anual Acumulada (2008-2018) – Estación Madrigal 55

Diagrama 11. Temperatura Media Mensual (2008-2018) – Estación Madrigal 55

Diagrama 12. Temperatura Máxima Promedio (2008-2018) – Estación Madrigal 56

Diagrama 13. Temperatura Mínima Promedio (2008-2018) – Estación Madrigal.....56

Diagrama 14. Metodología para la caracterización del peligro de remoción en masa generado por sismos.....140

Diagrama 15. Metodología para la caracterización de la vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a un fenómeno de remoción en masa detonado por sismos 151

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 01. Proceso de Analisis Jerarquico 195

Anexo 02. Matriz de Peligrosidad (CENEPRED) 199

Anexo 03. Matriz de Vulnerabilidad (CENEPRED) 200

Anexo 04. Matriz de Riesgo (CENEPRED) 201

Anexo 05. Definiciones del Modelo de Atenuacion de Abrahmason y Silva 203

1. INTRODUCCION

1.1. Ubicación y Accesibilidad

El distrito de Cabanaconde es uno de los veinte distritos de la provincia de Caylloma, está conformado por treinta y cinco centros poblados reconocidos con la categoría de pueblos y anexos a continuación se describe la ubicación y la accesibilidad de la localidad de Cabanaconde.

1.1.1. Ubicación

El distrito de Cabanaconde se encuentra ubicado geográficamente en el extremo suroccidental de la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. El centro poblado de Cabanaconde se localiza en la margen izquierda del Rio Colca a una altura promedio de 3296 m.s.n.m. En el presente estudio se enfoca en el centro poblado de Cabanaconde y alrededores.

1.1.2. Accesibilidad

El acceso a la localidad de Cabanaconde se da por medio de la carretera que conecta Arequipa – Chivay a una distancia de 165 km. Desde la cuidad de Chivay se ubica a 43 km a través de una carretera afirmada. Otra ruta de acceso es por el valle de Majes tomando el desvió hacia Huambo.

Tabla 1

Accesibilidad a la localidad de Cabanaconde

Recorrido	Ruta	Distancia (km)	Tiempo aprox.
Arequipa-Yura-Chivay	34A,1SE	165	3 h
Chivay-Cabanaconde	1SE	55	45 min
Arequipa-Majes-Huambo-Cabanaconde	34A, PAN.SUR, 1SE	245	5 h 15 min

Nota. Adaptado de “Red Vial Departamental” por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2018. Recuperado de: https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html

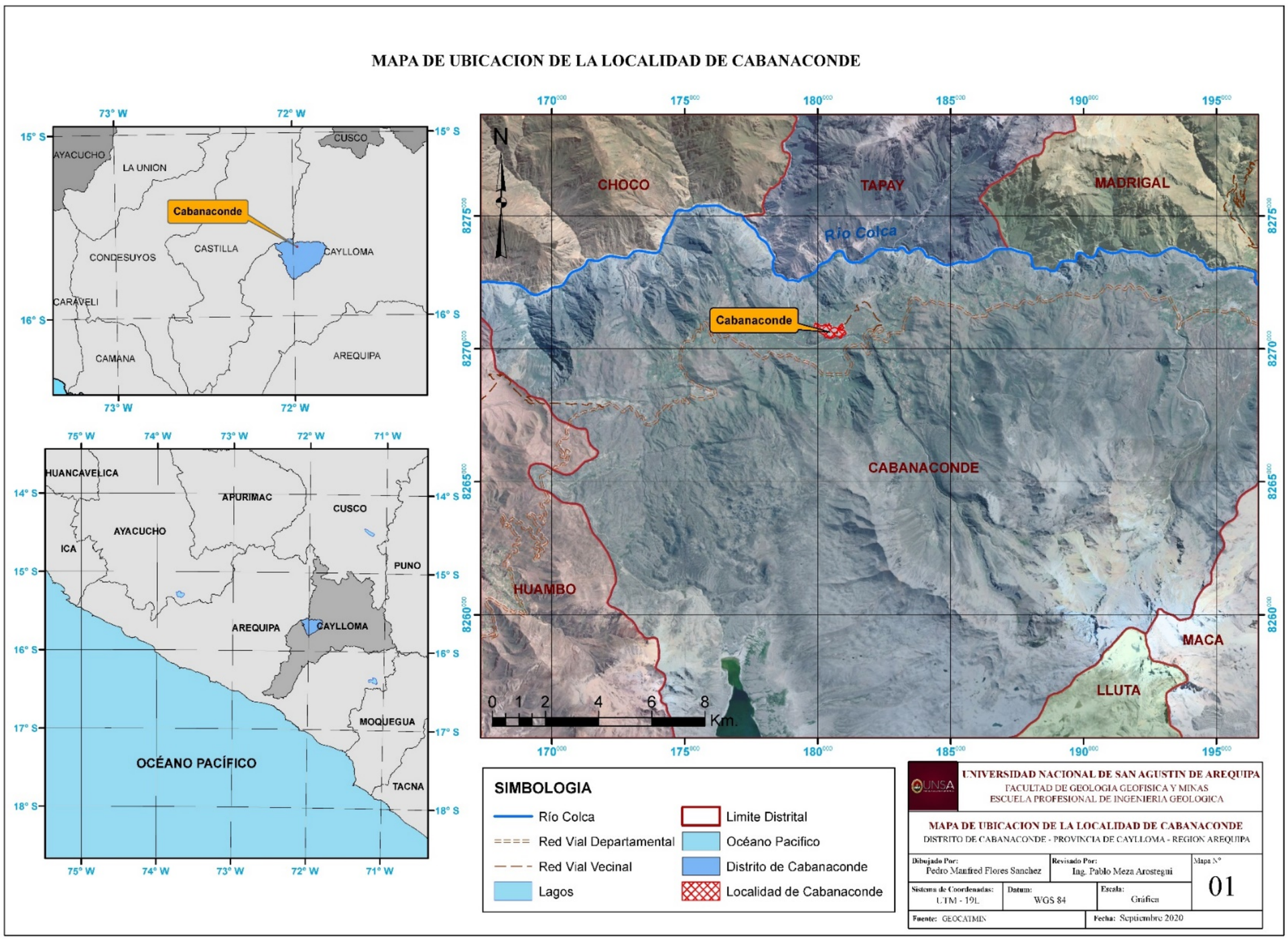


Figura 1. Mapa de ubicación de la localidad de Cabanaconde
Adaptado de “GEOCATMIN” por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

1.2. Justificación

El Valle del Colca se localiza en una región afectada por una geodinámica muy activa que se manifiesta como fenómenos naturales tales como sismos, movimientos en masa, actividad volcánica, lluvias intensas, entre otros. La actividad sísmica es un fenómeno que se encuentra en constante actividad a causa de las fallas geológicas activas y la tectónica que afecta a la zona.

La actividad sísmica sitúa a la localidad de Cabanaconde en una situación de riesgo constante, por tal razón es necesario estudiar la geodinámica de la zona, realizar una evaluación de vulnerabilidad de la infraestructura y de la población para finalmente realizar una evaluación de los peligros geológicos provocados por la actividad sísmica con el fin de proponer medidas de prevención y mitigación necesarias para proteger a la población, la infraestructura de la localidad y las zonas aledañas.

1.3. Planteamiento del Problema

1.3.1. Descripción del problema

Los sismos de magnitud moderada a alta desencadenan peligros geológicos como movimientos en masa, derrumbes, entre otros. La localidad de Cabanaconde se encuentra en una zona altamente sísmica y propensa a sufrir derrumbes debido a la fragilidad de sus infraestructuras. Estos factores ponen en constante riesgo la integridad física de la población, terrenos de cultivo, infraestructura de la localidad y de las carreteras.

1.3.2. Formulación del problema

Este problema puede ser formulado interrogativamente mediante las siguientes preguntas:

1.3.2.1. Problema principal

a. ¿Cuál es el nivel de daño que un sismo de gran magnitud produciría en las dimensiones sociales, económicas y ambientales de la localidad de Cabanaconde?

b. ¿Cuál es el nivel de riesgo al cual está expuesto la dimensión social y económica de la localidad de Cabanaconde ante el suceso de un sismo de gran magnitud?

1.3.2.2. Problemas secundarios

a. ¿Cuáles son las características de los agentes geodinámicos que pueden desencadenar movimientos sísmicos en la localidad de Cabanaconde?
b. ¿Cuáles son las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la localidad de Cabanaconde?
c. ¿Cuál es el nivel de peligrosidad generada por la actividad sísmica en la localidad de Cabanaconde y alrededores?
d. ¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad de la infraestructura pública y privada de la localidad de Cabanaconde?
e. ¿Cuál es el nivel de resiliencia de la población de la localidad de Cabanaconde?
f. ¿Cuáles son las medidas de prevención y mitigación ante la incidencia de un sismo de gran magnitud en la localidad de Cabanaconde?

1.4. Alcances y Limitaciones

1.4.1. Alcances

El desarrollo de este proyecto nos permitirá actualizar la Geología de la localidad de Cabanaconde, caracterizar geotécnicamente las zonas de interés, sistematizar los agentes geodinámicos presentes en la zona de estudio. Se caracterizará los peligros geológicos desencadenados por sismos y se les asignará un nivel de peligrosidad, se asignará un nivel de vulnerabilidad a la infraestructura, así como un nivel de resiliencia de la población, a partir de esto se realizará un estudio de riesgos y se creará mapas de peligrosidad y riesgo. Finalmente se propondrá medidas de mitigación y prevención.

1.4.2. Limitaciones

La presente investigación en el tiempo solo comprende los últimos 40 años, ya que no se tiene a disposición datos de sucesos de años anteriores. El presupuesto y el personal con el que se cuenta, limita la caracterización geotécnica a zonas específicas, al cartografiado con una precisión de 1/5000, al acceso de base de datos de dominio público y a software en su modo básico. Las bases de datos de acceso público a las que fueron consultadas carecen de información actualizada en la zona de estudio.

La investigación analiza el nivel de peligrosidad y vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde, pero acepta y no discute otros aspectos como la aplicación eficiente del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD) por parte de las autoridades locales y regionales, las normas vigentes y las metodologías utilizadas por entidades estatales para la determinación de los niveles de peligrosidad y riesgo.

1.5. Variables e Indicadores

1.5.1. Variables independientes

a. Neotectónica
b. Actividad Sísmica
c. Naturaleza mecánica de los suelos y rocas
d. Unidades litológicas y geomorfológicas
e. Condiciones físicas de las infraestructuras

1.5.2. Variables dependientes

a. Deslizamientos
b. Caída de rocas
c. Derrumbes

1.5.3. Indicadores

a. Comportamiento cinemático de fallas y placas tectónicas

b. Geometría y estado de conservación de las infraestructuras

c. Tipos y usos del suelo

d. Relieve

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Estudiar y evaluar la peligrosidad geológica generada por la actividad sísmica y la vulnerabilidad en la localidad de Cabanaconde, proponer un escenario probable de sismo a fin de determinar el nivel de riesgo en la localidad y proponer medidas de control de riesgo.

1.6.2. Objetivos secundarios

1. Caracterizar las unidades litológicas y geomorfológicas de la localidad de Cabanaconde a partir del uso de mapas, imágenes satelitales y estudios de campo.
2. Caracterizar y sistematizar los agentes geodinámicos presentes en la zona de estudio.
3. Evaluar la sismicidad producida por tectónica y fallas activas.
4. Caracterizar el peligro geológico generado por actividad sísmica dentro de la zona de estudio y asignarles un nivel de peligrosidad.
5. Evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura y de la población de la localidad de Cabanaconde.
6. Realizar la evaluación de riesgos a partir de la simulación de un escenario probable
7. Proponer medidas de prevención y mitigación en las zonas más vulnerables.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis general

a. El sistema de fallas activas Solarpampa y Trigal, aumenta de manera considerable la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud moderada y en consecuencia el peligro geológico generado por actividad sísmica de la zona de estudio.

b. Proponer un escenario de riesgo sísmico en la localidad de Cabanaconde permitirá reconocer las zonas que serían las más afectadas por la ocurrencia de un sismo.

c. La determinación de los niveles de riesgo sísmico permitirá la correcta y eficiente aplicación de los Sistemas de Gestión de Desastres en la localidad de Cabanaconde.

1.7.2. Hipótesis secundarias

a. Las características físicas de las unidades litológicas influyen en los niveles de peligrosidad de la localidad de Cabanaconde.

b. Las características físicas, mecánicas y el uso de los suelos influyen en los niveles de peligrosidad de la localidad de Cabanaconde.

c. La magnitud de la manifestación de los agentes geodinámicos controla el nivel de peligrosidad en la localidad de Cabanaconde.

d. Las características físicas de la infraestructura de la localidad de Cabanaconde, indican un nivel de vulnerabilidad media a muy alta.

e. La evaluación de la resiliencia y fragilidad en la localidad de Cabanaconde indica un nivel de vulnerabilidad alto de la población frente a un movimiento sísmico de gran magnitud.

2. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes bibliográficos

En los últimos años el Valle del Colca ha sido foco de atención de investigación geológica a consecuencia de los procesos geodinámicos que tienen lugar en toda la extensión del Valle. El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), El Instituto Geofísico del Perú (IGP) e investigadores de diversas instituciones han publicado informes técnicos y artículos de investigación en la zona de estudio con el fin de caracterizar la geodinámica de la zona y del estudio de los peligros geológicos que ponen en riesgo potencial a las localidades próximas al valle. Para el presente estudio de riesgos por sismicidad en la localidad de Cabanaconde se tomó en cuenta los siguientes estudios e informes técnicos provistos por las entidades antes mencionadas:

a. Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la cuenca Rio Camaná - Majes – Colca. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

Este informe técnico se desarrolló en el marco del Programa Nacional de Riesgos Geológicos del Territorio, Subprograma de Estudios Geoambientales por parte de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Zavala, Vilchez y Rosado (2008) analizaron los peligros geológicos existentes en la cuenca del río Camaná – Majes Colca y obtuvieron como resultados preliminares: el cartografiado e inventariado de peligros a escala 1:50 000, con información de campo y gabinete que incluye 769 ocurrencias y un inventario de pasivos ambientales generados por actividad minera y urbana. Además, presentó el bosquejo del contenido del boletín que publicó el INGEMMET el año 2014.

Este informe brinda información preliminar acerca de los peligros y los procesos geodinámicos que fueron cartografiados, comentando su vulnerabilidad y recomendando medidas de mitigación y prevención en la cuenca del Rio Camaná - Majes - Colca.

b. Informe Técnico N°02-2013: Aspectos Sismológicos del Sismo de Huambo - Cabanaconde (Arequipa) del 17 de Julio, 2013, 5.7ML (Instituto Geofísico del Perú, 2013).

El siguiente informe técnico describe los parámetros hipocentrales, intensidad, orientación de la fuente, eventos precursores y replicas, así como la interpretación sismotectónica del sismo ocurrido el día 17 de julio del año 2013, que tuvo lugar a nueve kilómetros al NE de la localidad de Huambo. Primeramente, se comenta las características sismológicas y consecuencias en las poblaciones cercanas de los sismos que ocurrieron años anteriores.

Se evaluó la distribución de las deformaciones tectónicas que tienen lugar en la zona de estudio a causa de las fallas Ichupampa, Huanca y el sistema Huambo – Cabanaconde, en donde destacan las fallas Solarpampa y Trigal. Se ubica en un mapa tectónico la ubicación de los sismos ocurridos años anteriores que se relacionan con los sistemas que fallas. Se estudió los parámetros hipocentrales del sismo y se concluyó que el sismo tuvo una profundidad de siete kilómetros, una magnitud de 5.7 ML, una intensidad VI en la escala MM en Huambo y Cabanaconde y una magnitud momento de 6.0 Mw.

Se realizó la evaluación del radio de percepción en la región del Valle del Colca, en las Localidades de Huambo y Cabanaconde el sismo se sintió muy fuerte, se reportó derrumbes y daños severos en casas de material noble, se produjo desplazamientos y caídas de roca en las carreteras en cuanto a las localidades de Maca, Lari y Madrigal el

sismo se sintió fuerte por toda la población, se reportaron algunas viviendas dañadas y derrumbes de rocas cerca de la localidad de Tapay y a lo largo del Cañón del Colca. A partir del análisis de los datos obtenidos por varias estaciones sísmicas que trabajan en la zona se concluyeron un número total de nueve precursores y replicas, se determinó que fue la falla Solarpampa desencadeno el sismo ya que su mecanismo focal es similar al que el sismo presenta, en el año 1998 la misma falla dio origen a un evento sísmico de 5.2ML.

Finalmente, el análisis de las formas de onda del grupo de la onda P, indica que el sismo principal, sus precursores y replicas tendrían una misma fuente de origen y similar proceso de ruptura, con esto se puso en evidencia que, debido al gran número de fallas tectónicas, lineamientos y vulcanismo activo la región del Valle del Colca es altamente sísmica.

c. Estudio Geoambiental en la Cuenca del Rio Colca - Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 57, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2014

Este boletín se desarrolló en el marco del Programa Nacional de Riesgos Geológicos del Territorio, Subprograma de Estudios Geoambientales que realiza la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. En este informe se analizó los siguientes aspectos físicos de la cuenca del río Colca: geomorfología, litología, hidrogeología, peligros geológicos y geoturismo. Se caracterizó y cartografió las unidades geomorfológicas y las unidades geológicas en un contexto litológico - estructural. Se agrupo las unidades geológicas en función a su permeabilidad, con lo cual se pudo generar un mapa hidrogeológico de la cuenca. Se realizó un análisis en el desarrollo antrópico (historia, población, desarrollo urbano, infraestructura y actividades económicas), así como de carácter natural (suelo,

vegetación, agua, minerales, paisaje, áreas reservadas, etc.). Se realizó un análisis de los recursos e infraestructura, patrimonio cultural y natural, impactos antrópicos, vulnerabilidad y calidad de las aguas superficiales de la cuenca. En este informe se definen los peligros naturales, se describe la geodinámica presente en la zona, se elaboró un inventario de los peligros geológicos relacionados a movimientos en masa, peligros relacionados la a hidrogeología y a los peligros sísmicos. Se describe su vulnerabilidad y se propone recomendaciones para su mitigación y prevención.

d. Informe técnico N°01-2015: Aspectos Sismológicos del Sismo de Cabanaconde (Arequipa) del 28 de febrero, 2015 (4.5ML). Instituto Geofísico del Perú

El siguiente informe técnico describe los parámetros hipocentrales, intensidad, orientación de la fuente, eventos precursores y replicas, así como la interpretación sismotectónica del sismo ocurrido el día 28 de febrero del año 2015 que tuvo lugar a seis kilómetros al SO de la localidad de Cabanaconde. Primeramente, se comentó las características sismológicas y consecuencias en las poblaciones cercanas de los sismos que ocurrieron años anteriores.

Se evaluó la distribución de las deformaciones tectónicas que tienen lugar en la zona de estudio a causa de las fallas Ichupampa, Huanca y el sistema Huambo – Cabanaconde, en donde sobresalen las fallas Solarpampa y Trigal. Se estudió los parámetros hipocentrales del sismo y se concluyó que el sismo tuvo una profundidad de cinco kilómetros, una magnitud de 4.5 ML, intensidad máxima de III en la escala MM en Cabanaconde, Huambo y Tapay.

Se realizó la evaluación del radio de percepción en la región del Valle del Colca, en las Localidades de Huambo, Cabanaconde y Tapay, el sismo se sintió fuerte por toda la población, se reportó derrumbes y daños severos en casas de material noble, se

produjo desplazamientos y caídas de roca en la ruta Maca – Cabanaconde y colapso de algunos canales de regadío.

A partir del análisis de los datos obtenidos por varias estaciones sísmicas que trabajan en la zona, se concluye que el sismo presenta un mecanismo focal de tipo normal con planos orientados en dirección EO, se identificaron gran número de precursores y replicas cinco de los cuales fueron percibidos por la población, se determinó que la reactivación de la falla Solarpampa fue la causante del sismo ya que su mecanismo focal es similar a la que el sismo presenta, en el año 1998 y 2013 la misma falla dio origen a eventos sísmicos de 5.2ML y 5.7ML respectivamente. Se pone en evidencia nuevamente que, debido al gran número de fallas tectónicas, lineamientos y vulcanismo activo la región del Valle del Colca es altamente sísmica.

e. Estimación del Escenario de Riesgo por Sismos del Distrito de Cabanaconde y el anexo Pinchollo para implementar medidas de preparación en la Gestión de Riesgos de Desastres. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), 2015

Este informe elaboró un análisis de vulnerabilidad a partir de la caracterización de la infraestructura de las localidades tomando en cuenta factores como su estado de conservación, material de construcción, antigüedad entre otros factores, además de considerar los elementos expuestos a peligro como establecimientos de salud y educación y el grado de resiliencia de la población a través de encuestas sobre la preparación de la población frente a eventos sísmicos.

En este informe se concluyó que la localidad de Cabanaconde presenta una vulnerabilidad media a muy alta tomando en cuenta los factores antes mencionados. Finalmente, el informe recomienda a las instituciones técnico-científicas continuar con el monitoreo de la sismicidad y de las fallas activas, realizar evaluaciones y/o zonificación sísmica y geotécnica del suelo del distrito de Cabanaconde caracterizando

mejor la vulnerabilidad del terreno a fin de que los gobiernos regionales implementen las recomendaciones que se desprendan de estos estudios.

f. Informe de Evaluación del Riesgo por lluvias intensas en el Área de influencia del Centro Poblado de Cabanaconde. Centro de Estimación, Prevención del Riesgo de Desastres (CENEPRED), 2017

Este informe se elaboró a consecuencia de las lluvias intensas que tuvieron lugar en el centro poblado de Cabanaconde el verano del año 2017 a causa del fenómeno "Niño Costero". El fenómeno causó graves daños a la zona urbana como a la agrícola. Este informe describe las características generales de la localidad como: población, grupo etario, ubicación geográfica además de características generales de la zona urbana como el material de construcción de las viviendas, la situación de la salud, la actividad agropecuaria, actividad turística y comercial. Su condición climática es de estepa local y se clasifica como Bsk por el sistema Köppen-Geiger. El verano del año 2017 se presentaron lluvias anómalas intensas catalogadas como "Extremadamente Lluvioso".

A partir de la utilización de la metodología para la determinación de la peligrosidad y tomando en cuenta factores condicionantes como húmeda, incremento anómalo de la temperatura del mar y factores desencadenantes como la precipitación se elaboró un mapa de peligrosidad en base a los elementos expuestos en la localidad. Se realizó también en análisis de vulnerabilidad de la localidad analizando la dimensión social y económica. Finalmente, con estos datos se pudo calcular el nivel de riesgo por lluvias en la localidad de Cabanaconde, se calculó las perdidas aproximadas en soles si ocurriera un evento similar y se recomendó la construcción de cimientos y sobre cimientos de concreto además de capacitar a la población sobre las normas técnicas de construcción y su importancia como medida de seguridad.

g. Neotectónica, Evolución del Relieve y Peligro Sísmico en la Región Arequipa – Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 64 Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2017

Este boletín se desarrolló bajo la supervisión de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico que viene realizando estudios de neotectónica y paleosismología a fin de conocer la evolución geodinámica de la cadena andina y determinar áreas tectónicamente activas y su relación con el peligro sísmico. El siguiente informe se elaboró en base a recopilación bibliográfica, fotointerpretación y estudios de campo. Se caracterizó las unidades litoestratigráficas de la ciudad de Arequipa, su edad, registro fósil, su fase tectónica, y su régimen tectónico.

Se analizó la evolución de megaestructuras (Cordillera de la costa, Cuenca Arequipa, cordillera Occidental) y sus correspondientes etapas relacionadas a la sedimentación y la actividad tectónica. En este informe se define los conceptos de neotectónica y tectónica activa, se emplearon diferentes técnicas para determinar la actividad de las fallas y sus capacidades sismogénicas como el análisis estratigráfico, dataciones, microtectónica, geofísica aplicada entre otras. Producto de estos análisis se describen las fallas más importantes en la región, sus ubicaciones, longitudes, direcciones, buzamientos, cinemática, etc. Estos datos permitieron la elaboración de mapas neotectónicos actualizados de las diferentes regiones donde las fallas tienen influencia. La estratigrafía se desarrolla en más profundidad en las cuencas, estudiando su origen y evolución.

Más adelante se describen los procesos geológicos detonados por sismos, tales como tsunamis, movimientos en masa y licuefacción. Se aplica una metodología para la creación de mapas de aceleración sísmica en las zonas donde las fallas de mayor

importancia. A partir de la composición de los mapas temáticos previamente elaborados (estructural, litológico, geomorfológico, de pendientes, cobertura vegetal y uso de suelo y/o asentamientos) se elaboran mapas de susceptibilidad a procesos de movimientos en masa y licuefacción. La integración de estos mapas temáticos con los mapas de aceleración sísmica y atenuación respecto a la distancia epicentral, dan como resultado los mapas de peligrosidad a procesos de movimientos en masa y procesos de licuefacción.

Finalmente se muestra la aplicación de los mapas de peligrosidad sísmica en temas de ordenamiento territorial y en la gestión del riesgo de desastres.

h. Geodiversidad y Patrimonio Geológico en el Valle del Colca – Boletín Serie I: Patrimonio y Geoturismo N°9 Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2019

El objetivo de este estudio es dar a conocer a la sociedad los principales elementos de la Geodiversidad que posee el Valle del Colca, la evolución del paisaje actual del valle y definir elementos y procesos geológicos que constituyen un patrimonio geológico y promover el desarrollo del geoturismo en el Valle del Colca.

Primeramente, se describe los aspectos geográficos del Colca, ubicación geográfica, red vial y vías de acceso y rutas internas., clima, hidrología, drenaje y vegetación. Se comenta también la historia prehispánica con la ocupación humana y relata el modo de vida de las sociedades que ocuparon el territorio. A continuación, se describe los aspectos geológicos en el valle por medio de 16 episodios geológicos a través del tiempo que intentan dilucidar la evolución geológica del valle y Cañón del Colca. Además de realizarse un análisis neotectónico de las fallas principales se describió la morfología actual y procesos geodinámicos.

En cuanto a la geomorfología se identificaron dos grandes grupos de unidades de carácter degradacional y denudacional y unidades de carácter deposicional. A

continuación, se describe la formación del Cañón de la Colca a partir de una interpretación tectónica, volcánica y geomorfológica. Se describe también la hidrología en cuanto a manantiales y manifestaciones termales en el valle. La actividad minera y recursos minerales también tienen lugar en el valle principalmente yacimientos de travertinos.

Finalmente se realizó el estudio de la Geodiversidad y Patrimonio Geológico tomando en cuenta los lugares geoturísticos de potencial interés, las georutas y los circuitos turísticos, y se hace un análisis del turismo y se evalúa las propuestas que se tienen para el crecimiento del geoturismo y se concluye que el potencial turístico del Colca, a partir de su Geodiversidad y Patrimonio Geológico, constituyen elementos para constituir nuevos productos turísticos en la zona: turismo termal, turismo educativo, turismo geológico especializado (neotectónica, volcanes y deslizamientos).

2.1.2. Antecedentes históricos

El distrito de Cabanaconde ha sido afectado a través de la historia por una variedad de fenómenos naturales como: heladas, deslizamientos, actividad volcánica, sismos, aludes, friajes entre otros. Para la realización de un estudio de riesgos geológicos es necesario tener un registro histórico de fenómenos que tuvieron lugar en la zona de estudio, así como conocer sus magnitudes y sus consecuencias, a fin de ser tomadas en cuenta al momento de la realización de un nuevo estudio. Con la información disponible por la base de datos informática DesInventar (base de datos internacional) se recopiló 14 eventos históricos ocasionados por fenómenos naturales relacionados a la geodinámica interna ocurridos en el distrito de Cabanaconde desde el año 1970 hasta el año 2015 (Ver Tabla 2).

Tabla 2

Antecedentes históricos de fenómenos naturales en el Distrito de Cabanaconde

Fecha	Evento	Ubicación	Descripción
27/11/71	Helada	Cabanaconde	El 90% de cultivos de pan llevar quemados.
13/11/76	Deslizamiento	Pueblo de Ajpi	Deslizamientos en cerros que circundan la región. Se dispuso la reubicación de los habitantes al distrito de Cabanaconde, se contó con el apoyo de Defensa Civil y de los sectores públicos. Se estima que 50 familias fueron damnificadas.
07/07/79	Deslizamiento	Cabanaconde	Continuos deslizamientos de un cerro aíslan distritos. Treinta y seis kilómetros de carretera corren peligro de desaparecer a causa de los deslizamientos. Pese a esfuerzos, la carretera no puede quedar permanentemente habilitada varias semanas a causa de los deslizamientos.
14/11/84	Deslizamiento	Pueblo de Llatica (anexo).	Deslizamiento en el cerro Matasunca de 800 metros de altura a causa de una falla geológica, afectaron cultivos frutícolas.
01/03/86	Actividad Volcánica	Pinchollo	Volcanes de pequeñas dimensiones inician actividad volcánica, vacunos, ovinos y alpacunos calcinados o muertos por asfixia. Los animales son encontrados muertos cerca de cráteres, a causa de posibles emanaciones sulfurosas.
30/01/91	Alud	Quebrada Huayuray cerca de Pinchollo	El casquete glaciar del volcán se fractura provocando el deslizamiento de enormes bloques de hielo que causan avalanchas y aludes. Se formó un embalse de aproximadamente 20,000m^3.

(continuación)

Antecedentes históricos de fenómenos naturales en el Distrito de Cabanaconde (continuación)

Fecha	Evento	Ubicación	Descripción
12/04/98	Sismo	Cabanaconde	Se registró a las 6:49 pm; tuvo 14 réplicas (hasta las 6:45 am del 13/04). El epicentro se ubicó entre los pueblos de Ayo, Choco (Castilla) y Huambo (Caylloma).
19/05/98	Sismo	A 206 km. al este de Arequipa.	Fuerte sismo se produjo a 4:25 p.m. Muros de viviendas se agrietaron.
23/06/01	Sismo	Epicentro a 82 Km. al NE de Ocoña - Arequipa.	Terremoto en el sur del Perú a horas 3:33 pm; afecta departamentos de Arequipa Moquegua Tacna y Ayacucho. Intensidad registrada entre VII y VIII en la Escala MM. Los registros son de carácter complejo debido a las continuas replicas producidas post - sismo.
13/12/02	Sismo	Acpi	La agricultura, principal actividad económica de la zona en peligro de perderse.
16/07/13	Sismo	Cabanaconde - Huambo	Sismo de 5.7 ML deja dos heridos y una evaluación final detalla que 22 viviendas quedaron inhabilitadas, un total de 110 damnificados. La vía quedó bloqueada por los derrumbes.
17/07/13	Deslizamiento	Cabanaconde	Derrumbes en las carreteras, derrumbes y daños severos en viviendas de material noble.
28/02/15	Sismo	Cabanaconde	Sismo con Epicentro ubicado a seis kilómetros al SO de la localidad de Cabanaconde con una magnitud de 4.5 ML. Daño menor en viviendas construidas de material noble y con mucha antigüedad. Se presentaron deslizamientos menores de tierras y piedras en el tramo de la carretera Maca - Cabanaconde.

Nota. Adaptado de "Perú - Inventario histórico de desastres" por DesInventar, (2013). Recuperado de: https://online.desinventar.org/desinventar/#PER-1250695241-peru_inventario_historico_de_desastres

2.2. Marco Normativo

A través de los últimos años la normativa legal con relación a la Gestión del Riesgo de Desastres se formalizo a través de instrumentos legislativos como leyes, decretos supremos, resoluciones ministeriales y jefaturales, teniendo como producto las siguientes acciones legales:

a. Se promulga la Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), ley N° 29664. (Congreso de la Republica, 2011)
b. Mediante el Decreto Supremo N° 048-2011-PCM, se aprueba el reglamento de la ley N° 29664, del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2011)
c. Se promulga la Ley de Reasentamiento Poblacional para Zonas de Muy Alto Riesgo No Mitigable, Ley N° 29869. (Congreso de la Republica, 2012)
d. Mediante la Resolución Directoral N° 005-2012-EF/63.01, se aprueban las pautas metodológicas para la incorporación del análisis de riesgos en los proyectos de inversión pública. (Ministerio de Economía y Finanzas, 2012)
e. Mediante el Decreto Supremo N°111-2012-PCM, se incorpora la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres como Política Nacional de obligatorio cumplimiento para las entidades del Gobierno Nacional. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2012)
f. Mediante la Resolución Ministerial N° 334-2012-PCM, se aprueba los "Lineamientos Técnicos del Proceso de Estimación del Riesgo de Desastre (Presidencia del Consejo de Ministros, 2012)
g. Mediante la Resolución Ministerial N° 222-2013-PCM, se aprueba los Lineamientos Técnicos del Proceso de Prevención del Riesgo de Desastres". (Presidencia del Consejo de Ministros, 2013)

h. Mediante la Resolución Ministerial N°220-2013-PCM, se aprueba los Lineamientos Técnicos para el Proceso de Reducción del Riesgo de Desastres. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2013)

i. Mediante el decreto Supremo Nº 115–2013–PCM, se aprueba el Reglamento de la Ley N° 29869, Ley de Reasentamiento Poblacional para las Zonas de Muy Alto Riego No Mitigable. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2013)

j. Decreto Supremo Nº 034-2014-PCM, que dispone la aprobación del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – PLANAGERD 2014-2021. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2014)

k. Resolución Jefatural N° 112 – 2014 – CENEPRED/J, que aprueba el "Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales", 2da Versión. (Centro Nacional de Estimacion, Prevencion y Reduccion del Riesgo de Desastres, 2014)

2.3. Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales

Los fenómenos naturales ocurren diariamente en todo el territorio, difieren en naturaleza e intensidad, y tienen cierto impacto en las dimensiones (social, económica y ambiental) de las poblaciones. Los impactos pueden ser desde imperceptibles hasta catastróficos. A fin de anular o reducir los impactos negativos de estos fenómenos naturales, las instituciones públicas encargadas ponen en funcionamiento el Sistema de Gestión de Desastres.

En esta sección se desarrollará los criterios básicos considerados para la realización de una evaluación de riesgos, aprobados por la normativa vigente y que posteriormente servirán de base teórica y normativa para la realización del Estudio de Riesgo Sísmico en la Localidad de Cabanaconde.

2.3.1. Definiciones Básicas

2.3.1.1. Peligro

El peligro es la probabilidad de la ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la actividad del hombre, potencialmente dañino, que afecta de manera directa a la dimensión social, económica y ambiental de una localidad o comunidad.

2.3.1.2. Desastre

El Instituto Nacional de Defensa Civil propone una definición de desastre.

> Es una interrupción severa del funcionamiento de una comunidad causada por un peligro, de origen natural, inducido por la actividad del hombre, ocasionando pérdidas de vidas humanas, considerables perdidas de bienes materiales, daños a los medios de producción, al ambiente y a los bienes culturales. (Bisbal et al., 2006, p.11)

2.3.1.3. Riesgo

La definición de riesgo ha sido un tema de discusión a través de los años debido a su amplia variabilidad en las diferentes sociedades del globo. Montz, Tobin y Hagelman (2017) amplían el contexto del riesgo enfatizando que no solo es la acción de la naturaleza sobre el humano, sino también la interacción de la sociedad con la naturaleza la que define el riesgo. Renn (2003) define el riesgo de desastres naturales como una relación de eventos naturales (parcialmente alterados y amplificados por la acción humana), economía, desarrollos tecnológicos y sociales y acciones impulsadas por políticas.

La Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres UNISDR (2004), propone una definición de riesgo que resume el concepto de forma general. “El riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro

ambiental) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad".

De esta definición se puede concluir que el riesgo es una consecuencia de la exposición de factores vulnerables de una sociedad a un peligro que resultan en el deterioro en las dimensiones de la sociedad (físico, psicológico, social, financiero, etc.) y su entorno de vida, yuxtapuesto a la capacidad de la sociedad para hacer frente al impacto.

Una relación general ya ampliamente aceptada entre la relación del peligro y el riesgo está dada por la siguiente fórmula:

Riesgo = peligro x vulnerabilidad

2.3.1.4. Preparación

Es el conjunto de actividades y medidas tomadas anticipadamente para asegurar una respuesta eficaz ante el impacto de amenazas, incluyendo la emisión oportunidad y efectiva de los sistemas de gestión de riesgos.

2.3.1.5. Prevención

Son actividades realizadas con el fin de evitar un impacto adverso de peligros, y medios empleados para minimizar los desastres se realiza a partir de consideraciones de costo/beneficio. La concientización y educación de la gestión de desastres, contribuyen a crear una "cultura de prevención" en la sociedad.

2.3.1.6. Mitigación

Son medidas estructurales y no-estructurales emprendidas para la reducción del impacto adverso de los peligros naturales y de la degradación ambiental.

2.3.2. Peligros generados por fenómenos de origen natural

"El peligro, es la probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos." (CENEPRED, 2014). Según esta definición los peligros geológicos no

solo son ocurrencias de fenómenos naturales sino también influye en su caracterización, factores como intensidad, localización y extensión.

Los fenómenos de origen natural son la consecuencia de los procesos geodinámicos de la corteza terrestre y se les denomina peligros naturales. Las manifestaciones de los peligros naturales difieren en su origen y en su impacto en cada caso, ya que factores como la geología, geomorfología, hidrografía y demografía son variables en todo el globo

CENEPRED propone una clasificación que divide los peligros generados por fenómenos de origen natural, en base a la geodinámica, hidrometereológica y oceanografía (Ver Diagrama. 1).

Diagrama 1. Peligros generados por fenómenos de origen natural
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 22), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Teniendo en consideración que no existe un sistema universal para la clasificación de los peligros naturales, hacemos referencia a una clasificación sugerida por el Centro de Investigación en Epidemiologia de Desastres (CRD) y Munich Re.

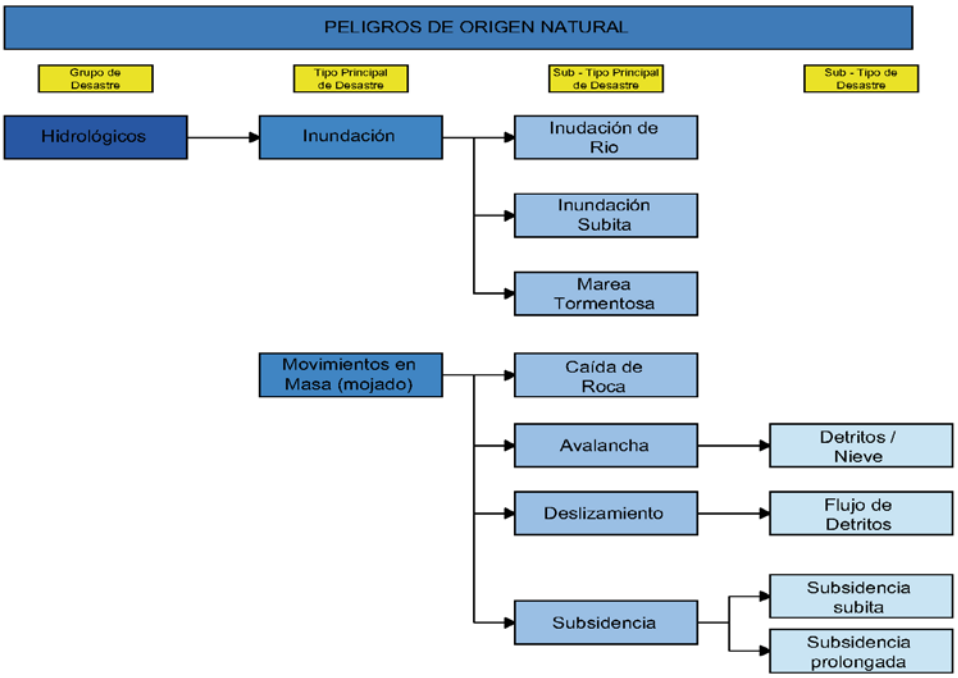


Diagrama 2. Peligros Hidrológicos
Adaptado de *Anual Disaster Stadistical Review 2013: The Number and Trends* (p.10) por Guha-Sapir, D., Below, R. y Hoyois, Ph. (2014). Brussels: CRED.

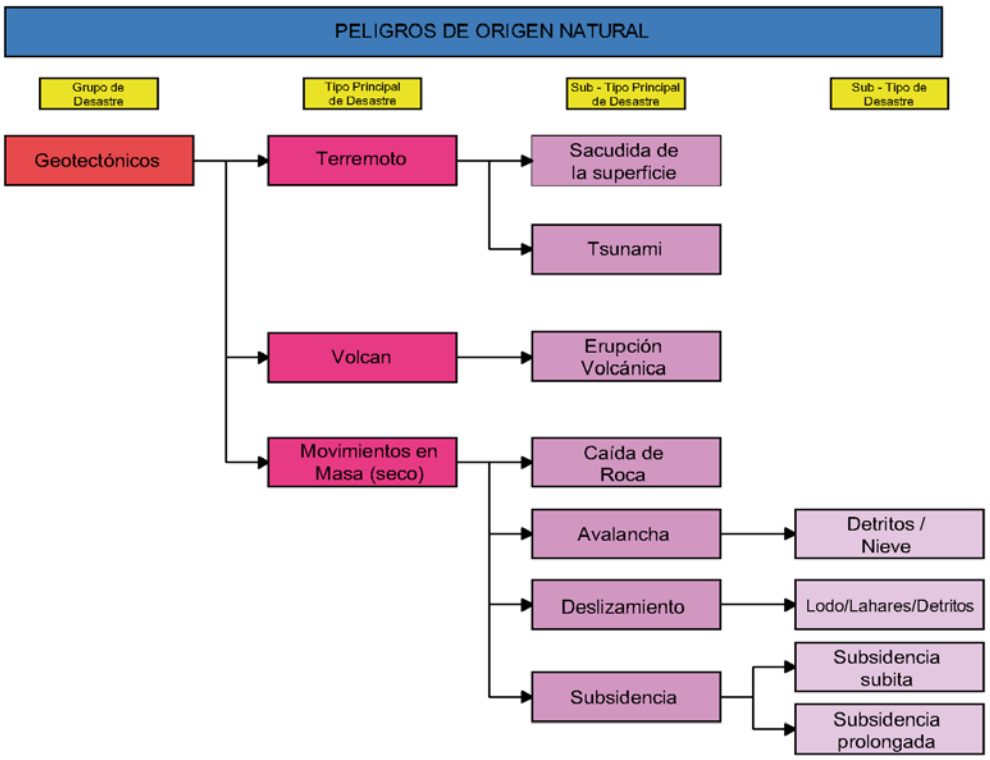


Diagrama 3. Peligros Geotectónicos
Adaptado de *Anual Disaster Stadistical Review 2013: The Number and Trends* (p.10) por Guha-Sapir, D., Below, R. y Hoyois, Ph. (2014). Brussels: CRED.

Esta clasificación es simple y divide los peligros geológicos en dos subcategorías: peligros geotectónicos e hidrológicos Los peligros geotectónicos son resultados de procesos naturales que tienen origen en el interior de la tierra y el manto resultando en el movimiento permanente de las placas tectónicas. Por otra parte, los peligros hidrológicos son procesos naturales que tienen origen en la atmosfera resultando en variaciones climáticas.

2.3.3. Análisis de peligrosidad

Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002) propone que la peligrosidad se refiere a los procesos geológicos y que puede expresarse como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de determinada intensidad en un intervalo de tiempo definido, la peligrosidad también se puede expresar a partir del periodo de retorno $T = 1/ P_{(a)}$ que se refiere a los años transcurridos entre dos eventos de semejantes características, que es la inversa a la probabilidad anual de excedencia ($P_{(a)}$).

> La probabilidad p de que un valor determinado de intensidad (por ejemplo, un valor de aceleración en el caso de terremotos) correspondiente a un periodo medio T (años) sea excedido durante un periodo de tiempo determinado t se expresa como $p = 1 – (1 – 1/T)^t$ .El tiempo t (años) puede ser el tiempo de vida de una presa o de un edificio, este es el tiempo de exposición o periodo de vida de la estructura. (Gonzales de Vallejo et al., 2002, p. 60).

La figura 2 relaciona las curvas de probabilidad de excedencia en función de periodo de vida útil (t) y del periodo de retorno T.

Para el análisis y evaluación de la peligrosidad se utiliza una metodología sugerida por el gobierno peruano a través del CENEPRED. Esta metodología consta de una serie de procedimientos técnicos que se describirán a continuación.

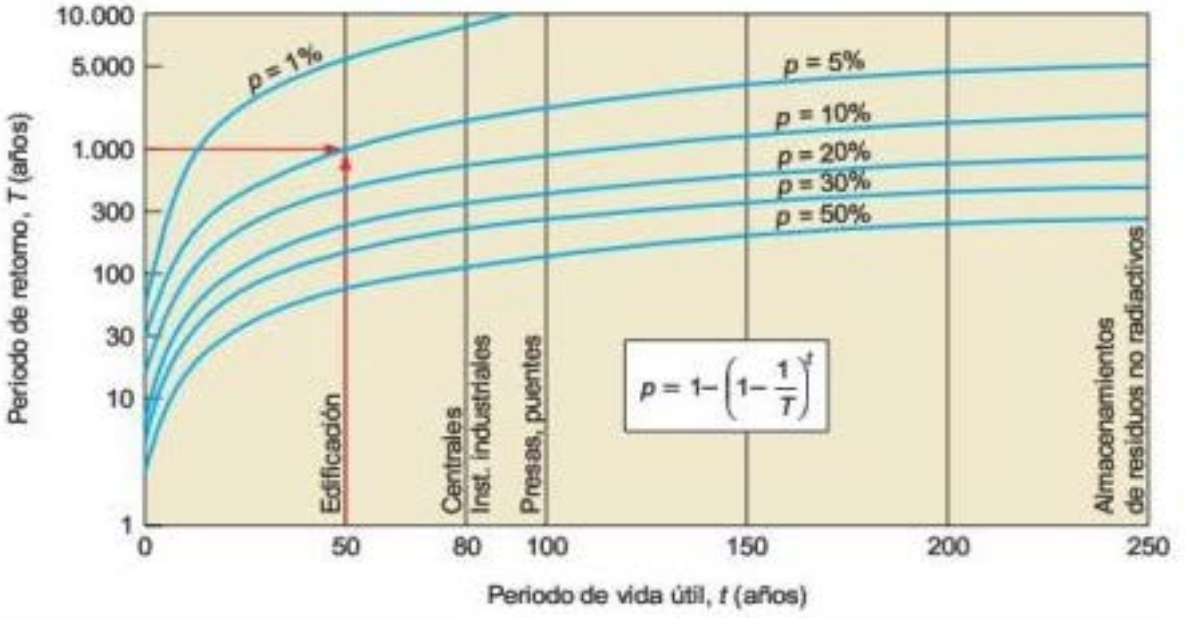


Figura 2. Probabilidad de excedencia (p) de un proceso de vida útil de una estructura para un periodo de retorno determinado.
Ejemplo: La probabilidad de que una estructura sufra un terremoto de una magnitud determinada teniendo en cuenta que su vida útil o periodo de exposición es 50 años y que el periodo de retorno del terremoto es 1000 años seria 5%. Tomado de *Ingeniera Geológica* (p. 610) por Gonzales de Vallejo et al. (2002). Madrid, España: Prentice Hall.

2.3.3.1. Recopilación de información

En términos generales se trata de la recolección de información que contribuya a la caracterización de peligros. Campos como la geología, hidrología, geofísica, entre otros. Información geográfica (imágenes satelitales, datos de campo, bases de datos), datos urbanísticos (datos catastrales), servicios esenciales (alcantarillado), considerándose también información de servicios sanitarios, puertos, aeropuertos y toda aquella información que esté relacionada con el funcionamiento cotidiano de una sociedad. Esta información puede ser consultada en bases de datos proporcionadas por gobiernos regionales, locales, instituciones técnico-científicas e información proveniente de bases de datos extranjeras.

Adicionalmente también es consultada información histórica de fenómenos de origen natural ocurridos en el ámbito geográfico de interés.

2.3.3.2. Identificación del área de influencia probable del peligro

Con el análisis de recurrencia de los fenómenos (información histórica), información geográfica (imágenes satelitales), consulta del inventario de peligros y de estudios previos de peligrosidad y riesgo es posible delimitar áreas de influencia probable de peligros a escala preliminar con el fin de realizar un análisis más detallado si es que así se requiera.

2.3.3.3. Parámetros de evaluación de peligros

En el área de influencia de un peligro, es necesario desarrollar y evaluar los parámetros que intervienen en la génesis del fenómeno desencadénate del peligro. CENEPRED (2014) sugiere parámetros generales a tomar en cuenta para la identificación y caracterización de peligros generados por fenómenos naturales (Ver Diagrama 4).

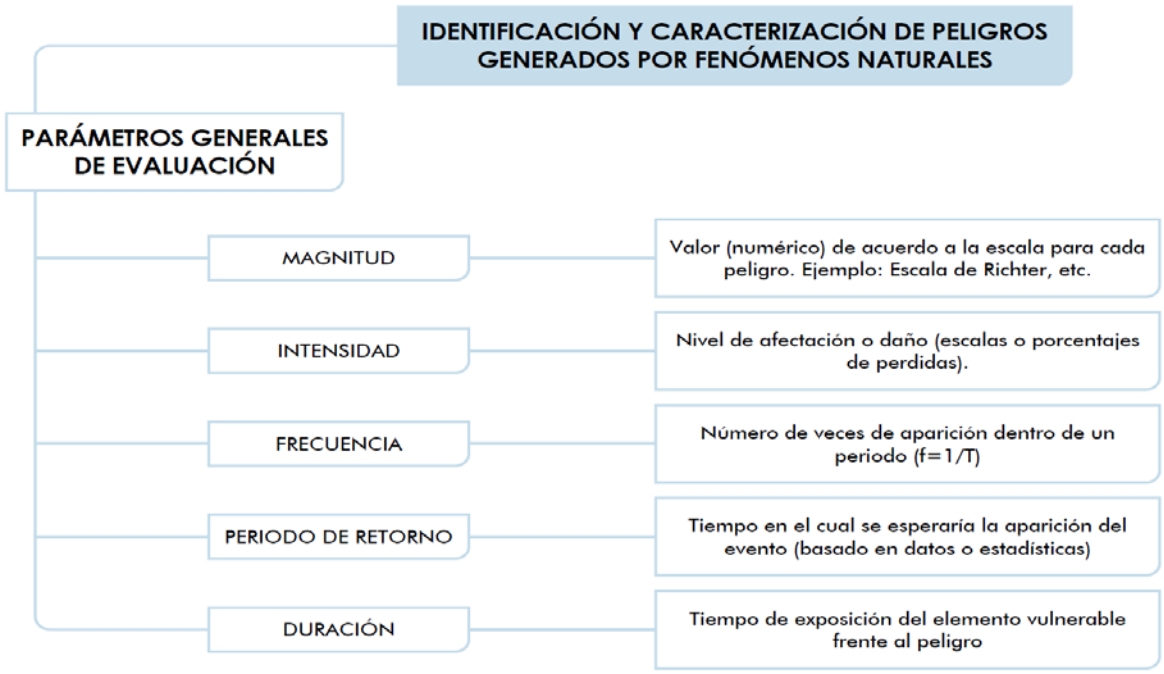


Diagrama 4. Parámetros generales de evaluación de peligro sísmico
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 33), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Téngase en cuenta que los parámetros que se muestran en el diagrama 4 difieren al momento de considerar tipos específicos de peligros, ya sean de geodinámica externa,

geodinámica interna o hidrometeorológicos, en estos casos se consideran parámetros específicos para cada tipo de peligro, a fin de caracterizar a detalle el peligro.

2.3.3.4. Susceptibilidad

La susceptibilidad se refiere a grado de predisposición de un fenómeno a ocurrir en un determinado ámbito geográfico, la susceptibilidad está ligada a los factores condicionantes y desencadenantes.

2.3.3.4.1. Factores desencadenantes

Se trata de procesos naturales o inducidos por el ser humano que pueden generar eventos que desencadenan peligros en un ámbito geográfico. En este caso no tomaremos en cuenta factores inducidos por el ser humano. En la Tabla 3 se describen algunos factores desencadenantes, téngase en cuenta que según las características del ámbito geográfico los factores condicionantes difieren en importancia.

Tabla 3

Factores Desencadenantes

Factores Desencadenantes	Descripción
Hidrometeorológicos	Lluvias, temperatura, viento, humedad del aire, brillo solar, entre otros.
Geológicos	Colisión de placas tectónicas, zonas de actividad volcánica, fallas geológicas, movimientos en masas, desprendimientos de grandes bloques, entre otros.

Nota. Adaptado de "Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión" (p. 107), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.3.4.2. Factores condicionantes

Son parámetros intrínsecos del ámbito geográfico de interés, estos parámetros cooperan de manera positiva o negativa en la ocurrencia en un fenómeno (intensidad, duración), así como su la expansión territorial del fenómeno. En la Tabla 4 se describen algunos factores

condicionantes, téngase en cuenta que según las características del ámbito geográfico los factores condicionantes difieren en importancia.

Tabla 4

Factores Condicionantes

Factor	Descripción
Geología	Estudia la forma exterior e interior terrestre, la naturaleza de las materias que lo componen y de su formación, de los cambios o alteraciones que estas han experimentado desde su origen.
Geomorfología	Estudia las formas superficiales de la tierra, describiéndola, ordenándolas sistemáticamente e investigando su origen y desarrollo.
Fisiografía	Descripción de los aspectos naturales del paisaje terrestre; relieve, modelado, vegetación, suelos.
Hidrología	Estudia la distribución espacial y temporal, y las propiedades del agua, incluyendo escorrentía, humedad del suelo, evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares.
Edafología	Estudia la naturaleza y condiciones de los suelos en su relación con los seres vivos.

Nota. Adaptado de "Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión" (p. 106), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.3.5. Matriz de peligrosidad

Cada nivel de peligrosidad se define en un rango, en el cual se ubican en valores numéricos las características de los parámetros estudiados. Estos niveles constituyen la matriz de peligrosidad, CENEPRED (2014) propone una matriz de peligrosidad con fines consultativos, en la presente investigación se toma como base dicha matriz (Ver Anexo 02).

2.3.3.6. Mapa de peligrosidad

El mapa de peligrosidad ubica espacialmente los niveles de peligrosidad del ámbito geográfico de interés, es el producto final del análisis de peligrosidad. El mapa de peligrosidad es generado a través del uso de sistemas de información geográfica (SIG), fundamentado en el proceso de análisis jerárquico (Ver Anexo 01). La base de datos utilizada es la información obtenida en el análisis de los parámetros de evaluación de peligros y los elementos de susceptibilidad. (Ver Fig. 3).

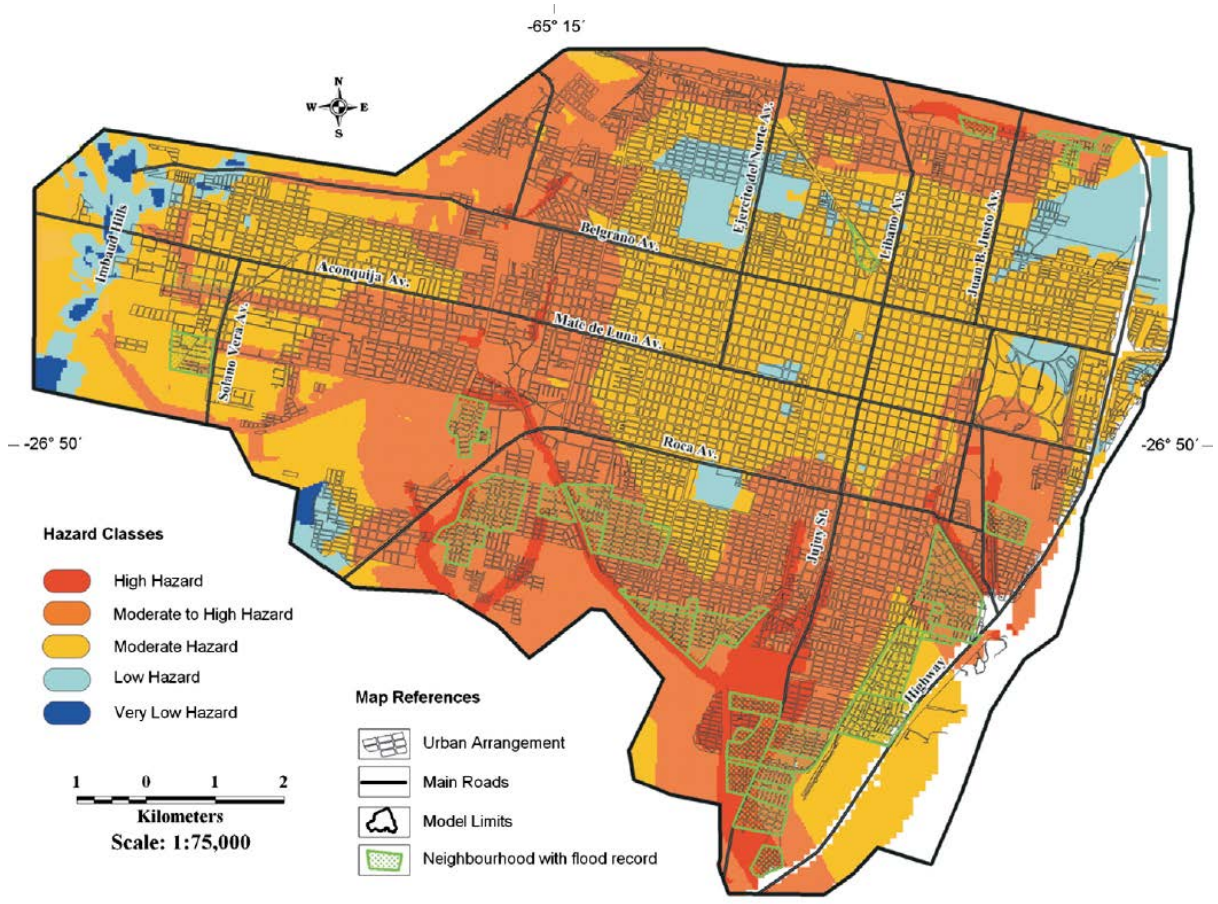


Figura 3. Mapa de peligrosidad por inundación de la provincia de Tucumán
Tomado de Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis, por D. Férnandez & M. Lutz, 2010, *Engineering Geology*,111, p. 95.

2.3.4. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de la población, la infraestructura o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro. Se refiere también a las pérdidas y daños potenciales de elementos como consecuencia de un fenómeno de intensidad determinada. La Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres UNISDR (2004) propone una definición y recalca las características de una sociedad vulnerable: “Son las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, socioeconómico y ambientales, los cuales incrementan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de peligros” (p. 19).

Con respecto al riesgo sísmico de estructuras, la vulnerabilidad de una estructura o grupo de estructuras de una zona urbana, se define como la tendencia propia de las estructuras a sufrir daño ante la ocurrencia de un fenómeno sísmico de una magnitud determinada. El crecimiento demográfico, la pobreza, la inadecuada gestión de riesgos de las instituciones gubernamentales, así como otros factores incrementan la vulnerabilidad de las poblaciones hacia los fenómenos de origen natural. Los factores que influyen en la vulnerabilidad de los elementos potencialmente expuestos a los fenómenos son:

2.3.4.1. Exposición

Se refiere a la ubicación de las localidades, la infraestructura y medios de vida de los seres humanos, cuando estos elementos se localizan en mayor medida dentro de zonas expuestas a fenómenos naturales. CENEPRED (2014) sugiere que entre causas probables de la exposición de los elementos se encuentra el crecimiento demográfico no planificado, el proceso migratorio desordenado, los usos inadecuados del territorio y políticas de desarrollo económico no sostenibles. En consecuencia, se entiende que mientras mayor sea la exposición de los elementos a los fenómenos naturales mayor es su vulnerabilidad.

2.3.4.2. Fragilidad

Se refiere a las condiciones de debilidad (generalmente física) de las sociedades y sus medios de vida frente a un fenómeno natural, factores como materiales nobles de construcción, instituciones sanitarias públicas desabastecidas, entre otros. En consecuencia, entre mayor sea la fragilidad de una sociedad mayor será su vulnerabilidad.

2.3.4.3. Resiliencia

La resiliencia se refiere a la capacidad de las sociedades y a sus medios de vida potencialmente expuestos a fenómenos naturales a adaptarse, recuperarse para mantener un nivel aceptable en su estructura de funcionamiento, se asocia con la cultura social, a la organización de las sociedades y a la disposición de las entidades públicas para enfrentar el fenómeno. En consecuencia, a mayor resiliencia, menor vulnerabilidad.

2.3.5. Análisis de vulnerabilidad

Se refiere al análisis de la capacidad de respuesta de las dimensiones de la sociedad (social, económica y ambiental) basándose en su exposición, fragilidad y resiliencia.

2.3.5.1. Vulnerabilidad de la dimensión social

Se determina los elementos sociales expuestos dentro del área de influencia del fenómeno y se determina su grado de vulnerabilidad mediante el análisis de la fragilidad y resiliencia social.

2.3.5.2. Vulnerabilidad de la dimensión económica

Se determina las actividades económicas e infraestructura expuesta en el área de influencia del fenómeno natural considerando su localización, capacidad de los servicios económicos y su capacidad de respuesta frente al peligro considerando su fragilidad y resiliencia económica.

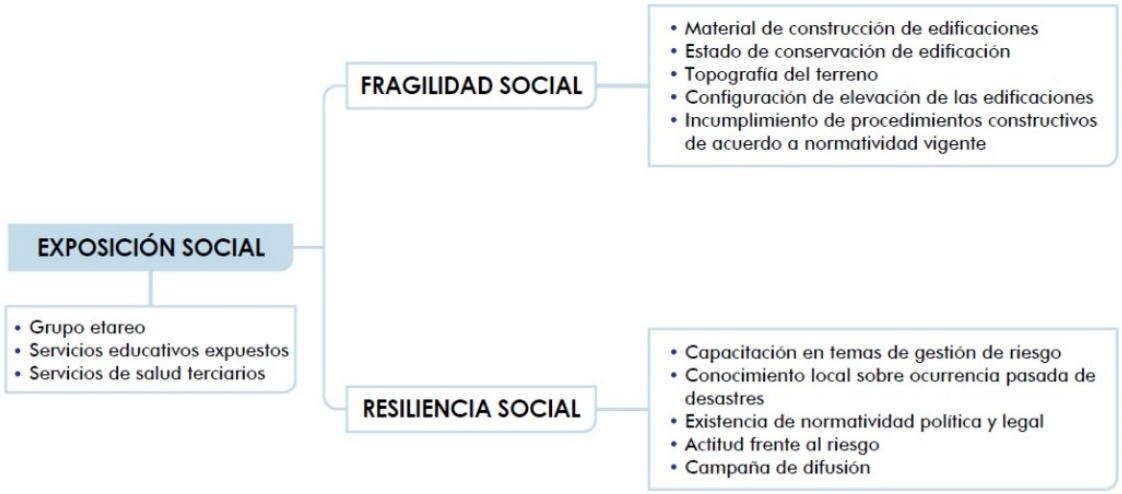


Diagrama 5. Exposición de la dimensión social
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 124), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

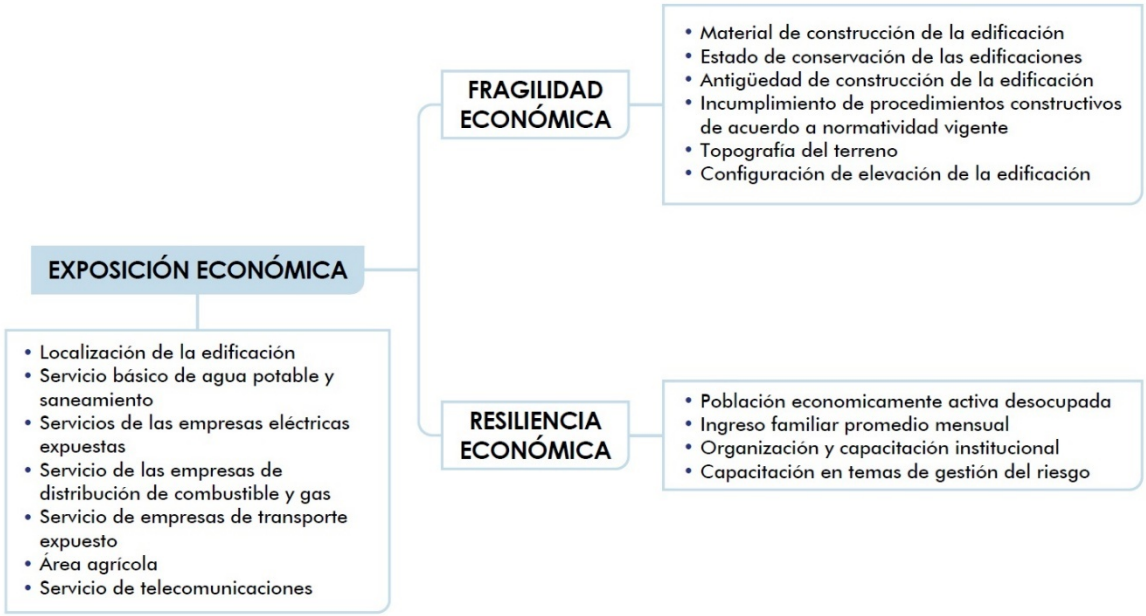


Diagrama 6. Exposición de la dimensión económica
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 129), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.5.3. Vulnerabilidad de la dimensión ambiental

Se determina los recursos naturales renovables, recursos no renovables, ecosistemas expuestos dentro del área de influencia del fenómeno natural estimando el grado de daño potencial y la capacidad de estos factores a absorber y sobrellevar el impacto generado, determinado así su fragilidad y resiliencia ambiental.

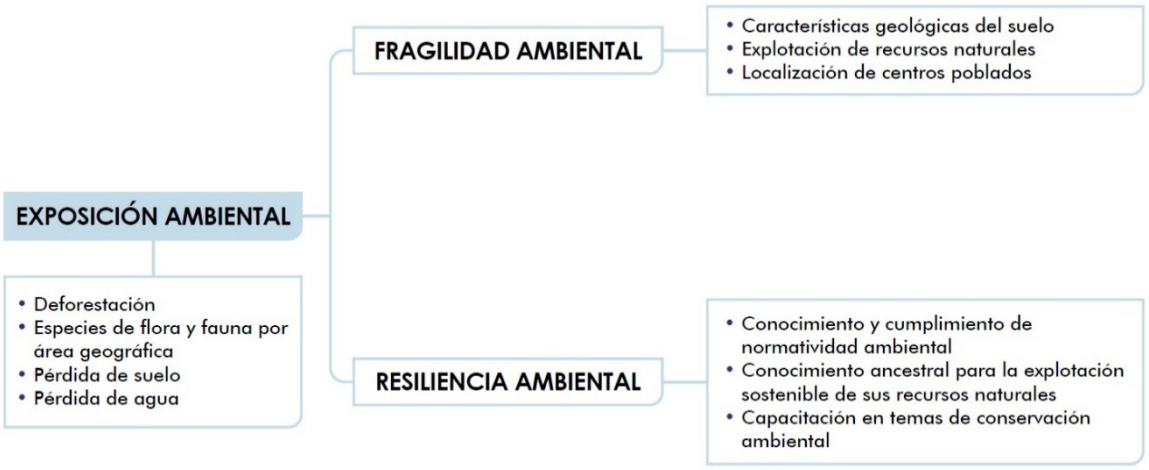


Diagrama 7. Exposición de la dimensión ambiental
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 135), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.5.4. Niveles de vulnerabilidad

En base a la caracterización de la vulnerabilidad de los elementos expuestos de las dimensión social, económica y ambiental en el ámbito geográfico de interés, se les asigna niveles de vulnerabilidad de acuerdo a un sistema que consiste de umbrales en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, con códigos de colores definidos (Ver Anexo 03).

2.3.5.5. Matriz de vulnerabilidad

Cada nivel de vulnerabilidad se define en un rango, en el cual se ubican en valores numéricos las características de los elementos de expuestos de las dimensión social, económica y ambiental. Estos niveles constituyen la matriz de vulnerabilidad, CENEPRED (2014)

propone una matriz de vulnerabilidad con fines consultativos, en la presente investigación se toma como base dicha matriz (Ver Anexo 03).

2.3.5.6. Mapa de vulnerabilidad

El mapa de vulnerabilidad ubica espacialmente los niveles de vulnerabilidad del ámbito geográfico de interés, es el producto final del análisis de vulnerabilidad. El mapa de vulnerabilidad es generado a través del uso de sistemas de información geográfica (SIG), fundamentado en el proceso de análisis jerárquico (Ver Anexo 01). La base de datos utilizada es la información obtenida en el análisis de los elementos expuestos de la dimensión social, económica y ambiental (Ver Fig. 4)

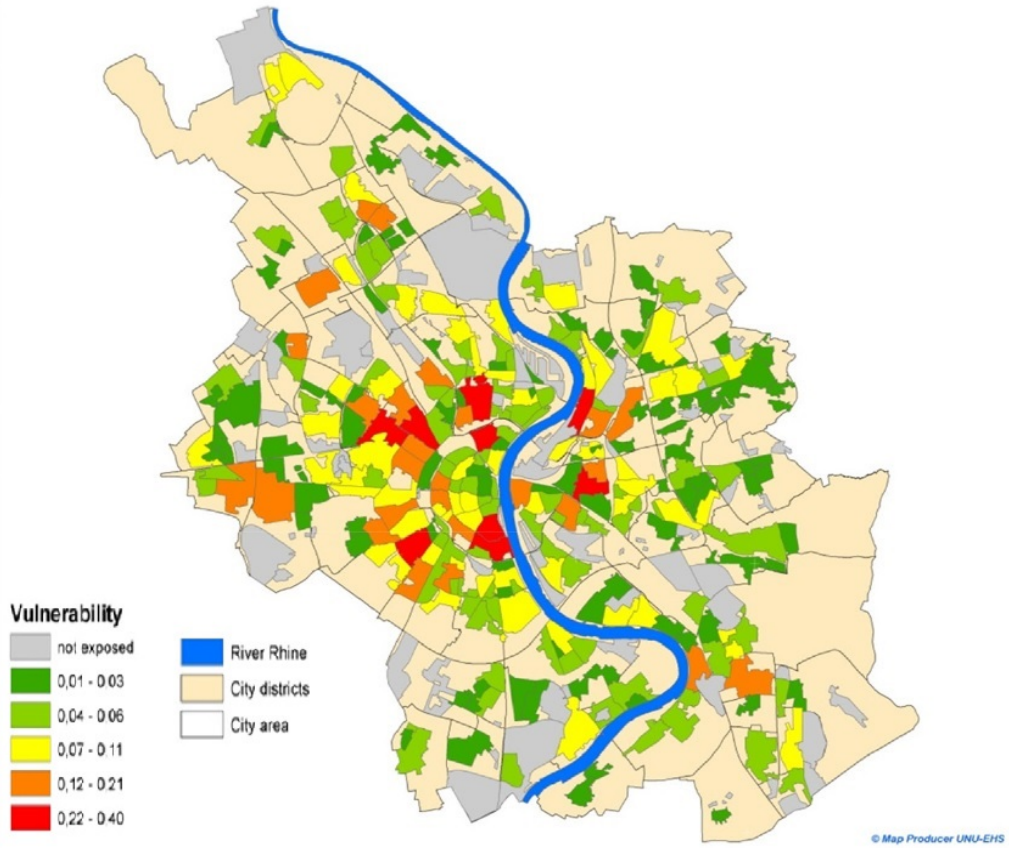


Figura 4. Mapa de Vulnerabilidad de Colonia relacionado a olas de calor
Tomado de *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards. A european perspective* (p. 107), por J. Birkmann, S. Kienberger y D. Alexander, 2014, United Kingdom: Elsevier

2.3.6. Estimación de riesgo

Según la ley N° 29664, la estimación del riesgo consiste en acciones y procedimientos que se realizan a fin de generar conocimiento sobre los peligros, realizar la evaluación de la vulnerabilidad y establecer niveles de riesgo que permitan tomar decisiones en la Gestión del Riesgo de Desastres (Congreso de la Republica, 2011).

Por ende, al conocer las características del peligro (intensidad, magnitud, frecuencia o periodo de recurrencia, etc.) y haber realizado el análisis de la vulnerabilidad (exposición, fragilidad y resiliencia) de las dimensiones (social, económica y ambiental) en el ámbito geográfico de interés se procede a relacionar todos estos factores a fin de conocer el nivel de riesgo. La metodología utilizada en esta investigación es la propuesta por el Sistema de Gestión de Desastres a través del CENEPRED.

Partiendo de la siguiente expresión matemática:

$$R_{ie} \mid_{t} = f\,(P_i, V_e) \mid_{t}$$

Donde:

R= Riesgo

f = En función

P_i = Peligro con la intensidad mayor o igual a Pi durante un período de exposición t

V_e = Vulnerabilidad de un elemento expuesto

Esta ecuación es una adaptación realizada por CENEPRED, aprobada por el estado peruano y posteriormente publicada en su manual, se desarrolló a partir de los estudios científicos realizados en el campo del análisis de peligros geológicos y vulnerabilidad, por diferentes autores a través de los años.

Esta ecuación integra la información obtenida en el análisis de peligrosidad y vulnerabilidad y con ella podremos obtener un nivel aproximado de riesgo en el ámbito geográfico de interés, el proceso de integración se realiza a partir del proceso de análisis jerárquico y el uso de herramientas de información geográfica.

2.3.6.1. Identificación de zonas de riesgo potencial significativo

El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2014), sugiere un procedimiento para la identificación de áreas de riesgo potencial significativo: se realiza la recolección de información de fuentes debidamente acreditables y confiables, se delimita las zonas que han sido afectadas a través de la historia por fenómenos naturales, para este propósito se analizan los resultados de estudios de análisis territorial, estudios técnico-científicos, obras físicas y se realiza encuentros municipales y encuestas a comunidades, entidades públicas y privadas.

A partir de los datos obtenidos se homogeniza la información y se identifica los riesgos significativos, cuya constatación se dará en un conjunto de visitas al campo, que nos permitirán profundizar las tareas de agregación y eliminación de riesgos, así como obtener información adicional in situ a fin de proceder a la calificación de riesgos. En coordinación con las entidades técnico – científicas competentes y los gobiernos locales o regionales, se realiza una identificación de las zonas consideradas de alto riesgo.

Finalmente identificamos las áreas de riesgo potencial significativo con ayuda de los mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y planes de gestión del riesgo, estableciendo una zonificación de umbrales de riesgo significativo, el cual definirá las zonas que presentan impactos con mayor importancia.

2.3.6.2. Niveles de riesgo

En base a la caracterización de la vulnerabilidad y de la peligrosidad en el ámbito geográfico de interés, se les asigna niveles de riesgo de acuerdo a un sistema que consiste de umbrales en cuatro niveles: bajo, medio, alto, muy alto, con códigos de colores definidos (Ver Figura 5).

	Vulnerabilidad Baja	Vulnerabilidad Media	Vulnerabilidad Alta	Vulnerabilidad Muy Alta
Peligro Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto	Riesgo Muy Alto
Peligro Alto	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto
Peligro Medio	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto
Peligro Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto

Figura 5. Matriz de niveles de riesgo
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.6.3. Matriz de riesgo

Cada nivel de riesgo es un rango, en el cual se ubican los valores numéricos o descriptivos de la peligrosidad y vulnerabilidad. Estos valores constituyen la matriz de riesgo, CENEPRED (2014) propone una matriz de riesgo con fines consultativos, en la presente investigación se toma como base dicha matriz (Ver Anexo 04).

2.3.6.4. Mapa de niveles de riesgos

El mapa de niveles de riesgo ubica espacialmente los niveles de riesgo del ámbito geográfico de interés, es el producto final del análisis de riesgos, los mapas de niveles de riesgo se obtienen de la integración de la información obtenida en el análisis de vulnerabilidad y peligrosidad (Ver Fig. 6). Son generados utilizando metodologías recomendadas por entidades técnico-científicas gubernamentales, en el caso peruano, CENEPRED recomienda el uso de una metodología basada en el proceso de análisis jerárquico (PAJ) y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.3.6.5. Zonificación territorial del riesgo

El análisis de vulnerabilidad y peligrosidad proporciona información fundamental para generar conclusiones en el ámbito de ordenamiento y planificación territorial, estos análisis representan la realidad de las zonas en potencial riesgo. Con estas herramientas es posible generar el mapa de riesgos, el cual nos dará la información necesaria para tomar decisiones en los Sistemas de Gestión de Riesgos.

El riesgo, la prevención y reducción del riesgo de desastre son las principales condiciones para garantizar el desarrollo territorial sostenible como base para un crecimiento económico y el mejoramiento de la calidad de la vida de la población, y constituyen aspectos fundamentales en los planes de zonificación y acondicionamiento territorial. Dicho enfoque permite prevenir y reducir los riesgos mediante la determinación de la intangibilidad de áreas de riesgo Muy Alto No Mitigable ante la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o inducido por la acción humana para el desarrollo de actividades sociales y económicas. (CENEPRED, 2014, p. 159)

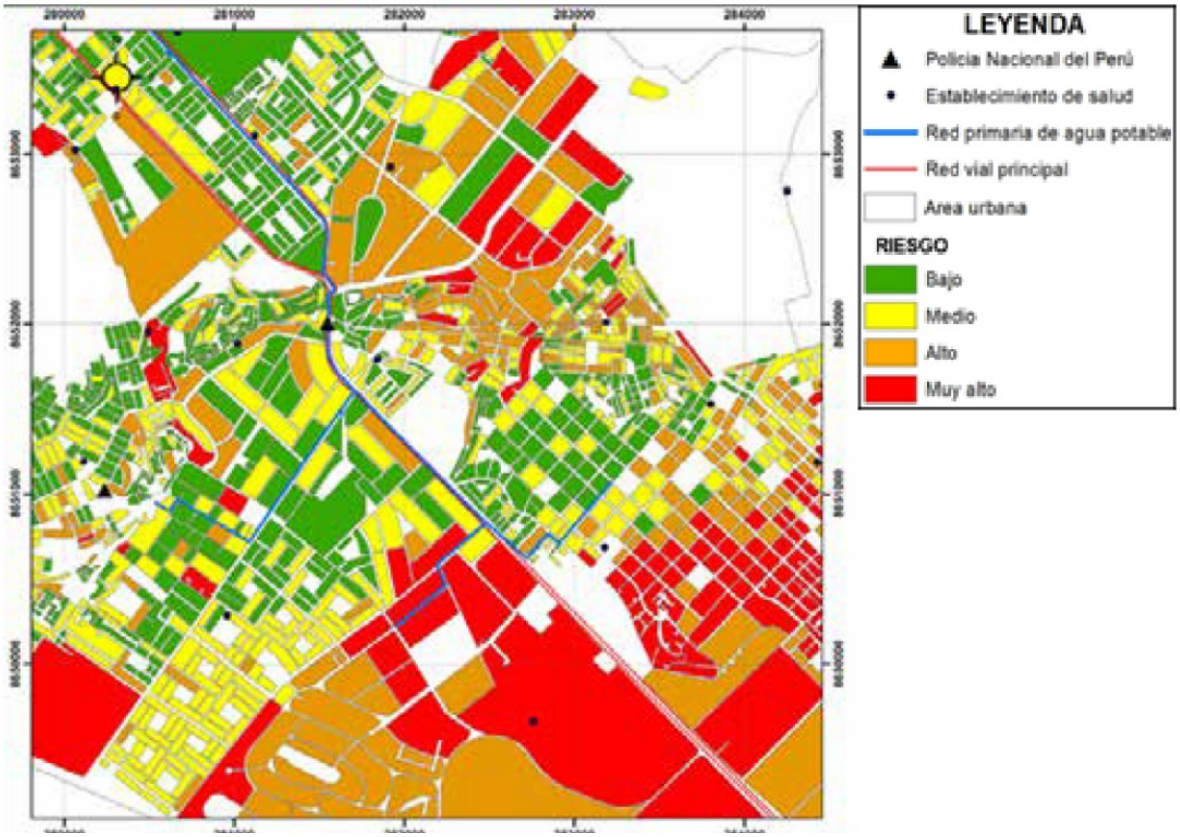


Figura 6. Mapa de riesgo a nivel de manzanas del distrito de chorrillos
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 159), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Con la delimitación de los niveles de riesgo a través del mapa de riesgo, es posible predecir las pérdidas y daños aproximados que pueden ocasionar los fenómenos en asentamientos humanos, por ende, tiene una importancia muy grande en el ordenamiento territorial haciendo posible el uso adecuado y sostenible del suelo y los recursos naturales garantizando la seguridad de las inversiones públicas y privadas además de cuidar la integridad física de las comunidades, CENEPRED (2014) propone una descripción de los niveles de riesgo, sus potenciales perdidas, daños y las implicancias en el ordenamiento territorial (Ver Fig. 7).

NIVEL	PÉRDIDAS Y DAÑOS PREVISIBLES EN CASO DE USO PARA ASENTAMIENTOS HUMANOS	IMPLICANCIAS PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL
RIESGO MUY ALTO NO MITIGABLE	Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de sus casas. Existen grandes probabilidades de destrucción repentina de edificios y/o casas. Los eventos se manifiestan con una intensidad relativamente débil, pero con una frecuencia elevada o con intensidad fuerte. En este caso, las personas están en peligro afuera de los edificios.	Zona de prohibición, no apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Áreas ya edificadas deben ser reasentadas
RIESGO MUY ALTO	Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de sus casas. Existen grandes probabilidades de destrucción repentina de edificios y/o casas. Los eventos se manifiestan con una intensidad relativamente débil, pero con una frecuencia elevada o con intensidad fuerte. En este caso, las personas están en peligro afuera de los edificios.	Zona de prohibición, no apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Áreas ya edificadas pueden ser protegidas con importantes obras de protección, sistemas de alerta temprana y evacuación temporal. Medidas estructurales que reduzcan el riesgo.
RIESGO ALTO	Las personas están en peligro afuera de los edificios, pero no o casi no adentro. Se debe contar con daños en los edificios, pero no destrucción repentina de éstos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar.	Zona de reglamentación, en la cual se puede permitir de manera restringida, la expansión y densificación de asentamientos humanos, siempre y cuando existan y se respeten reglas de ocupación del suelo y normas de construcción apropiadas. Construcciones existentes que no cumplan con las reglas y normas deben ser reforzadas, protegidas o desalojadas y reubicadas.
RIESGO MEDIO	El peligro para las personas es regular. Los edificios pueden sufrir daños moderados o leves, pero puede haber fuertes daños al interior de los mismos.	Zona de sensibilización, apta para asentamientos humanos, en la cual la población debe ser sensibilizada ante la ocurrencia de este tipo de peligro, a nivel moderado y poco probable, para el conocimiento y aplicación de reglas de comportamiento apropiadas ante el peligro.
RIESGO BAJO	El peligro para las personas y sus intereses económicos son de baja magnitud, con probabilidades de ocurrencia mínimas.	Zona de sensibilización, apta para asentamientos humanos, en la cual los usuarios del suelo deben ser sensibilizados ante la existencia de peligros muy poco probables, para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento apropiadas ante la ocurrencia de dichos peligros.

Figura 7. Niveles de riesgo para la zonificación territorial del riesgo
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 159), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.7. Impactos Negativos y Cuantificación de Perdidas

La cuantificación de daños y pérdidas debido al impacto de un fenómeno natural es una parte fundamental en la Gestión de Riesgo de Desastres, debido a que solo es posible tomar decisiones acertadas, si es que se conoce el verdadero impacto del fenómeno en las dimensiones (económica, social y ambiental). La valoración debe incluir las consecuencias a corto y largo plazo, tomando en cuenta también efectos indirectos y efectos secundarios. La siguiente formulación básica sirve de fundamento para el cálculo de pérdidas.

Perdida = daño estimado x costo

Con esta formulación es posible estimar un costo económico, sin embargo, es necesario tener una base de datos que otorgue información del costo estimado de los elementos expuestos. Para la realización de la cuantificación daños y perdidas es necesario reconocer los elementos expuestos (dimensiones) que serán afectadas debido a la ocurrencia de un fenómeno de origen natural.

2.3.7.1. Impacto probable a la dimensión social

El impacto probable de un desastre afecta potencialmente a la dimensión social en sus diferentes sectores:

a. Integridad Física: Fallecidos, heridos o enfermos.
b. Servicios Básicos: Agua potable, red de alcantarillado, electricidad, gas.
c. Sistema de Telecomunicaciones**:** Telefónica fija, telefonía móvil, radio, televisión, otros.
d. Infraestructura: Carreteras de todo tipo, puentes, aeropuertos, terrapuertos, puertos, canales de riego, diques, bocatomas, reservorios, otros.

2.3.7.2. Impacto Probable a la dimensión económica

El impacto probable de un desastre afecta potencialmente la dimensión económica en sus actividades primarias y actividades extractivas como la agricultura, ganadería, pesca, minería, forestal entre otros. Adicionalmente se toman en cuenta los efectos negativos indirectos como perdidas de producción en el sector industrial, o la falta de salarios que se dejaron de percibir al detener una actividad económica, entre otros efectos negativos a causa de la ocurrencia del fenómeno natural.

2.3.7.3. Impacto Probable a la dimensión ambiental

El impacto probable de un desastre a la dimensión ambiental puede resultar en la erosión del suelo, deforestación, erosión de los litorales, daño a zonas intangibles, contaminación de cuerpos de agua, entre otros.

2.3.8. Control de riesgos

Actualmente no existe entidad pública o privada que establezca un valor de riesgo aceptable, tolerable o inadmisible. Debido a la gran cantidad de factores que influyen en el estudio de riesgos y que en cada caso resultan diferentes y cambiantes a través del tiempo.

Douglas (1986) propone que a pesar de los esfuerzos de especialistas de diferentes disciplinas para estimar o valorar el riesgo, cualquiera que sea el enfoque de concepción del riesgo que se tenga, es necesario tener un referente para efectos de estimar cuándo unas consecuencias sociales, económicas o ambientales pueden considerarse graves, importantes o insignificantes y si son o no aceptables por quien tiene la posibilidad de sufrirlas o afrontarlas.

En base a esta afirmación se entiende que la población y las autoridades tienen la decisión de tomar acciones para el control de riesgos al asignar recursos disponibles, a fin de proteger a sus recursos, infraestructuras y el ambiente ante potenciales fenómenos naturales, lo que significa realizar una evaluación de costo/beneficio en la realización de programas o proyectos de prevención y reducción del impacto de desastres. Con el propósito de valorar las

pérdidas potenciales, ya que los eventos de gran magnitud no ocurren con frecuencia; se recurre a métodos probabilísticos para estimar el promedio de pérdidas potenciales y se determina un límite en el cual se categoriza el riesgo en diferentes niveles de priorización

> Una metodología ampliamente utilizada para la determinación indirecta del nivel de riesgo es el análisis de costo ‑ beneficio o costo ‑ efectividad, en el cual se relaciona el daño con el peligro para la vida, en áreas altamente expuestas donde ocurren con frecuencia eventos de dimensiones moderadas, cualquier aumento en los costos de mitigación se verá compensado
>
> por la reducción en los costos causados por daños. (CENEPRED, 2014, p. 166).

En esta sección se describirá las potenciales consecuencias de los desastres, su tolerancia, el análisis costo/beneficio y las medidas de control.

2.3.8.1. Aceptabilidad o tolerancia del riesgo

Para todo fenómeno natural existirá una consecuencia, por tal motivo no existe riesgo que pueda eliminarse en su totalidad, por este motivo, considerar a cada riesgo dentro de niveles de priorización basados en sus consecuencias potenciales y frecuencia de ocurrencia es un enfoque basado en la realidad.

CONSECUENCIAS	NIVEL	ZONA DE CONSECUENCIAS Y DAÑOS			
Muy alta	4	Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Alta	3	Media	Alta	Alta	Muy Alta
Media	2	Media	Media	Alta	Alta
Bajo	1	Bajo	Media	Media	Alta
	Nivel	1	2	3	4
	Frecuencia	Bajo	Media	Alta	Muy alta

Figura 8. Matriz de consecuencias y daños
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

VALOR	NIVELES	DESCRIPCION
4	Muy Alta	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno natural son catastróficas
3	Alta	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno natural pueden ser gestionadas con apoyo externo
2	Media	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno natural son gestionadas con los recursos disponibles
1	Bajo	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno natural pueden ser gestionadas sin dificultad

Figura 9. Niveles de consecuencias
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 167), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

VALOR	PROBABILIDAD	DESCRIPCION
4	Muy Alta	Puede ocurrir en la mayoría de las circunstancias
3	Alta	Puede ocurrir en periodos de tiempo medianamente largos según las circunstancias
2	Media	Puede ocurrir en periodos de tiempo largos según las circunstancias
1	Bajo	Puede ocurrir en circunstancias excepcionales

Figura 10. Niveles de frecuencia de ocurrencia
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 167), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Las consecuencias probables de un fenómeno natural en un ámbito geográfico pueden variar desde imperceptibles hasta catastróficas y su nivel de frecuencia puede variar de muy probable hasta improbable o de probabilidad nula, parte de la gestión de riesgos es ubicar al riesgo en un nivel de frecuencia y de consecuencia, estos niveles pueden expresarse de manera cualitativa o cuantitativa. Al relacionar la frecuencia con las consecuencias, obtenemos la matriz de aceptabilidad o tolerancia del riesgo (Ver Fig. 11), utilizando esta matriz podemos calificar al riesgo en cuatro niveles de tolerabilidad: aceptable, tolerable, inaceptable, inadmisible.

CONSECUENCIAS	MATRIZ DE TOLERANCIA			
Muy alta	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inadmisible	Riesgo Inadmisible
Alta	Riesgo Tolerable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inadmisible
Media	Riesgo Tolerable	Riesgo Tolerable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable
Bajo	Riesgo Aceptable	Riesgo Tolerable	Riesgo Tolerable	Riesgo Inaceptable
TOLERANCIA	Aceptable	Tolerable	Inaceptable	Inadmisible

Figura 11. Matriz de aceptabilidad y/o tolerancia del riesgo
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

VALOR	DESCRIPTOR	DESCRIPCION
4	Inadmisible	Se debe aplicar inmediatamente medidas de control físico y de ser posible transferir inmediatamente recursos económicos para reducir los riesgos.
3	Inaceptable	Se deben desarrollar actividades inmediatas y prioritarias para el manejo de riesgos.
2	Tolerable	Se deben desarrollar actividades para el manejo de riesgos.
1	Aceptable	El riesgo no presenta un peligro significativo

Figura 12. Aceptabilidad o tolerancia del riesgo
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

En base a la evaluación de consecuencia y daño y habiendo localizado la posición de un riesgo en la matriz de tolerabilidad, el próximo paso es ubicarlo en un "nivel de priorización" (Ver Figura 13), el cual indicara que prioridad tiene los riesgos en el ámbito geográfico de estudio, en base a esta calificación, el Sistema de Gestión de Riesgos tomara las acciones correspondientes a fin de prevenir, mitigar o reducir el riesgo con el desarrollo de proyectos de gestión de riesgos.

VALOR	DESCRIPTOR	NIVEL DE PRIORIZACION
4	Inadmisible	I
3	Inaceptable	II
2	Tolerable	III
1	Aceptable	IV

Figura 13. Niveles de priorización
Tomado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

2.3.8.2. Análisis de costo, beneficio y efectividad de proyectos de gestión de riesgos

Para la elaboración de proyectos de gestión de riesgos es necesario la evaluación social de proyectos, práctica que consiste en comparar los beneficios y los costos, a fin de conocer qué nivel importancia y prioridad tienen los proyectos para las sociedades.

La identificación del riesgo permite el análisis de los beneficios, la actualización y mejoramiento de las intervenciones técnicas y logísticas (monitoreo, comunicación, sistemas de alerta temprana y preparación), los proyectos de gestión de riesgo implican inversiones monetarias para la construcción o mejoramiento de infraestructuras, elaboración de planes del uso del suelo, creación de servicios ambientales, relocalización de poblaciones, entre otros, el análisis se realiza utilizando una metodología de comparación de costo/beneficio y costo/efectividad.

2.3.8.2.1. Costo-beneficio

Esta metodología se basa en estimar la rentabilidad social del proyecto en un determinado momento en base a la comparación de los beneficios sociales (VABS) potenciales (prevención de desastres) del proyecto y los costos sociales (VACS) potenciales (costo monetario, reubicación de poblaciones). Esta comparación se estima monetariamente y el resultado es el valor actual neto social (VANS). Paralelamente si existen proyectos de gestión de riesgos alternativos, se escogerá el que tenga el VANS más alto.

2.3.8.2.2. Costo-efectividad

Esta metodología expresa los beneficios sociales en unidades no monetarias, se aplica cuando no es posible utilizar la metodología costo-beneficio, se aplica en proyectos de saneamiento, educación, recursos naturales, etc.

Consiste en identificar los beneficios de un proyecto en unidades no monetarias, para luego calcular el costo promedio por unidad de beneficio (ratio costo-efectividad). Este tipo de

estimación solo puede realizarse en proyectos con metas similares y sirve como comparativo para la elección del proyecto más eficiente económicamente.

2.3.8.3. Medidas de control

> Consiste en identificar las medidas de control de los eventos de riesgo operativo para mitigarlo, su valoración y la implementación del plan de prevención y/o reducción para llevarlas a cabo. Dichas medidas se refieren a las oportunidades que tiene la entidad para disminuir el nivel de riesgo, de acuerdo con las prioridades establecidas en la etapa de cálculo de riesgos (CENEPRED, 2014, p. 172).

Los planes de prevención o reducción de riesgos incluyen los siguientes aspectos: identificación de los procesos, definición del riesgo, acciones propuestas, recursos requeridos, responsabilidades, cronograma e indicadores de logro. La reducción de los riesgos, debe estar basado en el entendimiento de sus causas, el análisis de sus interrelaciones para la formulación objetiva de los planes de tratamiento. Es entonces importante, identificar si las causas tienen origen interno o externo, porque de ello depende el grado de control que pueda ejercerse sobre ellas y por consiguiente la efectividad del tratamiento.

Las autoridades locales y regionales son las encargadas de la determinación y desarrollo de los planes de gestión de riesgos que se resume básicamente en la prevención del riesgo que implica la disminución de la probabilidad de ocurrencia y la disminución de la magnitud del impacto si llega a ocurrir. Para esto el estado posee una cantidad múltiple de instrumentos de gestión que se agrupan en cuatro categorías:

2.3.8.3.1. Protección

Incluye la implementación de redes de advertencia y respuesta inmediata a desastres, a partir de intervenciones técnico-científicas a través de: monitoreo, estudios geográficos, sistemas de comunicación, sistemas de alerta y preparación.

2.3.8.3.2. Reducción del riesgo

Se trata de inversiones que mejoran o refuerzas activos económicos o al ambiente, concientización y capacitación social, traen como consecuencia la reducción del riesgo de desastres, pueden ser: reforzamiento o construcción de infraestructuras de todo tipo, aumento de las inversiones en proyectos económicos y sociales, externalidad positiva, servicios ambientales, planeación de uso de suelos, reorientación productiva, campañas sociales de capacitación acerca del riesgo de desastres.

2.3.8.3.3. Transferencia del riesgo

Se trata de mecanismos financieros que tienen como fin transferir el riesgo de una a otra parte, incluyen: Seguros de todo tipo (destaca el seguro catastrófico), bonos catastróficos.

2.3.8.3.4. Compartimiento de perdidas

Se trata de un acuerdo solidario entre participantes respecto de la distribución de las pérdidas incurridas en caso de que uno o más de los participantes no pueden cumplir su obligación. Instrumentos como los fondos contingentes y la subsidiariedad administrativa del gobierno central son utilizados al momento de afrontar un desastre.

2.3.9. Gestión de Riesgos de Desastres

El incremento en la recurrencia e intensidad de los desastres asociados a peligros provocados por fenómenos de origen natural, convierten a gran parte del territorio nacional susceptible al impacto de desastres. Esta situación impuso la necesidad de la implementación de políticas públicas para la gestión de los riesgos de desastres, para cumplir esta necesidad el Estado Peruano impulso la formulación y adopción de políticas públicas para la Gestión del Riesgo de Desastres, la ley N° 29664, la cual implementa diversos instrumentos de gestión, para la integración de los procesos de estimación, prevención, reducción, preparación respuesta, rehabilitación y reconstrucción en cuanto a desastres.

También establece objetivos, acciones, procesos y protocolos a fin de hacer cumplir lo establecido en la ley N° 29664. En la presente sección se describirá de forma general los instrumentos y políticas.

2.3.9.1. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)

El Gobierno Nacional, en el marco del Proceso de Modernización, Descentralización y Reforma del Estado, creo el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SINAGERD, a través de la Ley Nº 29664 promulgada el 11 de febrero de 2011 y su Reglamento aprobado mediante el Decreto Supremo Nº 048-2011-PCM de fecha 26 de mayo de 2011.

El artículo 1° de la ley N° 29996 aprobada por el Congreso de la Republica (2011) define el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), como un sistema funcional, interinstitucional, sinérgico, descentralizado, transversal y participativo, con la finalidad de identificar y reducir los riesgos asociados a peligros o minimizar sus efectos, así como evitar la generación de nuevos riesgos, y preparación y atención ante situaciones de desastre mediante el establecimiento de principios, lineamientos de política, componentes, procesos e instrumentos de la Gestión del Riesgo de Desastres. La figura 14 sintetiza la estructura general del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.

TITULO I	TITULO II	TITULO III	TITULO IV	TITULO V
DISPOSICIONES GENERALES	**POLITICA NACIONAL DEL GRD**	**ORGANIZACIÓN DEL SINAGERD**	**INSTRUMENTOS DEL SINAGERD**	**INFRACCIONES Y SANCIONES**
Creación del SINAGERD **Ámbito de aplicación de Ley** **Definición GRD** **Principios GRD**	**Definición y lineamientos** **Componentes** Gestión prospectiva , correctiva y reactiva. **Procesos** Estimación del riesgo, prevención y reducción del riesgo, preparación, respuesta, rehabilitación, reconstrucción. **Integración política nacional e internacional**	**Objetivos del SINAGERD** **Composición del SINAGERD** • Presidencia Consejo de Ministros (Rector) • CONAGRED • CENEPRED • INDECI • Gobiernos regionales y locales • CEPLAN • Entidades públicas, FFAA, PNP, entidades privadas y sociedad civil	• Plan Nacional de GRD • La Estrategia de Gestión Financiera del Riesgo de Desastres • Los mecanismos de coordinación, decisión, comunicación, y gestión de la información en situaciones de impacto de desastres. • El Sistema Nacional de Información para la GRD • Radio Nacional de Defensa Civil y del Medio Ambiente.	Infracciones Sanciones

Figura 14. Estructura General del Sistema de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) Adaptado de *Ley N° 29664: Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)* por Congreso de la Republica, 2011, Lima, Perú: Diario Oficial El Peruano

2.3.9.2. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

Mediante, Decreto Supremo N° 111-2012-PCM, la Presidencia del Consejo de Ministros (2012) aprueba la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, esta política, contiene principios, objetivos prioritarios, lineamientos estratégicos, que orientan la actuación de todos los actores involucrados de manera articulada y participativa en la GRD, con la finalidad de proteger la integridad de la vida de las personas, sus medios de vida y propender hacia el desarrollo sostenible del país, se define en el Art. 5° de la ley N° 29664: como:

> El conjunto de orientaciones dirigidas a impedir o reducir los riesgos de desastres, evitar la generación de nuevos riesgos y efectuar una adecuada preparación, atención, rehabilitación y reconstrucción ante situaciones de desastres, así como a minimizar sus efectos adversos sobre la población, la economía y el ambiente. (Presidencia del Consejo de Ministros, 2011)

Para la implementación y desarrollo de la Gestión del Riesgo de Desastres se requiere de objetivos prioritarios, que permitan la articulación e integración de sus componentes y procesos, SINAGERD tiene los siguientes objetivos:

a. Institucionalizar y desarrollar los procesos de la Gestión del Riesgo de Desastres a través del Sistema de Gestión del Riesgo de Desastres.
b. Fortalecer el desarrollo de capacidades en todas las instancias del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, para la toma de decisiones en los tres niveles de gobierno.
c. Incorporar e implementar la Gestión del Riesgo de Desastres a través de la planificación del desarrollo y la priorización del recurso físico y financiero.
d. Fortalecer la cultura de prevención y el aumento de la resiliencia para el desarrollo sostenible.

2.3.9.3. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

El Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (PLANAGERD 2014 – 2021), se formula en el marco de las Políticas de Estado N° 32 de la Gestión del Riesgo de Desastres y N° 34 de Ordenamiento y Gestión Territorial, de la Ley Nº 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SINAGERD, de su Reglamento aprobado por Decreto Supremo Nº 048-2011-PCM, así como de la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres aprobada como una política nacional de obligatorio cumplimiento para las entidades del Gobierno Nacional mediante el Decreto Supremo N° 111-2012-PCM.

El PLANAGERD se orienta finalmente a lograr una sociedad segura y resiliente ante el riesgo de desastres. Bajo el marco, el presente plan establece el siguiente objetivo nacional: "Reducir la vulnerabilidad de la población y sus medios de vida, ante el riesgo de desastres". Al cual le procede una matriz de objetivos que consisten en seis objetivos estratégicos:

a. Desarrollar el conocimiento del riesgo
b. Evitar y reducir las condiciones de riesgo de los medios de vida de la población con un enfoque territorial
c. Desarrollar capacidad de respuesta ante emergencias y desastres
d. Fortalecer la capacidad para la recuperación física, económica y social
e. Fortalecer las capacidades institucionales para el desarrollo de la gestión del riesgo de desastres
f. Fortalecer la participación de la población y sociedad organizada para el desarrollo de una cultura de prevención

De estos objetivos estratégicos se desprenden, catorce objetivos específicos y cuarenta y siete acciones estratégicas cuyos contenidos están asociados ineludiblemente a los componentes y procesos de la gestión del riesgo de desastres desde una perspectiva nacional con un enforque descentralizado y multisectorial.

El PLANAGERD 2014 - 2021 es de cumplimiento obligatorio para las entidades públicas conformantes del SINAGERD, por lo que deben elaborar y ejecutar los planes específicos de Gestión del Riesgo de Desastres y otros planes e instrumentos de gestión que son de su competencia, así como realizar el respectivo monitoreo, seguimiento y evaluación. Los aspectos estratégicos que permiten la implementación del PLANAGERD 2014 - 2021 son la organización y gestión estratégica, la programación de actividades, y los medios de financiamiento, que dan soporte transversal y sistémico a los objetivos del PLANAGERD para facilitar su ejecución eficiente, eficaz y sostenible en los tres niveles de gobierno.

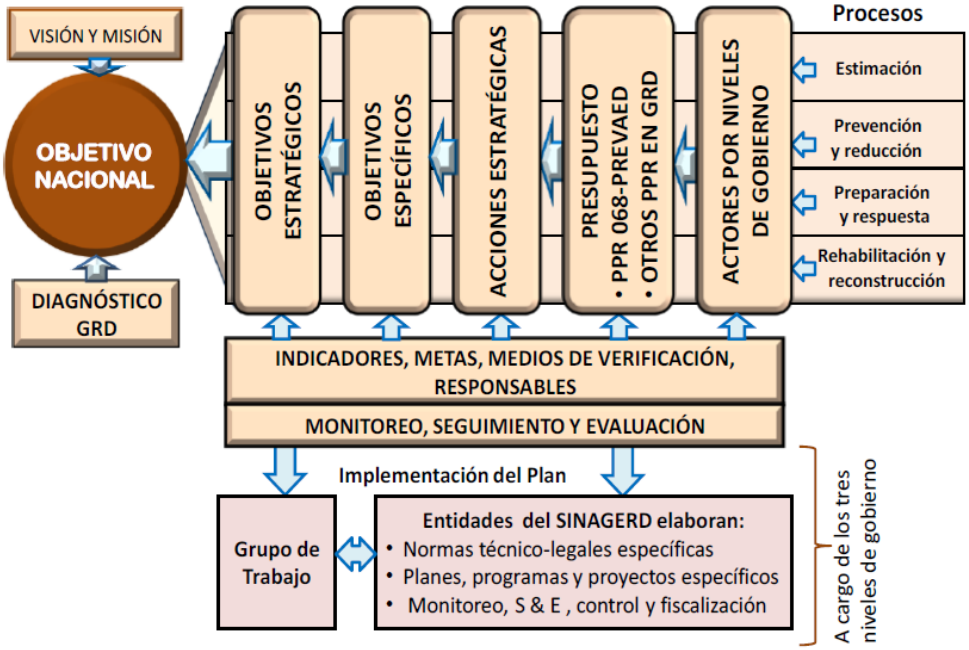


Diagrama 8. Esquema General del PLANAGERD 2014-2021
Tomado de *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres PLANAGERD 2014-2021* (p. 40), por Presidencia del Consejo de Ministros - Secretaria de Gestión del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2018/01/PLANAGERD.pdf

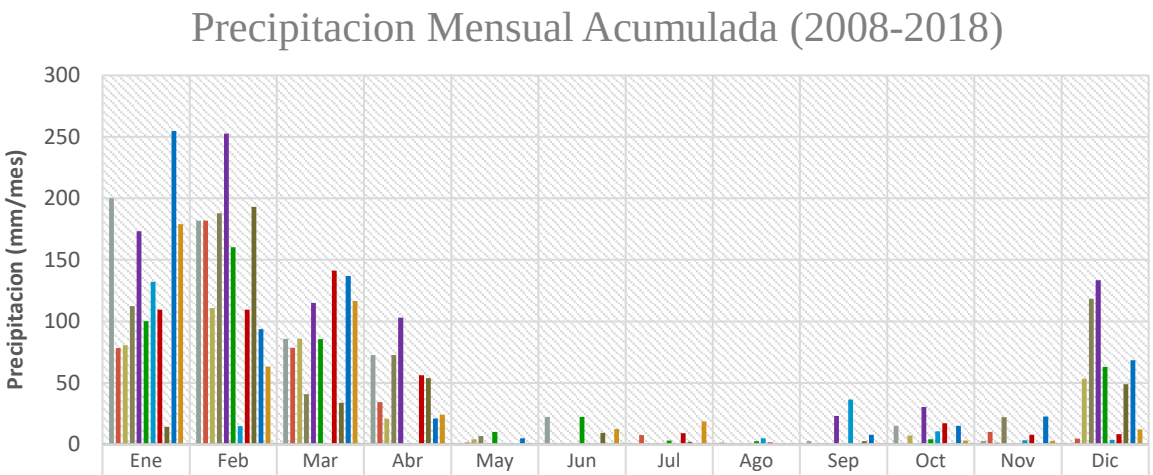
2.4. Marco Climatológico

El distrito de Cabanaconde presenta un clima frio, frígido lluvioso con deficiencia de precipitaciones en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda relativa calificada como semiseca de acuerdo con la clasificación climática de Werren Thornthwaite, también presenta zona de nevados en sus mayores altitudes (SENAMHI, 2002). Las precipitaciones ocurren en verano y son de origen orográfico, esto es, precipitaciones que resultan de la condensación del vapor de agua proveniente de las masas de aire que se elevan al chocar con las montañas, descargan gran parte de su humedad en la vertiente oriental y en los valles interandinos. Los factores que intervienen en la formación de este clima es la Cordillera de los Andes y el Anticiclón del Pacifico Sur.

2.4.1. Precipitaciones

La precipitación es la caída de agua solida liquida debido a la condensación del vapor sobre la superficie terrestre y se dan en forma de lluvias, llovizna, nieve y granizo. En esta investigación se tomó en cuenta la base de datos histórica provista por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) recopilados en la estación meteorológica de Madrigal entre los años 2008 y 2018.

Los meses de enero, febrero y marzo presentan la mayor cantidad acumulada de precipitaciones mensuales frente a una cantidad minina en los meses de junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. Los meses de diciembre y abril presentan precipitaciones mensuales moderadas con respecto al resto del año.



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2008	200	182	85.8	72.64	0	22.4	0	1.4	2.5	15.1	2.8	0
2009	78.3	182	78.5	34.4	1.6	0	7.6	0	0	0	10.2	4.6
2010	80.7	110.7	85.8	20.7	4	0	0	0	0	7.3	1.5	53.3
2011	112.3	187.9	40.8	72.64	6.6	0	0	0	0	0	22.1	118.44
2012	173.3	252.6	115.1	102.9	0	0	0	0	23.02	30.3	0	133.5
2013	100.2	160.3	85.7	0	10.2	22.4	3	2.6	0	4.2	0	62.9
2014	132.1	14.7	0	0	0	0	0	5	36.5	10.5	3.4	3.5
2015	109.6	109.5	141.3	56.1	0	0	9.1	1.4	0	17.1	7.7	8.2
2016	14.2	193.1	33.7	53.7	0	9.3	2	0	2.5	0	0	49
2017	254.7	93.7	136.8	21	5	0	0	0	7.8	15.1	22.6	68.3
2018	179	63.3	116.5	24.1	0	12.5	18.8	0	0	3	2.8	12.1

Diagrama 9. Precipitación Mensual Acumulada (2008-2018) – Estación Madrigal
Adaptado de “Datos hidrometeorológicos” por SENAMHI (2018). Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

Los datos registrados en la estación Madrigal en cuanto a la precipitación anual acumulada los valores que se registraron se encuentran entre los 205.7 mm - 830.72 mm por año. El año 2012 se registró un valor anómalo de 830.72 mm de precipitación acumulada anual, año en el cual la región Arequipa registro la mayor cantidad de precipitación después de 40 años, situación que tuvo como consecuencia un gran daño en la infraestructura vial, la infraestructura urbana privada y pública además de los sistemas de alcantarillado de la región.

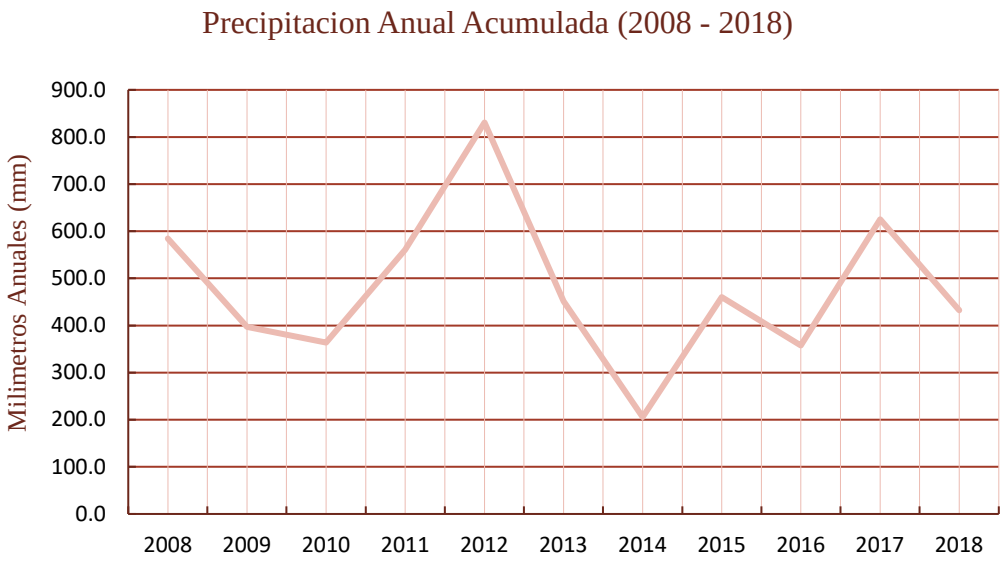


Diagrama 10. Precipitación Anual Acumulada (2008-2018) – Estación Madrigal
Adaptado de "Datos hidrometeorológicos" por SENAMHI (2018). Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

2.4.1. Temperatura media promedio

Las temperaturas medias mensuales registradas en la estación Madrigal presentan sus máximos en el primer y último trimestre de cada año con una temperatura media máxima de 12.8 C ° para el mes de enero de cada año y su mínimo los meses de junio y julio con una temperatura de 8.6 y 8.4 C ° respectivamente.

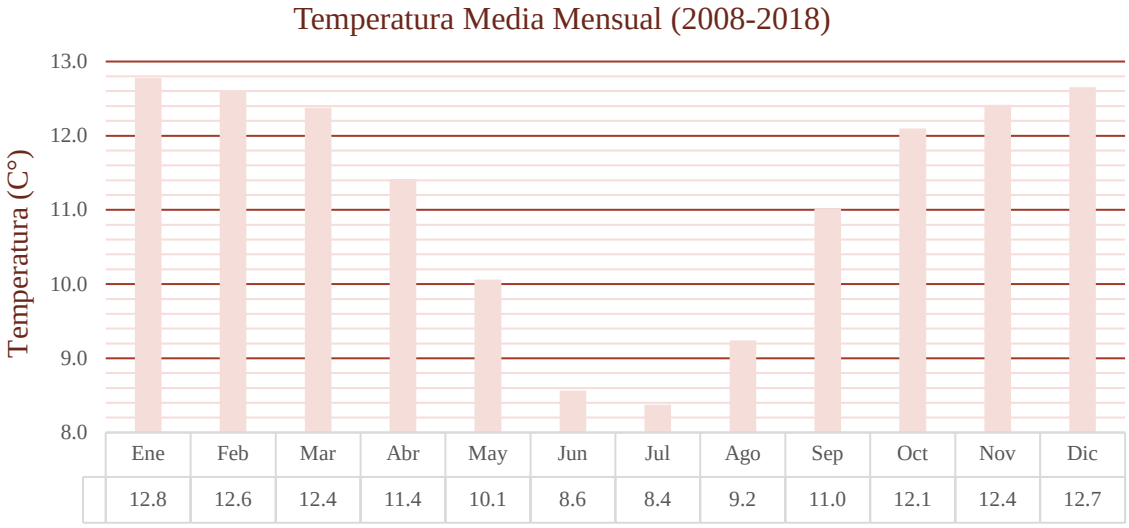


Diagrama 11. Temperatura Media Mensual (2008-2018) – Estación Madrigal
Adaptado de "Datos hidrometeorológicos" por SENAMHI (2018). Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

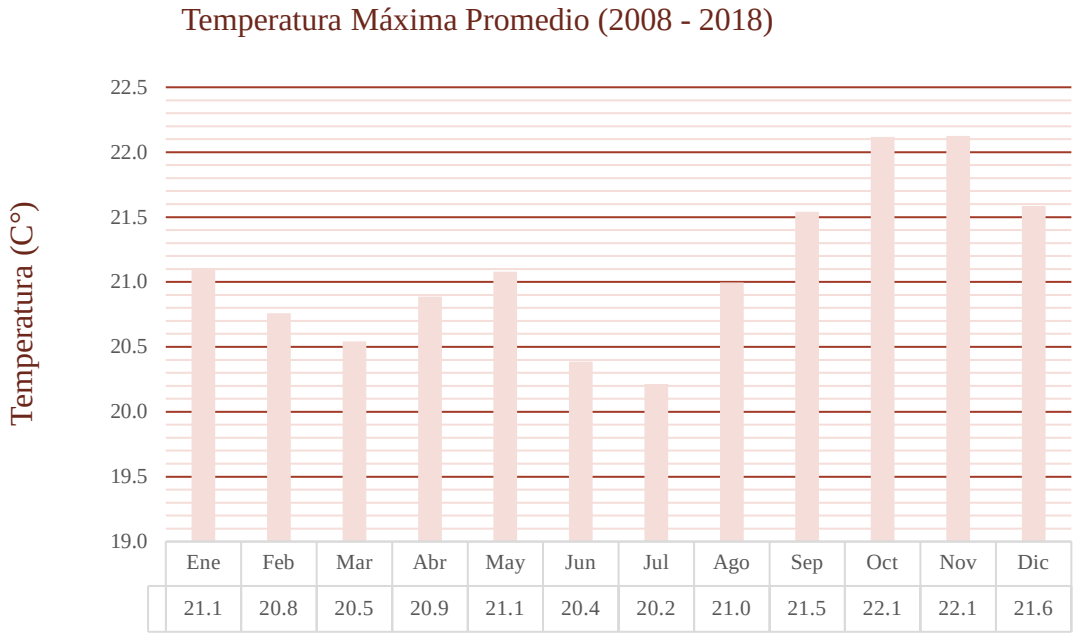


Diagrama 12. Temperatura Máxima Promedio (2008-2018) – Estación Madrigal
Adaptado de "Datos hidrometeorológicos" por SENAMHI (2018). Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

2.4.3. Temperatura mínima promedio

Las temperaturas mínimas mensuales registradas en la estación Madrigal presenta sus máximos en el primer trimestre de cada año con una temperatura máxima de 4.5 C ° correspondiente al mes de febrero y alcanzan sus mínimos los meses de junio y julio con una temperatura de -3.5 C °.

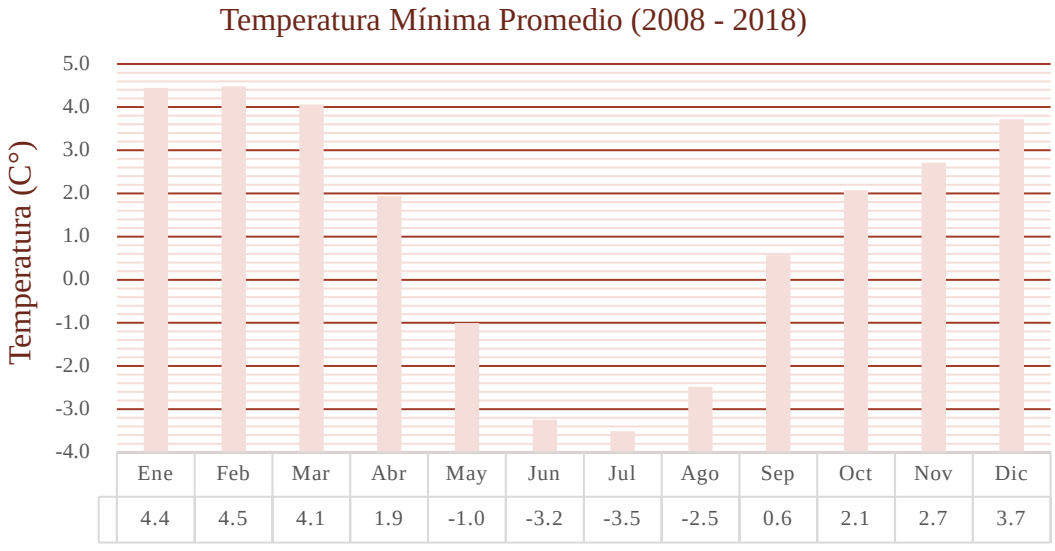


Diagrama 13. Temperatura Mínima Promedio (2008-2018) – Estación Madrigal
Adaptado de "Datos hidrometeorológicos" por SENAMHI (2018). Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

2.5. Marco Hidrográfico

La Autoridad Nacional del Agua (2012) utiliza la codificación Pfafstetter y califica a la cuenca del rio Camaná-Majes-Colca como una unidad hidrográfica de nivel 3. Está ubicada al sur del Perú, en la vertiente pacifica, su ámbito está comprendido principalmente en la región Arequipa y en un pequeño sector del sur de la región Cusco y oeste de Puno, tiene una extensión de 17, 152.73 km^2. La cuenca controla la hidrografía del Valle del Colca y de la localidad de Cabanaconde la cual corresponde a la unidad hidrográfica de nivel 4, Alto Camaná.

El río Colca tiene su origen en las alturas del cerro Yanasalla a 4886 m.s.n.m., ubicado en la provincia de Caylloma, en el límite con la región Puno. Sus cursos de agua son alimentados primordialmente con las precipitaciones que caen en las alturas del flanco occidental de la cordillera de los Andes. Desde sus nacientes hasta la confluencia con el río Capiza, ocupa un área de drenaje de 11,695.60 km^2, posee una longitud máxima de recorrido de 299.1 km y una pendiente promedio de 1.18 %.

En sus nacientes tiene un curso divagante; recibe una serie de afluentes de los cuales el mayor es el río Negrillo. Aguas abajo recibe las aguas del río Acopunco y a partir de esta confluencia cambia de rumbo y se dirige a Chivay, donde varía nuevamente de dirección y forma un importante valle agrícola entre los 3651 m.s.n.m. (Chivay) y los 2219 m.s.n.m. (confluencia con el río Huaru Rumi). Concluye el valle agrícola del Colca formando un largo y profundo cañón hasta confluir con el río Capiza, donde cambia de rumbo y de nombre. (Ver Figura 15).

Los principales tributarios del río Colca son:

a. Por la margen derecha: Antasalla, Blanquillo, Negrillo, Condoroma, Moqueruyo, Chalhuanca, Molloc, Andahua, Capiza, Río Grande y Puluvinas.
b. Por la margen izquierda: Callalli-Llapa, Hualca Hualca y Huambo.

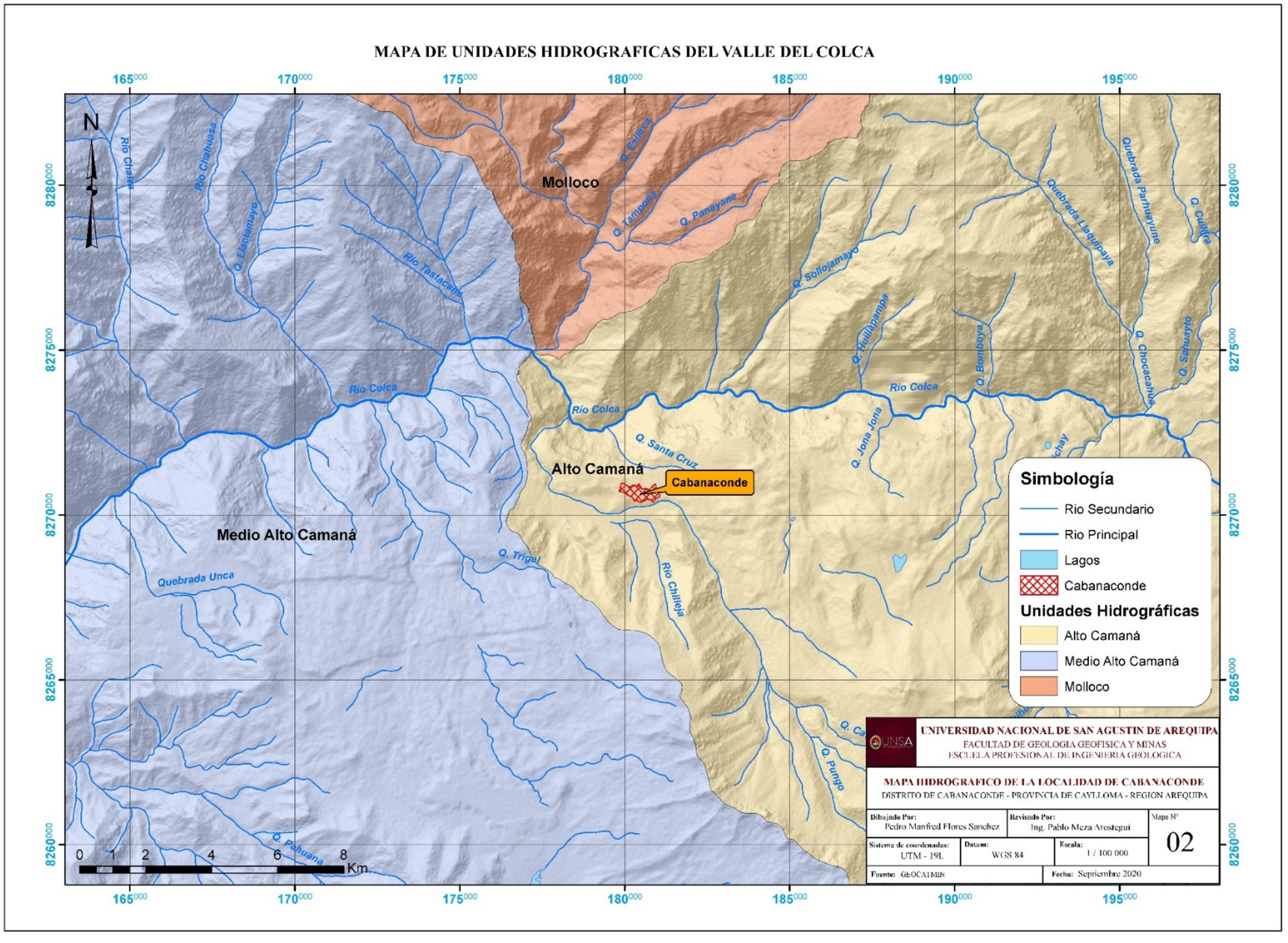


Figura 15. Mapa de Unidades Hidrográficas del Valle del Colca
Adaptado de “GEOCATMIN” por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

2.14. Marco Geomorfológico

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico describe en diferentes estudios e informes técnicos el área del Valle del Colca distinguiendo tres unidades fisiográficas diferenciadas. Una zona de altiplano por encima de los 4000 m.s.n.m. con vertientes montañosas elevadas y abruptas asociadas a edificios volcánicos; un sector de rampa, desnivel o vertiente muy disectada o erosionada y una zona costera sobreimpuesta a una cordillera antigua erosionada conocida como la Cordillera de la Costa. Un importante desnivel en menos de 150 kilómetros de longitud separa la zona altiplano-cordillerana y la costa Pacífica, un fuerte encajonamiento de la red fluvial forma zonas encañonadas (Cañón del Colca y otros tramos menores en el valle Majes-Camaná), que varían entre 1000 y 5000 m. de desnivel, a causa del intenso levantamiento tectónico en los Andes.

La geomorfología del Valle del Colca está comprendida en unidades o relieves de origen volcánico – erosional, seguido de unidades de relieve de origen tectónico-erosional, principalmente en el lado oeste de la cuenca y relieves de origen deposicional que se sobreponen a substratos rocosos de diferente origen.

> La geomorfología corresponde a la subcuenca del Colca, comprendida entre Andamayo y Sibayo- Callalli. Es muy compleja, con una predominancia en superficie de unidades o relieves de origen volcánico-erosional (65 %), seguidos de unidades de relieve de origen tectónico-erosional (25 %), principalmente en el lado oeste de la cuenca, y relieves de origen deposicional en menor porcentaje (10 %) que se sobreponen a un substrato rocoso de diferente origen. (Zavala, Churata y Varela, 2019, p. 97)

Las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio se pueden dividir en dos grandes grupos de unidades de relieve geomorfológico: Geoformas de carácter tectónico – degradacional, denudacional y geoformas de carácter deposicional o agradacional.) Zabala et

al. (2019). proponen esta clasificación realizada en base a la homogeneidad litológica y carácter estructural, así como en aspectos del relieve con relación a la erosión y sedimentación. A continuación, se hace referencia a las unidades geomorfológicas expuestas en la zona de estudio en base a las descripciones propuestas por Zabala, Vílchez, Rosado, Parí & Peña (2014) y Zabala et al. (2019). Esta información se evidencia en el mapa geomorfológico del Valle del Colca (Ver Figura 16), desarrollado a partir de la base de datos de libre acceso GEOCATMIN, perteneciente al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

2.14.1. Unidades de carácter tectónico degradacional y denudacional

2.14.1.1. Montañas y colinas estructural - denudacionales en rocas sedimentarias (RM-rs, RCL-rs, RMC-rs, RMCE-rs, RME-rs)

Se trata de relieves de estratos plegados de las unidades geológicas del Jurásico – Cretácico (Socosani, Puente, Cachíos, Labra, Gramadal, Hualhuani, Murco, Arcurquina, Ashua, Seraj), con laderas estructurales, crestas agudas alineadas en las rocas más resistentes que forman colinas y lomadas alargadas formando cuestas y relacionadas a un fallamiento regional andino de la cuenca. Se exponen principalmente en el sector entre Andamayo - Huambo - Cabanaconde. Localmente, incluyen laderas de colinas estructuralmente plegadas que conservan rasgos de las estructuras originales (anticlinales y sinclinales) a pesar de haber sido afectadas por procesos de denudación.

2.14.1.2. Montañas y colinas en rocas plutónicas (RM-ri, RMC-ri)

Son cuerpos intrusivos disectados de dioritas, gabros y tonalitas, estas rocas se exponen en varios sectores del Colca generando relieves moderados a abruptos, con laderas cóncavas por erosión pluvial y un drenaje característico dendrítico a subdendrítico (este último debido al fracturamiento en las rocas).

2.14.1.3. Montañas y laderas en rocas metamórficas (RM-rm)

Ocupan una parte importante en el cañón del Colca al oeste de Cabanaconde, hasta frente al sector de Choco, presentando laderas su.bverticales. Los gneis y rocas graníticas paleozoico - precámbricas que lo componen originan superficies ligeramente abruptas, cimas subredondeadas y alargadas, drenajes dendríticos a subdendríticos (relacionado a su esquistosidad) y muy densos con perfiles de valle en "V". Se presentan muy erosionadas y asociadas a procesos de cárcavas y flujos de detritos.

2.14.1.4. Montañas, laderas, colinas y mesetas en rocas volcánicas y volcánoclasticas (RM-rv, RMC-rv, RMC-rvs, RCL-rv, RM-cgl)

Están relacionadas al volcanismo más antiguo descrito en la evolución geológica (Grupo Tacaza). Suelen presentar superficies o laderas disectadas que en función a su altura relativa forman montañas o colinas. Conforman generalmente la parte inferior del valle del Colca entre Cabanaconde y Callalli, así como la parte superior en el sector que colinda a la cordillera de Shilla. La principal porción con alturas superiores a 1800 metros y subvertical se encuentra en el tramo principal del cañón entre Chimpa y Cabanaconde.

Litológicamente, las laderas y mesetas corresponden a secuencias del Grupo Tacaza indiviso y desarrollan generalmente superficies abruptas, mostrando frentes escarpados a abruptos. Por presentar estas características es común encontrar frentes de lavas o ignimbritas con caída de rocas, derrumbes, deslizamientos y hasta pequeñas avalanchas de rocas.

2.14.1.5. Laderas con flujos de lava asociado a estratovolcanes (Es-v)

Unidad constituida por aparatos volcánicos del Grupo Barroso, más o menos destruidos generados por los complejos volcánicos o estratovolcanes. Se extienden desde las altas cumbres y divisoria de aguas de la subcuenca, hasta el pie del valle y cañón del Colca. Presentan una topografía moderada a abrupta, encontrándose planicies o superficies levemente inclinadas producto de los derrames volcánicos que descienden hacia zonas altiplánicas locales (pampas Pinaya y Pajonal). Sobresalen en esta cuenca, con mayor exposición norte y noroeste del

nevado Hualca Hualca, cuya generación de lavas con un recorrido de más de 30 km desde su centro, llegan hasta el cañón del Colca, muy cerca al valle de Huambo; así como hasta la vertiente sur y sureste del volcán Mismi, entre otros menores.

2.14.1.6. Colinas, lomadas y mesetas en flujos piroclásticos (Sfp)

Son relieves altoandinos levemente inclinados con frentes escarpados, compuestos por tobas o ignimbritas o asociados a calderas volcánicas, depositadas lejos de su centro u origen. La superficie en las cimas generalmente es plana, ligeramente inclinada y algo redondeada por erosión. Las paredes o vertientes en las mesetas tienen pendiente moderada a abrupta. A diferencia de las mesetas volcánicas lávicas, presentan mayor erosión y una cobertura de suelo arenoso originada por la meteorización de las rocas, principalmente, de procesos físicos.

2.14.1.7. Coladas o campos de lavas basalto-andesíticas (Ca-la)

Corresponden a las últimas manifestaciones de actividad volcánica andina pliocena-holocena, de origen fisural y tectónico que rellenan cauces antiguos de valles fluvioglaciares, laderas Coporaque-Canocota, Huambo-Cabanaconde, Gloriahuasi, río Molloco, asociados generalmente a centros volcánicos pequeños y conos monogenéticos. Los campos de lava escalonados presentan superficies rugosas algo onduladas, con formas alargadas y lóbulos frontales empinados en frentes de lavas agudas, dentadas y escoriáceas.

2.14.2. Unidades de carácter deposicional o agradacional

2.14.2.1. Abanicos de piedemonte (Ab)

Es común encontrar en la cuenca depósitos aluviales o proluviales dispuestos en forma de abanicos, con ligera pendiente hacia el valle, desde 2° (suave) hasta 10-15°, relacionados enteramente a la ocurrencia de flujos de detritos. Son acumulaciones heterométricas y heterogéneas de material clástico en la desembocadura de quebradas o ríos tributarios.

2.14.2.2. Morrenas (Mo)

Son acumulaciones de origen glaciar, que generan relieves alargados y colinados, dispuestas en las laderas superiores de las montañas, las márgenes de valles glaciares o bordeando algunas lagunas. Generalmente, se encuentran morrenas expuestas y con regular extensión en las vertientes oeste y este del nevado Hualca Hualca, cordillera de Shilla, Mismi, así como otras montañas glaciares denudadas con alto índice de retroceso y acumulación glaciar (sector del cerro Pichillhuay), al noroeste de Huambo.

2.14.2.3. Vertiente aluviolacustre (V-al)

Destacan en esta unidad las localidades del valle del Colca emplazadas sobre los depósitos aluviolacustrinos, de este a oeste: Tuti, Chivay, Yanque, Achoma, Ichupampa, Lari, Madrigal y Maca. La característica de estos materiales hace que sean muy susceptibles a los deslizamientos. Geomorfológicamente, siendo una unidad localizada y emplazada en el valle del Colca, presenta una alternancia de materiales aluviales, proluviales y lacustres acumulados en el paleolago Colca. Presenta la mayor acumulación de procesos de movimientos en masa en la cuenca (deslizamientos, derrumbes, huaycos y movimientos complejos), y erosión de laderas.

2.14.2.4. Vertiente de detritos indiferenciada (V-d, V-cd)

La unidad está compuesta por acumulaciones en las laderas de montañas o colinas hasta el pie de valles adyacentes, en forma de talus de detritos. No presenta una geoforma característica por estar asociada a un solo evento coluvial o coluviodeluvial de movimiento en masa, pudiendo corresponder a más de uno. Su distribución en altura y tipos de roca es variable, presentándose mayormente en las márgenes de los valles tributarios o principales (sectores de Huambo; margen derecha del cañón del Colca). Usualmente, se generan depósitos en abanico de flujos o deslizamientos entrelazados, donde es difícil individualizarlos como uno, así como difícil de estimar la zona de arranque o despegue.

2.14.2.5. Vertiente glaciofluvial (V-gfl)

La cuenca presenta abundantes acumulaciones de sedimentos de formas irregulares que bordean zonas montañosas con litología sedimentaria y volcánica, asociados a una morfogénesis de origen glacial o periglacial. Su distribución está restringida a altitudes superiores a los 4400 m.s.n.m. como las vertientes noreste del Ampato, oeste del Hualca Hualca, este y sureste del Mismi. Son materiales fáciles de erosionar y remover con lluvias generando avalanchas o flujos de detritos y cárcavas.

2.14.2.6. Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd)

Esta unidad corresponde a las acumulaciones de ladera originadas por procesos de movimientos en masa no históricos y recientes (deslizamientos, derrumbes, avalanchas de rocas y/o (movimientos complejos). Generalmente, se componen de depósitos inconsolidados a ligeramente consolidados, muestran una composición litológica homogénea, tratándose de depósitos de corto a mediano recorrido relacionados a las laderas superiores adyacentes de áreas fluviales o periglaciares. Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación a la zona de arranque o despegue del movimiento en masa.

2.14.2.7. Vertiente o piedemonte aluviolacustre (P-al)

La unidad constituye un valle de represamiento en el río Colca, localizada entre la quebrada Chocahuanca y Pinchollo (al oeste) hasta cerca de Sibayo (al este). Destacan en esta unidad las localidades del valle del Colca emplazadas sobre los depósitos aluviolacustrinos, de este a oeste: Tuti, Chivay, Yanque, Achoma, Ichupampa, Lari, Madrigal y Maca. La característica de estos materiales hace que sean muy susceptibles a los deslizamientos. Presenta una alternancia de materiales aluviales, proluviales y lacustres acumulados en el “Paleolago Colca”. Presenta la mayor acumulación de procesos de movimientos en masa en la cuenca (deslizamientos, derrumbes, huaycos y movimientos complejos), y erosión de laderas.

2.14.2.8. Llanura aluvial o cauce inundable (Pl-al)

En algunos sectores se la cuenca se observa llanura de inundación por parte del rio Colca. Este tipo de terrenos presentan encauzamiento para el aprovechamiento de tierras agrícolas.

2.14.2.9. Terrazas aluviales (Ta-al)

Los niveles de las terrazas son diferenciales en el lado este de la subcuenca, en las márgenes del río Pulpera. Es importante indicar que muchos de los sectores del valle del Colca que corresponden al depósito aluviolacustre por erosión muestran hasta dos o tres niveles de terrazas por encima del cauce, evidenciando los diferentes ciclos de erosión durante el Cuaternario.

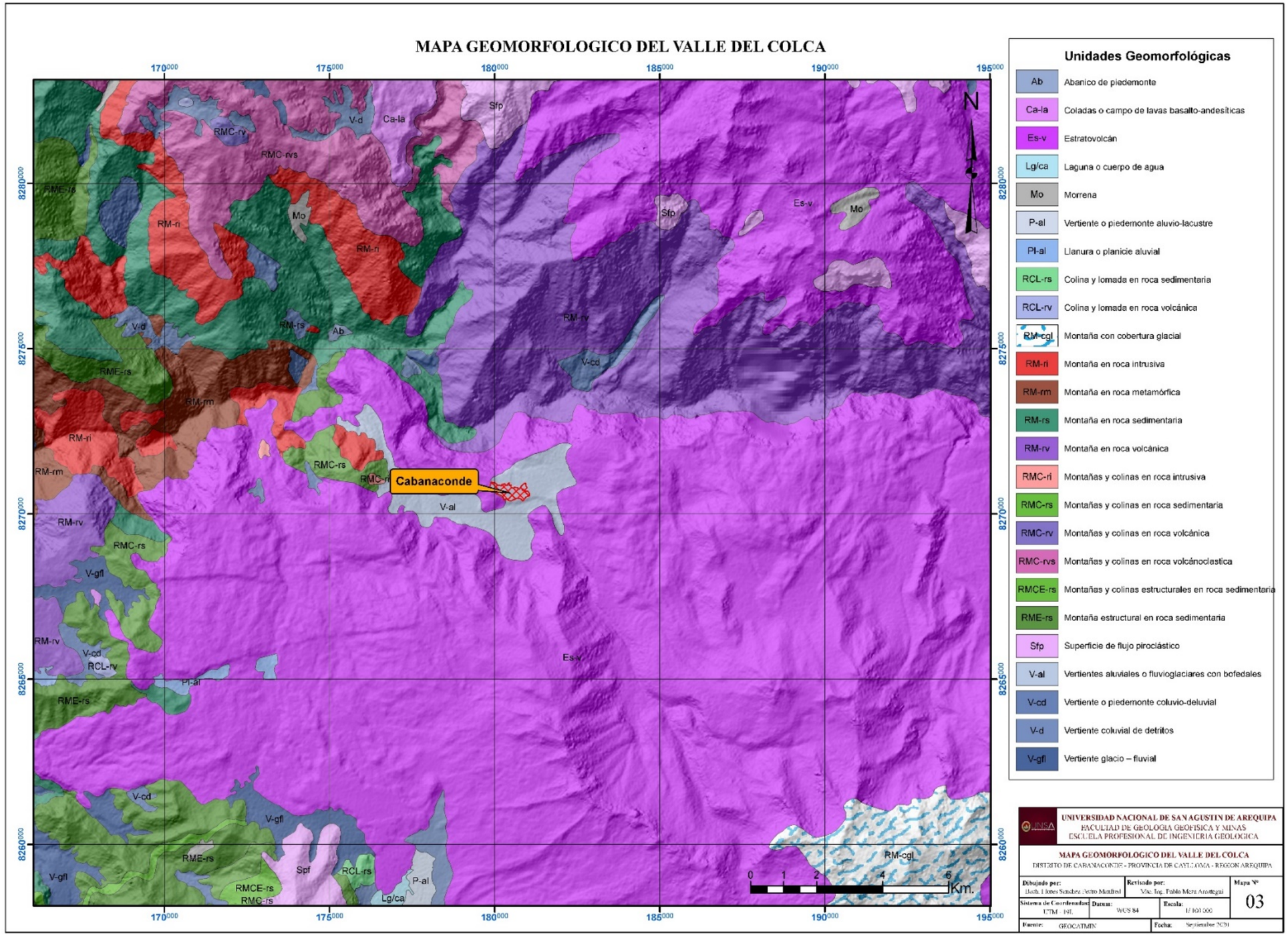


Figura 16. Mapa Geomorfológico del Valle del Colca
Adaptado de “GEOCATMIN” por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

2.15. Marco Geológico Regional

Las características de las unidades litoestratigráficas que afloran en la región Arequipa han sido descritas a partir de los estudios geológicos desarrollados por parte de las entidades técnico-científicas de carácter geológico y geográfico que trabajan en el territorio nacional. La litoestratigrafía es un criterio fundamental para el análisis de peligros geológicos ya que nos brinda información acerca de las características físicas de los afloramientos rocosos donde se asientan las ciudades y pueblos.

En el caso concreto de la litoestratigrafía del Valle del Colca y de manera más enfática, el distrito y la localidad de Cabanaconde, se tomó en consideración la revisión y actualización del cuadrángulo de Chivay (32-s) por parte de Quispesivana y Navarro (2003). A su vez se tomó en cuenta la revisión y actualización del cuadrángulo de Huambo (32-r) por parte de Romero D. y Ticona P. (2003). A continuación, una síntesis de las unidades litoestratigráficas expuestas en la zona de estudio en base de las descripciones propuestas en estos trabajos. Esta información se evidencia en el mapa geológico del Valle del Colca (Ver Figura 17), desarrollado a partir de la base de datos de libre acceso GEOCATMIN, perteneciente al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

2.15.1. Complejo Basal de la Costa (PE-gn)

Corresponde al basamento, aflora en cuerpos aislados y limitados por fallas de dirección andina (NO-SE), principalmente intruye rocas graníticas y dioríticas. Los mayores afloramientos se encuentran al NE de la hoja, en el sector de Choco formando los flancos del cañón del Colca. En este sector infrayace en discordancia angular a la Formación Socosani y al Grupo Barroso, litológicamente está compuesto por gneises, de composiciones graníticas, granodioríticas y tonalíticas blancas, rosadas, y blanco verdosas.

En el cuadrángulo de Mollendo Cobbing, Ozard y Snelling (1977) recolectaron gneises granulíticos, que fueron datados por el método Rb/Sr, indicando una edad 1,811 ± 39 Ma. Estos

afloramientos corresponderían a los mismos de la zona de estudio, por lo que se les asigna a estos gneises y micaesquistos la edad paleoproterozoica.

2.15.2. Grupo Yura

2.15.2.1. Formación Socosani (Jm-so)

Definida por Jenks, W. (1948), aflora en el sur y el norte indistintamente como pequeños afloramientos, al norte en los sectores de Ajpi y Choco aflora sobreyaciendo en discordancia angular sobre los gneises del Paleoproterozoico e infrayace concordantemente a la Formación Puente. Corresponden al miembro superior de esta unidad, litológicamente se componen por limoarcillitas intercaladas con delgados estratos de areniscas y con presencia de nódulos calcáreos. Otros afloramientos se encuentran en Ayo, la hacienda Ccanco y Nahuira perteneciente también al miembro superior y litológicamente compuestos por limoarcillitas grises oscuras a negras laminadas con abundantes nódulos calcáreos. El registro fósil hallado sugiere una edad perteneciente al Toarciano-Batoniano.

2.15.2.2. Formación Puente (Jm-pu)

Aflora en los márgenes del Rio Colca en ambas márgenes, entre la Quebrada Huambo, así como en el sur a manera de franjas alargadas de dirección NO-SE. Sobreyacen concordantemente a la Formación Socosani e infrayace de igual modo a la formación Cachíos. Litológicamente está compuesta por una intercalación de areniscas cuarzosas de grano fino a medio con limoarcillitas gris oscuras a negras. Se encuentran formando secuencias mayores de grano y estrato crecientes, puede alcanzar hasta 1100 m. de grosor. El registro fósil hallado sugiere una edad perteneciente al Caloviano.

2.15.2.3. Formación Cachíos (Jm-ca)

Aflora a manera de franjas aisladas y alargadas, en algunos casos como pequeños afloramientos. Aflora en la margen izquierda de la Quebrada Huambo, Sajarhua y entre el río Colca. El contacto con la Formación Puente es concordante, mientras que su relación con la

Formación Labra es progresiva. Litológicamente está compuesta por limoarcillitas grises a negras, muy fisibles, a veces engloban areniscas plegadas y deformadas (slump), pueden intercalarse algunos estratos de areniscas de grano fino a medio. Su posición estratigráfica sugiere una edad perteneciente al Caloviano superior – Oxfordiano.

2.15.2.4. Formación Labra (Js-la)

Aflora en el cerro Huarana y Sunturuta por el norte y al sur de la zona de estudio entre Chinini, suprayace progresivamente a la Formación Cachíos; infrayace concordantemente a la Formación Gramadal. Litológicamente está compuesta por areniscas intercaladas con limoarcillitas gris oscuras a negras. Las Areniscas son de grano fino a grueso, cuarzosas y blanquecinas, en algunos casos grises. Las limoarcillitas son grises a gris oscuras, raras veces presentan nódulos calcáreos. Su posición estratigráfica sugiere una edad perteneciente al Oxfordiano – Kimmeridgiano inferior.

2.15.2.5. Formación Gramadal (Js-gr)

Aflora al este de Huambo a manera de franjas alargadas y delgadas sobreyaciendo a la Formación Labra e infrayacaciendo en discordancia angular a la Formación Hualhuani. Litológicamente se compone de limoarcillitas grises, moradas, verdes y rojas intercaladas con areniscas cuarzosas de grano fino a grueso de color gris a blanco y calizas gris claras a oscuras, fosilíferas. El registro fósil hallado sugiere una edad perteneciente al Kimmeridgiano superior – Titoniano.

2.15.2.6. Formación Hualhuani (Ki-hu)

Aflora a manera de franjas alargadas al este de Huambo, en el cerro Ichahua y en ocasiones aisladamente. Infrayace concordantemente a la formación Murco. Litológicamente está compuesta principalmente por areniscas cuarzosas de grano fino a grueso blancas a rosadas intercaladas con delgados estratos de limoarcillitas negras a marrones, forma secuencias de

grano y estrato crecientes. Su posición estratigráfica sugiere una edad perteneciente al Neocomiano.

2.15.2.7. Formación Murco (Ki-mu)

Definida por Jenks, W. (1948), aflora a manera de franjas alargadas al este de Huambo en el cerro Ichahua, suprayace concordantemente a la formación Hualhuani. Esta formación posee tres miembros, en la zona de estudio aflora el tercer miembro, litológicamente se compone de areniscas seguidas por limoarcillitas rojas y verdes intercaladas con areniscas cuarzo – feldespáticas. Su posición estratigráfica sugiere una edad perteneciente al Barremiano – Albiano inferior. El registro fósil hallado sugiere una edad perteneciente al Kimmeridgiano superior – Titoniano.

2.15.2.8. Formación Arcurquina (Kis-ar)

Descrita por Jenks, W. (1948), afloran a manera de grandes cuerpos en la hoja de Huambo (32-r), en la zona de estudio aflora al este de Huambo en el cerro Jahuana, sobreyaciendo concordantemente a la Formación Murco. Litológicamente se compone principalmente por calizas gris oscuras a gris azuladas, en algunos casos margosas, se prolongan hacia la zona de Yura. El registro fósil hallado por Benavides, V. (1962) sugiere una edad perteneciente al Albiano medio – Turoniano en la zona de estudio.

2.15.2.9. Formación Huanca

Descrita por Jenks, W. (1948), se presenta al sur de la zona de estudio, a partir de la composición litológica se ha dividido esta formación en tres miembros (Querque, Huasamayo, Tarucani). En la zona de estudio aflora el miembro Tarucani (Peo-hu-t), compuesto por conglomerados polimícticos con clastos subredondeados a subangulosos de areniscas, calizas, intrusivos y gneises. No se ha encontrado fauna a fin de datar esta unidad, sin embargo, se le relaciona al Eoceno – Oligoceno inferior debido a su relación estratigráfica.

2.15.3. Grupo Tacaza

2.15.3.1. Tacaza Indiviso (PN-ta)

Al norte de la zona de estudio afloran a lo largo del río Colca, en este sector los depósitos no se han podido dividir. Consisten principalmente en intercalaciones de brechas, tobas líticas (clastos de andesitas), lavas andesíticas y algunos horizontes de areniscas tobáceas. Dataciones radiométricas por el método K/Ar realizados en diferentes ubicaciones del cuadrángulo de Chivay (32-s) sugieren una edad correspondiente al Mioceno.

2.15.3.2. Formación Orcopampa

Descrita por Caldas (1993), aflora a manera de cuerpos aislados, ocupando partes altas. Suprayace en discordancia angular indistintamente al Grupo Yura a los intrusivos del Plutón Sucna y a las formaciones Arcurquina y Huanca. En la zona de estudio afloran dos de los tres miembros que componen esta formación.

El miembro Santa Rosa (Nm-ta/sr) aflora al norte y noreste de la zona de estudio entre los cerros Campanayoc y Uchachas. Se compone de una secuencia de brechas y coladas volcánicas, principalmente de composición andesítica que en algunos casos se intercalan en forma de lentes, secuencias compuestas por conglomerados, areniscas y lutitas. Swanson (1998) realizo dataciones radiométricas por métodos K-Ar y Ar-Ar. Indico un rango de edad entre 22,8 ± 0,7 y 19,47 ± 0,6, lo cual sugiere que la edad del Miembro Santa Rosa correspondería al Mioceno inferior.

El miembro Aicaje (Nm-ta/ai) aflora al NE de la zona de estudio, formando las partes altas de los cerros Campanayoc y Uchachas, hallándose en discordancia erosional directamente sobre el miembro Santa Rosa, litológicamente está compuesto por una secuencia de coladas volcánicas andesíticas dispuestas en estratos horizontales a subhorizontales. Se sugiere una edad correspondiente al Mioceno medio a superior como gracias a una datación realizada en el cuadrángulo de Orcopampa (31-r) por el método K-Ar.

2.15.4. Grupo Barroso

Los productos volcánicos del Grupo Barroso son asociados a diferentes estructuras volcánicas tales como: Sabancaya, Ampato, Hualca Hualca, Las Minas, Mismi. Anccasi, Ananta, Huarancante y Jollo Jello. Han sido agrupados a partir de su morfología y naturaleza.

2.15.4.1. Complejo Volcánico Mismi

Sus depósitos fueron agrupados en tres eventos: El primer evento (Np-cvm/an1), consiste de flujos de andesitas porfiríticas que se extienden hacia el sur y sobreyacen a depósitos del Tacaza indiviso. El segundo evento (Np-cvm/an2), se trata de andesitas afíricas vesiculadas que se localizan en la cumbre. El tercer evento (Qpl-cvm/tbk), consiste de tobas de cristales no soldadas, rellenando parte del valle del río Colca o quedando como remanentes colgados (túnel de Maca). Una datación radiométrica realizada por el método K/Ar sugiere una edad plio–pleistocénica. En la misma zona afloran tobas cristalinas pertenecientes a la caldera Cailloma (Np-cay/tbk).

2.15.4.2. Complejo Volcánico Hualca Hualca

Sus depósitos han sido agrupados en seis eventos: El primer evento (Qpl-hh/tqa), consiste de flujos de lavas traquiandesíticas que se extienden hacia el este del complejo, cubriendo discordantemente a los depósitos del Tacaza indiviso y a las tobas soldadas del complejo volcánico Huarancante. El segundo evento (Qpl-hh/an1), consiste de flujos de andesita intercalados con tobas cristalolíticas, ambos forman la base del complejo volcánico, se extienden hacia el este y oeste, cubriendo a los depósitos del Tacaza indiviso. El tercer evento (Qpl-hh/an2), consiste de flujos de andesita porfirítica, que se extienden hacia el flanco sur, infrayaciendo a los depósitos del estratovolcán Sabancaya. El cuarto evento (Qpl-hh/an3), consiste de flujos andesíticos afíricos a porfiríticos de la cumbre. El quinto evento (Qpl-hh/da), consiste de domos y flujos dacíticos posteriores, el emplazamiento de este domo (criptodomo) originó el colapso del flanco norte del complejo, por lo que se emplazaron

depósitos de avalanchas de escombros hacia el río Colca y hacia Cabanaconde, estos depósitos conforman el sexto evento (Qpl-hh/dae) que taponaron las aguas del río, creando un represamiento aguas arriba con posterior sedimentación de depósitos lacustrinos (Madrigal, Maca).

2.15.4.3. Complejo Volcánico Ampato

Estos depósitos corresponden al Complejo Volcánico Ampato (Qpl-am/tbk) se ubican al sur de la zona de estudio. Corresponden a coladas y tobas, son de composición andesítica presentando fenos de plagioclasa y hornblenda. Las tobas se encuentran soldadas, muestran una disyunción columnar, presentan una coloración amarillenta, contienen pómez, plagioclasas y fragmentos líticos.

2.15.5. Grupo Andahua

Descrito por Hoempler, A. (1962) en el valle de Andahua, este afloramiento ocupa grandes áreas en la zona de estudio en las pampas de Mojompampa, Solarpampa, Uncapampa y en el flanco izquierdo del Cañon del Colca. Suprayace discordantemente sobre toda la serie mesozoica y en discordancia erosional sobre los depósitos aluviales pleistocénicos. El Grupo Andahua se halla compuesto únicamente por coladas volcánicas afaníticas a porfiríticas de composición andesítica a andesita basáltica, presentando coloraciones gris oscuras y negras. También se pueden encontrar escorias formando conos volcánicos. A pesar de presentar una litología monótona, en base a sus características morfológicas y al grado de meteorización se divide en dos subunidades: inferior (Qpl-an_i) y superior (Qpl-an_s). Dataciones realizadas por Kaneoca y Guevara (1984) por el método K-Ar, realizadas en el valle de Andahua sugieren una edad correspondiente al Pleistoceno superior.

2.15.6. Depósitos Cuaternarios

2.15.6.1. Depósitos morrénicos (Qpl-mo)

Se encuentran en la parte sur de la zona de estudio. Estos depósitos presentan una morfología suave a ondulada, están constituidos por gravas y bloques englobados por una matriz arenolimosa, la naturaleza de éstos depende de las rocas donde se han emplazado los glaciares.

2.15.6.2. Depósitos de deslizamientos (Qpl-de)

Son depósitos cuyas características físicas son resultantes de deslizamientos, derrumbes, caída de rocas, los más representativos se componen de bloques de tobas, englobados en una matriz de arenas y limos.

2.15.6.3. Depósitos lacustres (Qpl-la)

Al sur de la zona de estudio se encuentra la laguna Mucurca, en el borde oriental se ubica un depósito de este tipo, consiste de arenas y limos con abundante materia organica, se puede encontrar lentes de conglomerados en la de desembocadura de los ríos que alimentan el lago.

2.15.6.4. Depósitos aluviales (Qpl-al/Qh-al)

Son los depósitos con mayor distribución en el área de estudio correspondientes al Cuaternario. Los más representativos son los depósitos ubicados en los sectores de Ayo y Andamayo-Huatiapilla. Están constituidos por gravas y bloques subangulosos a subredondeados envueltos en una matriz limoarenosa que se encuentran formando terrazas aluviales a lo largo de los valles.

2.15.6.5. Depósitos fluviales (Qpl-fl)

Se depositan en los márgenes del Río Colca a la altura de Llanca, consisten en gravas heterogéneas, subredondeadas a redondeadas, con matriz arenosa, se intercalan con arenas de grano medio a grueso y algunos niveles de limo.

2.15.6.6. Depósitos coluvio-aluviales (Qh-co-al)

Estos depósitos fueron transportados antes de ser redepositados. Se incluye en estos depósitos acumulaciones de vertientes asociadas a flujos pequeños no canalizados y también a movimientos complejos (deslizamientos – flujos). Los mayores afloramientos de este tipo se observan al este de Ayo y en el borde occidental de la laguna Mucurca. Se componen de gravas y bloques subangulosos a angulosos que presentan una matriz limoarenosa.

2.15.6.7. Depósitos de travertinos (Qpl-tr)

Afloran en los alrededores de la localidad de Huambo, se tratan de estratificaciones de travertinos color crema, suelen presentarse en zonas de disolución de algunas grutas y cavernas, así como también por procesos de hundimientos locales que han afectado los terrenos de cultivo.

2.15.7. Rocas Intrusivas

Las rocas plutónicas de la zona de estudio forman parte del Batolito de la Costa, se identificaron cuerpos intrusivos con dimensiones diferentes que varian desde macizos plutónicos (monzonitas, granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas), hasta cuerpos subvolcánicos de naturaleza andesítica y dacítica.

El emplazamiento habría sido desde el Cretácico superior hasta el Mioceno terminal, de acuerdo a sus características petrográficas, geometría de los plutones y de las estructuras, se han dividido en dos dominios (SO, NE) y una zona intermedia. Los afloramientos de la zona de estudio corresponden al dominio Noreste (zona oriental).

2.15.7.1. Plutón Llanca (Ks-ti/gd)

Aflora, entre los cerros Ucuchachas y Tacupampa, al NO de la zona de estudio. Son tres cuerpos de granodiorita que se han agrupado en un solo plutón por presentar características similares. Están distribuidos en un área de aproximadamente 32 km², en la margen derecha del río Colca. Intruyen a unidades mesozoicas (Grupo Yura) que se encuentran cubiertas por rocas

piroclásticas y derrames lávicos de la Formación Orcopampa y Grupo Andahua respectivamente. Macroscópicamente estas granodioritas presentan un color leucócrata a mesócrata, textura equigranular y grano medio.

2.15.7.2. Plutón Choco (Ks-ti/gd)

Se trata de un intrusivo de granodiorita, se encuentra en las inmediaciones de la localidad de Choco, dispuesto en cuatro cuerpos de dimensiones diferentes que juntos alcanzan un área de 10 km² aproximadamente. Los cuerpos se encuentran al SE de Choco intruyendo a rocas del Basamento Precámbrico. Macroscópicamente estas granodioritas presentan colores leucócratas, textura equigranular, grano medio, cristales de cuarzo, plagioclasas y proporciones menores de máficos.

2.15.7.3. Stock Chigri (Ks-ti/di)

Comprende a dos pequeños cuerpos de naturaleza diorítica, localizados en el cerro Chigri y en las vertientes del río Colca. El primero intruye a las secuencias del Grupo Yura y está cubierto por depósitos lávicos y aluviales. El segundo cuerpo intruye a las rocas del Basamento Precámbrico. Macroscópicamente presentan cristales máficos, plagioclasas y un bajo contenido de cuarzo con colores leucócratas a melanócratas.

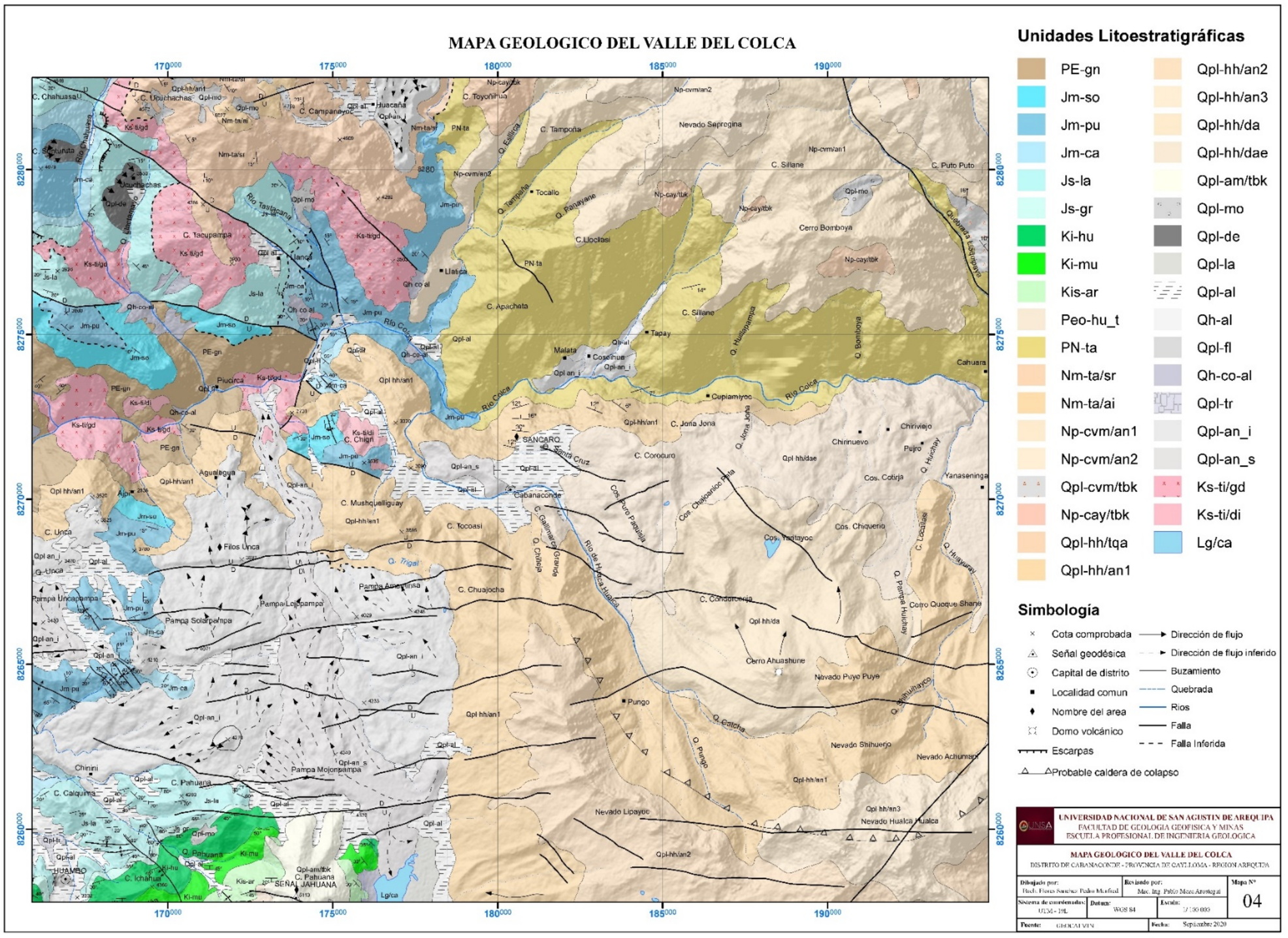


Figura 17. Mapa Geológico del Valle del Colca
Adaptado de “GEOCATMIN” por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

2.16. Marco Tectónico Regional

El territorio peruano se encuentra situado en la parte central y occidental de América del Sur, debido a su ubicación forma parte del Cinturón del Pacifico, donde se concentra mayor actividad tectónica del planeta, lo que ocasiona intensa actividad volcánica y sísmica en el territorio peruano. La tectónica del Perú está controlada por el proceso de subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana, Kendrick et al. (2003) estiman una velocidad de subducción entre el rango de 6.3 – 7.9 cm/año. Este proceso controla la geodinámica y la morfología estructural sobre el territorio peruano.

La morfología del territorio peruano es el producto de sucesivos ciclos orogénicos, dentro de los cuales se encuentran etapas de sedimentación, deformación, levantamiento erosión y peneplanización. A fin de evaluar la influencia de la tectónica durante el desarrollo, sedimentación y/o depositación de las distintas unidades litoestratigráficas que afloran al sur del Perú, es necesario el reconocimiento de las estructuras de carácter regional y su evolución en el tiempo. Las descripciones de las estructuras morfoestructurales, sus etapas tectónicas y sedimentarias que tuvieron lugar en la región Arequipa fueron elaboradas partir de las hipótesis de investigadores de instituciones técnico-científicas nacionales e internacionales. A continuación, una breve síntesis de las estructuras y procesos en base a la cronología que propone Benavente, Delgado, García, Aguirre y Audin (2017).

2.16.1. Evolución Tectono-Sedimentaria de la Cordillera de la Costa

2.16.1.1. Acreción del Bloque Alóctono Arequipa o Cratón Arequipa - Antofalla

El basamento Pre-Paleozoico representado por las unidades del Complejo Basal de la Costa fueron afectados por la orogenia Grenvilliana (1250-980 Ma), según Ramos (2010). Esta megaestructura denominada Cratón Arequipa – Antofalla fue acretada en el Mesoproterozoico con el Cratón Amazónico según Loewy, Connelly y Dalziel (2004). Durante el Cámbrico superior-Ordovícico se originó un régimen distensivo entre el Cratón Arequipa – Antofalla y

se produjo un magmatismo en las cuencas trasarco según Carlotto et al. (2009). En el Ordovícico se produjeron pulsos magmáticos intruyendo en rocas metamórficas, se denominó Batolito San Nicolás ubicado en la actual Cordillera de la Costa.

2.16.1.2. Sedimentación post-acreción y Tectonismo Herciniano

A partir de la acreción del cratón se depositaron en las cuencas ubicadas entre el macizo de Arequipa y el cratón Amazónico (Grupo Cabanillas). Estos depósitos tienen origen en la erosión tanto del cratón Amazónico como del macizo de Arequipa. Estas secuencias fueron afectadas por la orogenia Variscana seguida de un proceso de peneplanización según Newell (1949) y la posterior fase tectónica Herciniana.

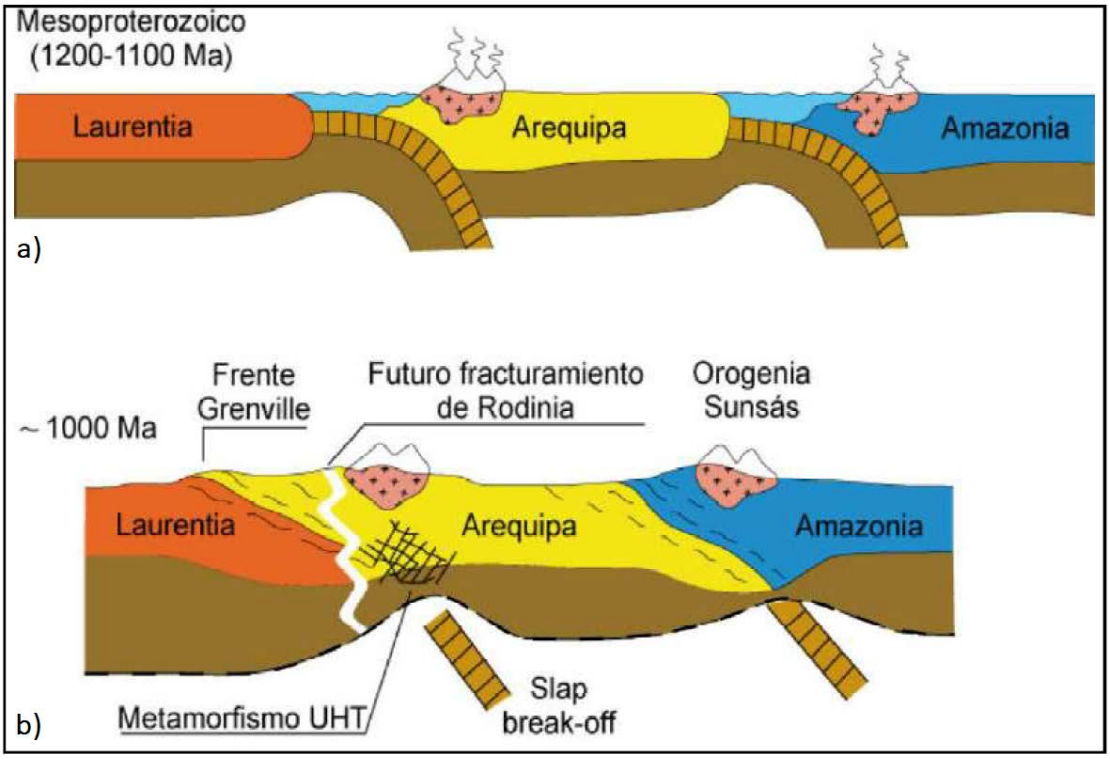


Figura 18. Evolución del macizo de Arequipa durante el Mesoproterozoico
a) Formación de los arcos magmáticos en Arequipa y los cinturones Sunsás. b) Colisión durante la orogenia Grenville-Sunsás y evidencia de surgencia durante el desprendimiento de slab (porción de placa que está siendo subducida).
Adaptado de "The basement of the Central Andes: The Arequipa and related terranes", por V. Ramos, 2008, *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 36, p. 307.

2.16.1.3. Rift Continental Pérmico-Cretácico Inferior y Sedimentación sin-Rift

En el Pérmico ocurrió un evento de rifting de trasarco debido a un ambiente distensivo, este adelgazamiento cortical fue reconocido desde el norte peruano hasta el norte argentino coincidiendo con la actual Cordillera Oriental. Este proceso, que se estima duró desde el Pérmico hasta el Jurásico-Cretácico inferior, originó inicialmente el depósito de molasas interdigitadas con secuencias volcánicas del Grupo Mitu (Triásico), en las depresiones de los gravens basculados en las márgenes del rift, lo cual explica así su variado espesor según Sempere et al. (1999).

2.16.2. Evolución de la Cuenca Arequipa e inicio de la Tectónica Andina

2.16.2.1. Fase Tectónica Distensiva

Según Marocco & Delfaud (1986), aparentemente la cuenca Arequipa se originó por el proceso de rifting en el Liásico, el cual inicia con el depósito de lavas y depósitos continentales de la Formación Chocolate (Jurásico inferior) y la posterior depositación de las calizas de ambiente marino somero de la Formación Socosani. Durante el régimen distensivo del Jurásico inferior a medio se desarrolló una cuenca principalmente clástica con periodos de deposición calcárea, además de una sedimentación turbidítica según Vicente, Beaudoin, Chávez y León (1982).

Esta cuenca se encuentra delimitada al norte por el alto Totos-Paras, al este por el alto Cusco-Puno y al oeste por la Cordillera de la Costa, y se extiende al sur. Según Jacay (2005) su evolución sedimentaria está caracterizada por la deposición inicial de la serie volcanosedimentaria del Grupo Chocolate seguido por los sedimentos carbonatados de la Formación Socosani, el cual presenta en su parte superior estructuras de distensión que evidencian subsidencia en la cuenca, posteriormente se da paso a la sedimentación del Grupo Yura.

2.16.2.2. Fase Tectónica Compresiva

La tectónica compresional en el Cretácico superior-Paleoceno (fase tectónica Andina) generó una inversión tectónica en el área aprovechando las mismas estructuras de cinemática normal formadas en el régimen de rift según Vicente (1990) y Sempere et al. (1999). Dicho evento tectónico afectó las secuencias prejurásicas, así como las secuencias calcáreas de las formaciones Ferrobamba, Arcurquina, Chilcane y Ashua y los eventos volcánicos de las formaciones Huaracane del Grupo Toquepala y Pichu. Además, en esta época se ha generado actividad magmática representada por las superunidades Incahuasi, Ilo, Cerro Verde, Tiabaya, Yarabamba y Challaviento. Posterior a este evento tectónico y en discordancia angular se depositaron las formaciones Huanca, Puno y Moquegua, las cuales se formaron gracias a la erosión post fase tectónica peruana y que de igual manera son afectadas por las fases tectónicas Inca, Inca 1 e Inca 2.

2.16.3. Evolución del Arco Magmático o Cordillera Occidental

Producto del levantamiento andino y como resultado de las continuas fases tectónicas compresivas Inca y Quechua, además de esfuerzos transformantes de tipo sinestral, se origina el arco volcánico en la Cordillera Occidental que varía y migra gracias a los cambios del ángulo de subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana. El registro volcánico en la Cordillera Occidental indica presencia de centros volcánicos desde el Eoceno hasta la actualidad. Estas estructuras generaron a la vez la acumulación de depósitos de origen volcánico y volcanosedimentario, en cuencas aledañas y cuencas de antearco y trasarco, que fueron afectadas por continuos esfuerzos. Debido a la actividad ígnea en los arcos magmáticos y sus trasarcos magmáticos es que se forma la corteza continental y muchos de los depósitos de minerales. Mamani et al., 2010 concluyeron que: “actualmente en el Perú la forma del arco magmático es una franja y no una línea de volcanes” (p. 563), es así que el Arco Tacaza de edad Oligoceno (30-24 Ma) fue afectado por la tectónica Quechua I. El posterior Arco Sillapaca

y Arco Maure fueron afectados por las tectónicas Quechua II y III y, por último, el Arco Barroso de edad Mioceno-Plioceno fue afectado por la fase tectónica Quechua IV.

2.16.4. Evolución de las Cuencas sinorogénicas Cenozoicas

2.16.4.1. Sedimentación en las cuencas antearco Cenozoicas

En el antearco, desde el Oligoceno al Plioceno, se depositó los sedimentos marinos y continentales de la Formación Camaná, que es relacionada a la transgresión marina del Oligoceno y afectada por movimientos verticales de emersión miocénica, lo cual generó pequeños flexuramientos y ondulaciones de dirección E-O y NOSE según García (1968). También en el antearco del sur peruano se desarrolló la cuenca Moquegua entre la Cordillera Occidental y la Cordillera de la Costa que depositó, en su mayoría, secuencias continentales de origen fluvial además de secuencias volcanoclásticas según Sempere *et al.* (2014).

De igual forma, a partir del Oligoceno terminal, la cuenca estuvo progresivamente invadida por los productos volcánicos y explosivos (ignimbritas) de la Formación Huaylillas, testigo de la actividad del arco volcánico durante este periodo según Vega (2002). Posteriormente, también en la Cordillera de la Costa y la planicie costera, se depositaron las secuencias clásticas de las formaciones Pisco y Millo como producto de la depositación marina y continental, respectivamente.

2.16.4.2. Sedimentación en las cuencas trasarco e intraarco Cenozoicas

> En la Cordillera Occidental y el Altiplano también se originaron cuencas compuestas básicamente por la acumulación de material volcánico transportado por los paleocanales del área y, en algunos casos, formándose cuencas por represamiento con origen volcánico y/o tectónico. Las cuencas fluviolacustres fueron afectadas también por la fase tectónica Quechua y por la actividad volcánica, tales como coladas de lavas y flujos piroclásticos. (Benavente C. et al., 2017, p. 17).

2.17. Sismicidad

La sismología se define como la ciencia que estudia los movimientos sísmicos y fenómenos asociados a la generación de movimientos sísmico. Un terremoto se define como un movimiento detectable de la superficie de la Tierra resultante de las ondas sísmicas generadas por la repentina liberación de energía dentro de la Tierra según Hunt (2007), pueden durar desde segundos hasta varios minutos dependiendo de su magnitud. El proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana es el factor más importante, generando movimientos sísmicos a lo largo de todo el borde occidental del Perú.

En la zona de interés que comprende la parte sur-occidental del Perú, los rasgos tectónicos más importantes son la fosa oceánica Perú-Chile, la Dorsal de Nazca y en la zona continental los rasgos tectónicos más importantes son la cordillera de los Andes y los sistemas de fallas regionales y locales. Olarte y López (2001) afirman que el régimen de esfuerzo regional tectónico parece ser predominante compresional, normal a las líneas de la costa y a la dirección de las cordilleras.

A su vez los terremotos también pueden producirse por la reactivación de fallas geológicas, cuya ruptura en profundidad (foco o hipocentro) libera la energía acumulada, la cual se propaga en forma de ondas sísmicas que dan lugar a grandes deformaciones y roturas del terreno.

La necesidad de obtener información sísmica relevante a la hora de realizar planes de gestión del riesgo sísmico adecuado llevo a la necesidad de actualizar y revisar los catálogos sísmicos a fin de lograr una homogeneidad en los datos presentados, en vista de esta necesidad el Instituto Geofísico del Perú, propuso como parte de sus objetivos para los años 1999 y 2000, la actualización y revisión del Catálogo Sísmico del Perú para el periodo 1471-1982 por Tavera et al. (2001). La realización de este catálogo implico la integración y normalización de la información previamente recopilada en los catálogos publicados anteriormente por los

proyectos SISAN y SISRA. Para un mejor manejo de la información Tavera (2001) procedió a dividir el catálogo original en dos partes, la primera considera la actividad sísmica denominada histórica que abarca el período 1471-1960 y la segunda denominada instrumental, la misma que considera los sismos ocurridos entre los años 1961-1982.

2.17.1. Sismicidad histórica

La sismicidad histórica considera información sobre los sismos que afectaron al territorio peruano en la historia, en el Perú la información sísmica data desde el año 1500 y se tomaron en cuenta datos como: fecha de ocurrencia, coordenadas epicentrales, magnitudes, profundidad, entre otros. Silgado (1978) presento un catálogo sísmico, agregando además descripciones de las ocurrencias sísmicas. En la Tabla 5 se muestra los terremotos con intensidades MM mayores o iguales a VIII para el período de 1513-1959.

A partir del área de intensidad máxima, Silgado (1978) obtuvo los valores de magnitud de los sismos históricos más importantes “Magnitud Silgado” con el objetivo de poder compararlos con sismos recientes.

Entre los sismos más destructivos en la zona de estudio de los cuales se tiene registro ocurrieron en 1604 (8.6 Mw), que tuvo una longitud de ruptura de 450 km y genero un tsunami de 10 a 15 m de altura, el sismo de 1687, de una longitud de ruptura aproximada de 150 km, el sismo de 1784, que tuvo una longitud de ruptura de 300 km y genero un tsunami1877 (8,6 Mw) enfrente de la costa norte de Chile. Estos sismos afectaron los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna y las regiones chilenas de Arica, Iquique y Antofagasta.

Tabla 5

Principales terremotos ocurridos en Perú entre 1513 y 1959

Fecha	Lat-S	Lon-W	I_0 (MM[b])	M[a] (Silgado)
22-01-1582	-16,3	-73,3	X	7,9
09-07-1586	-12,2	-77,7	IX	8,1
24-11-1604	-18,0	-71,5	IX	8,4
14-02-1619	-8,0	-79,2	IX	7,8
31-05-1650	-13,8	-72,0	X	7,2
13-11-1655	-12,0	-77,4	IX	7,4
12-05-1664	-14,0	-76,0	X	7,8
16-06- 1678	-12,3	-77,8	IX	-
20-09-1687	-13,0	-77,5	IX	8,2
21-10-1687	-16.4	-71,6	VIII	-
22-01-1725	-12,0	-77,0	VIII	-
28-09-1746	-11,6	-77,5	X	8,4
13-05-1784	-16,5	-72,0	X	8,0
07-12-1806	-12,0	-78,0	VIII	7,5
10-07-1821	-16,0	-73,0	VIII	7,9
18-09-1833	-18,2	-71,0	VIII	-
13-08-1868	-18,5	-71,2	X	8,6
09-05-1877	-19,5	-71,0	VIII	7,5
28-07-1913	-17,0	-73,0	IX	7,0
06-08-1913	-17,0	-74,0	X	7,7
24-05-1940	-10,5	-77,6	VIII	8,2
24-08-1942	-15,0	-76,0	IX	8,4
10-11-1946	-8,3	-77,8	X	7,2
01-11-1047	-11,0	-75,0	IX	7,5
12-12-1953	-3,6	-80,5	VIII	7,7

Nota. Adaptado de "*Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú: 1513-1974"* (p. 128-130) por E. Silgado, 1978. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.12544/251

[a]M indica la magnitud asignada por Silgado (1978). [b]MM corresponde a la escala Mercalli Modificada

local de 2 a 4 m, en 1868 (8.8 Mw) con epicentros frente a la costa sur del Perú y en

En cuanto a la realización del catálogo de sismicidad histórica (1471 – 1960) de Tavera (2001) se realizaron actividades como revisión la bibliográfica, elaboración de mapas y secciones verticales, asignación del código "S" y la regionalización de Flinn. Se obtuvieron los siguientes resultados: 15 sismos modificados en su tiempo origen (T.O.), 94 en sus coordenadas epicentrales (Latitud y Longitud), 99 en su profundidad, 839 en su magnitud "mb"; 61 en su

magnitud “Ms”; (se ha cambiado la magnitud a tres sismos y añadido a otros 58). La magnitud “Mw” ha sido añadida a 11 sismos y el momento sísmico a otros 13 sismos.

2.17.2. Sismicidad instrumental

La información obtenida de manera instrumental en un catálogo sísmico permite identificar y evaluar las características de las fuentes sismogénicas de una región específica, la evolución de la instrumentación sismogénica ha permitido la recolección de data cuantitativa cada vez más exacta, hasta el año 1900 en el territorio peruano solo se disponía de datos históricos descriptivos de sismos destructores. Entre los años 1900 y 1960 se dispuso de datos instrumentales gracias a la red sísmica mundial (USGS), a partir de esa fecha el incremento de estaciones sísmicas operativas en el territorio permitieron mejorar la calidad de los datos sísmicos registrados. En cuanto a la realización del catálogo de sismicidad instrumental (1961 – 1982) de Tavera (2001), el procedimiento seguido por para la realización de este catálogo incluyo la elaboración de mapas y secciones verticales, revisión bibliográfica, asignación del código “S”, regionalización de Flinn. Los resultados obtenidos indicaron un total de 420 modificaciones en fechas, 988 en coordenadas epicentrales, 1,056 en profundidad, 637 en magnitud “mb”, se agregó la magnitud “Ms” a 16 sismos, la magnitud “Mw” a 1,299 sismos y a 1,545 sismos se le agrego el momento sísmico.

Finalmente, al Catálogo Sísmico Revisado y Actualizado se ha añadido un total de

493 sismos entre históricos e instrumentales. El formato de la nueva versión del catálogo sísmico es el mismo del catálogo original; es decir, formato SISRA. Los campos libres en el formato original, han sido utilizados para añadir los valores calculados para Mo y Mw. Asimismo, al costado de cada parámetro añadido o modificado se ha colocado un código de letras que identifica al autor o a la fuente de donde se ha extraído la información.

En la actualidad se puede encontrar catálogos sísmicos actualizados en las bases de datos de instituciones gubernamentales como el Instituto Geofísico del Perú.

2.17.3. Fuentes sismogénicas

La fuente sismogénica es un área geográfica que posee similitudes geológicas, geofísicas, estructurales y sísmicas que sugieren un potencial sísmico homogéneo en toda el área. Es decir que los procesos que desencadenan sismos son homogéneos en generación y recurrencia. El Perú por su ubicación geográfica presenta dos tipos de fuentes sismogénicas.

2.17.3.1. Sismos interplaca

Son los que están asociados directamente al contacto de dos placas, y el Perú se ubica en una zona de margen continental activo (subducción) donde la placa oceánica se introduce por debajo de la placa continental (Ver Fig. 19a). Este proceso se comporta como una "megafalla" activa que llega a generar sismos con magnitudes superiores a Mw 8 (Chile 1960, Mw 9.5; Indonesia 2004, Mw 9.3); los efectos cosísmicos vienen a ser los tsunamis (Ej. Camaná-Arequipa, 2001), fenómenos de remoción en masa (Ej. Yungay-Áncash, 1970) y licuefacción de suelos (Ej. Pisco-Ica-Chincha, 2007).

2.17.3.2. Sismos intraplaca

Sismos intraplaca o corticales, a diferencia de los sismos interplaca, estos se dan al interior de una placa tectónica (Ver Fig. 19b) en este caso de la placa Sudamericana, debido a la reactivación de fallas geológicas, pueden provocar hasta sismos de Mw 7.5. El área de influencia no es extensa como los sismos interplaca, esta depende de la magnitud, la litología y la distancia al epicentro, pero al ser en su mayoría sismos superficiales generan grandes daños, deformaciones y roturas del terreno, al igual que movimientos en masa (Ej. Quiches, Áncash, 1947) y sentamientos o licuefacción de suelos y actividad volcánica.

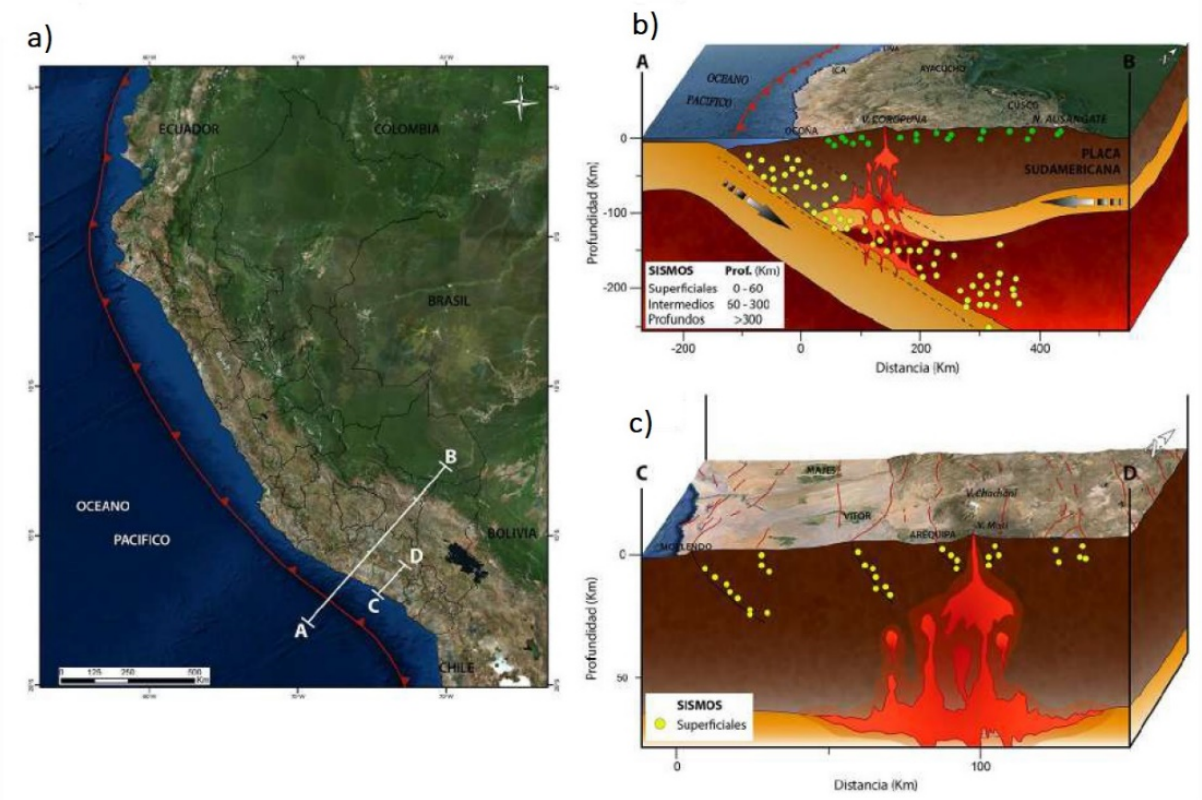


Figura 19. Sismos según el margen continental activo.
a) Secciones AB y CD que describen la generación de los sismos interplaca e intraplaca, respectivamente. b) La sección AB corta perpendicularmente la subducción y la cordillera de los Andes. Se muestra el proceso de generación de sismos a causa de proceso de subducción donde la Placa Oceánica se introduce por debajo de la Placa Sudamericana. c) La sección CD explica la generación de los sismos intraplaca que se dan a causa de la reactivación de fallas geológicas**.** Tomado de *Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la Región Arequipa* (p. 206), por C. Benavente et al., 2017. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223

2.17.4. Distribución espacial de la actividad sísmica

En el Perú la ocurrencia de sismos es continua en el tiempo y cada año, se registra y se reporta un promedio de 150-170 sismos sentidos en superficie con intensidades mínimas de II-III (MM) y magnitudes ML ≥ 4.5. Los sismos con magnitud mayor (M ≥ 7.0), son menos frecuentes y cuando tienen su origen en el proceso de fricción de placas, producen importantes daños en áreas relativamente grandes, tal como sucedió en la región Sur de Perú el 23 de junio de 2001 (Mw = 8.2) y en Pisco, el 15 de agosto de 2007 (Mw = 7.9). A niveles más profundos, estos sismos pocas veces producen daños en razón que la energía emitida se atenúa rápidamente

antes de llegar a la superficie; sin embargo, es frecuente observar efectos secundarios como licuación de suelos y deslizamientos de piedras en zonas de alta pendiente.

Para el adecuado estudio de la sismicidad se han clasificado en tres tipos de sismos en base a su profundidad focal, esta clasificación permite la realización de mapas sísmicos, perfiles y esquemas que nos permitan evaluar la sismicidad en áreas específicas del territorio nacional.

El estado peruano mediante el Decreto Supremo N° 003-2016 modificó la norma técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones, proponiendo una distribución espacial basada en un factor "Z" que se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años, se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad, el factor "Z" se generó a partir de las características generales de los movimientos sísmicos, las leyes de atenuación y la información neotectónica (Ver Figura 20).

2.17.4.1. Sismos con foco superficial (h ≤ 60 km)

Estos sismos ocurren principalmente entre la fosa y la línea de costa, asociados al proceso de subducción a profundidades menores a 60 km, también pueden estar relacionados a la deformación tectónica superficial, produciendo terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia, en otra zona ocurren terremotos producidos por la subsidencia del escudo brasileño bajo la cordillera Andina, en la zona del altiplano también existen sismos superficiales en menor cantidad y más dispersos. Tavera y Buforn (1998) sugieren zonas de bajo índice de sismicidad entre la línea de costa y la Cordillera Occidental (4° S – 13° S) y en la región sur (13° S – 16° S), mostrando que en estas zonas el régimen de deformación cortical probablemente sea menor o que existen periodos mayores de recurrencia para terremotos de magnitud elevada. Los sismos con origen en los procesos de deformación de la corteza a niveles superficiales son menos frecuentes, pero cuando ocurren, producen daños de

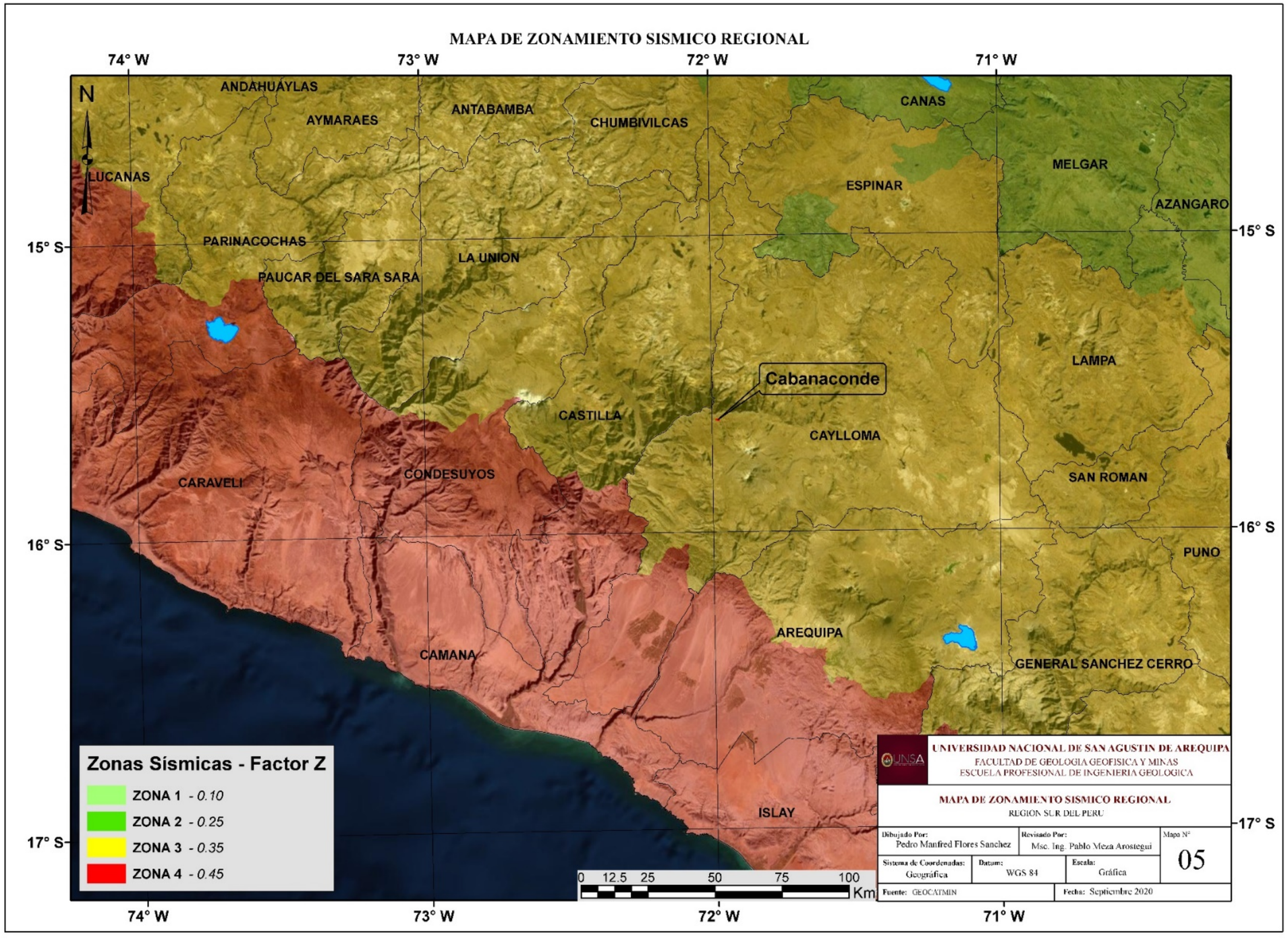


Figura 20. Mapa de Zonamiento Sísmico Regional
Adaptado de "Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente" por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). Recuperado de https://busquedas.elperuano.pe/download/url/anexo-de-rm-n-355-2018-vivienda-mediante-la-cual-se-modi-anexo-rm-n355-2018-vivienda-1720685-1

consideración en áreas relativamente pequeñas, por ejemplo: los sismos del Alto Mayo (San Martín) del 30 de mayo de 1990 (6.0ML) y 5 de abril de 1991 (6.5ML); asimismo, el sismo del 12 de abril de 1998 (5.2ML) con epicentro a 13 km en dirección NE de la localidad de Huambo. En general, los efectos producidos por estos eventos consideran daños mayores en viviendas de adobe y piedra, además de deslizamientos de piedras y tierra en zonas de pendiente alta.

2.17.4.2. Sismos con foco intermedio ($60 < h \leq 300$ km)

Estos sismos se distribuyen de manera irregular, Tavera y Buforn (1998) definen tres zonas. La primera de distribuye paralela a la línea de costa por debajo de 9° S y se caracteriza por la frecuente presencia de terremotos de magnitud elevada. La segunda zona de sismos se localiza en el interior del continente (zona Norte y Centro) a lo largo de la Cordillera Oriental y zona Subandina, estos terremotos siguen una línea N-S y raramente producen daños. La tercera zona y de mayor importancia se localiza en la región Sur del Perú, siendo la región de mayor índice de sismicidad del país. Las dos primeras zonas alcanzan profundidades del orden de 100-120 km; mientras que para la tercera zona la profundidad puede llegar hasta los 300 km.

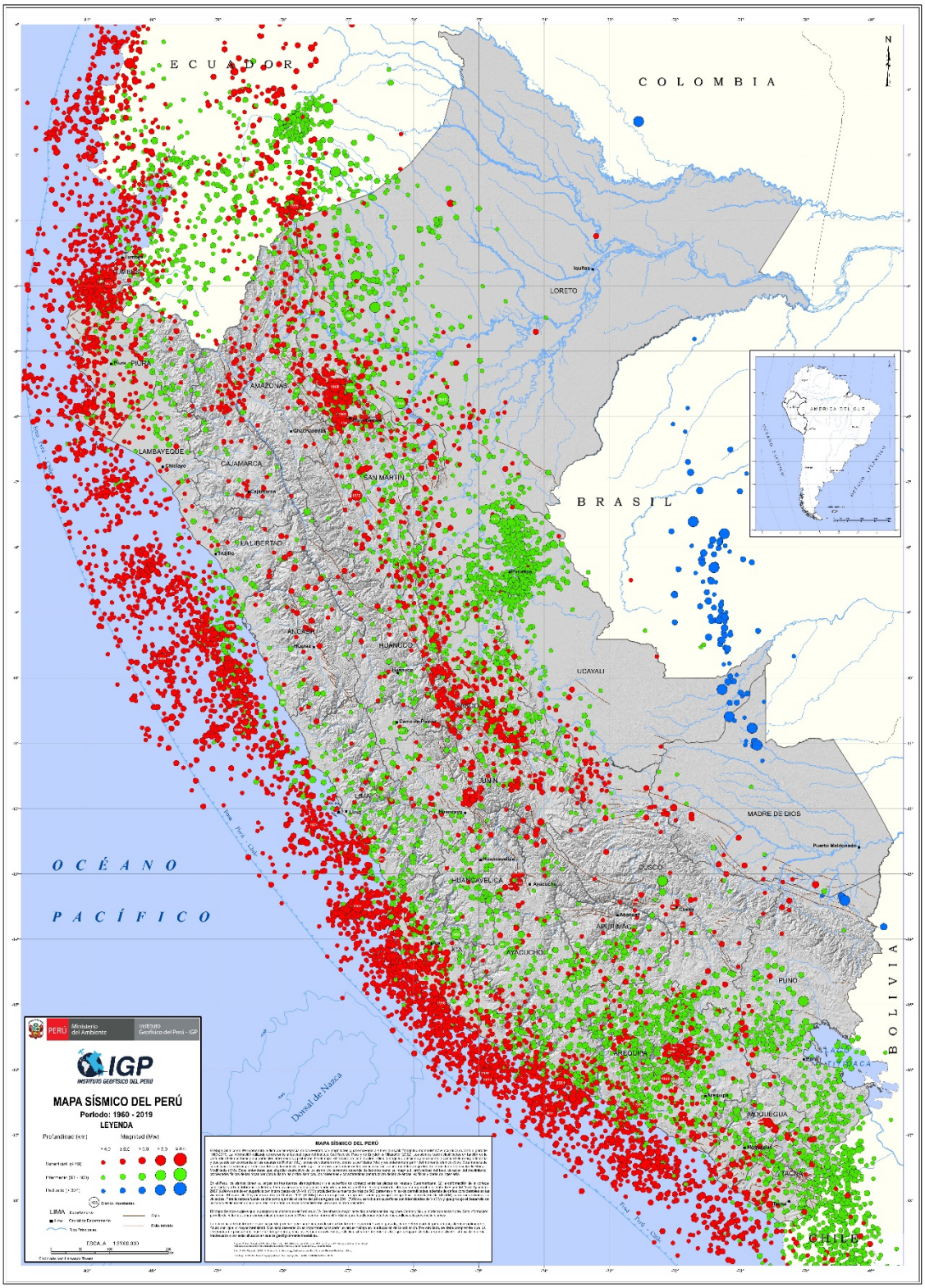


Figura 21. Mapa Sísmico del Perú: Periodo (1960-2019)
Tomado de *Mapa Sísmico del Perú: Periodo 1960-2019* (p. 1), por Tavera H., 2020. Recuperado de http://scts.igp.gob.pe/unidad-sismologia/mapa-sismico

2.17.4.3. Sismos con foco profundo (h > 300 km)

Estos sismos se localizan en la región Centro y sur del llano Amazónico, siendo la mayor actividad en la región central (6° S – 11° S) y se alinea en dirección N-S cubriendo un área aproximada de 500 km de longitud (borde Perú-Brasil) mientras que en la región Sur es menos numeroso y más dispersa (borde Perú-Bolivia) según Tavera y Buforn (1998).

2.17.5. Procesos geológicos detonados por sismos

Los sismos además de sus efectos destructivos también vienen a ser detonantes naturales de fenómenos cosísmicos o postsísmicos como movimientos en masa, licuefacción de suelos, actividad volcánica y tsunamis, que en la mayoría de casos generan pérdidas humanas y económicas, así como cambios en la morfología.

2.17.5.1. Fenómenos de remoción en masa

Los eventos sísmicos pueden genera diferentes tipos de procesos de remoción en masa entre los que destacan los deslizamientos, los desprendimientos de roca y suelo (derrumbes), las extensiones o desplazamientos laterales de suelos por falta de confinamiento lateral (Ver Fig. 22), entre otros.

Keefer (1984) señala, con relación a la magnitud del sismo, que las caídas y los deslizamientos de rocas son detonados con magnitudes locales de 4.0 ML y las avalanchas con magnitudes locales de 6.0 ML. En función de la intensidad sísmica, otros autores concluyen que la intensidad mínima para generar caíd de rocas es VI; para deslizamientos, desplazamientos laterales y flujos es VII; la intensidad más baja para cualquier movimiento en masa es una intensidad de IV. Por tanto, la magnitud e intensidad son los parámetros más usados en estas relaciones, algunos factores considerados para el análisis de susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa son: condiciones de estabilidad del terreno previas al sismo, pendientes elevadas, suelos de baja resistencia o de estructura metaestable (suelos expansibles, colapsables, entre otros), condiciones hidrológicas, meteorización, erosión, entre

otros. El efecto de las lluvias posteriores a un movimiento sísmico, influye de manera activa en la ocurrencia e intensidad de los deslizamientos debido al debilitamiento cosísmico del material de sustrato.

Benavente et al. (2017) concluyen que el efecto de los terremotos en la generación de deslizamientos posteriores se da influenciado por lluvia, pero existe una incertidumbre en la proporción, ya que es difícil separar el impacto de un terremoto y la precipitación pues actúan al mismo tiempo y posterior al evento, también se debe tener en cuenta el tipo de litología, el nivel freático, el grado de fracturamiento y tener la aceleración máxima de la roca y/o suelo (PGA) y así el impacto del terremoto puede variar con el tiempo.

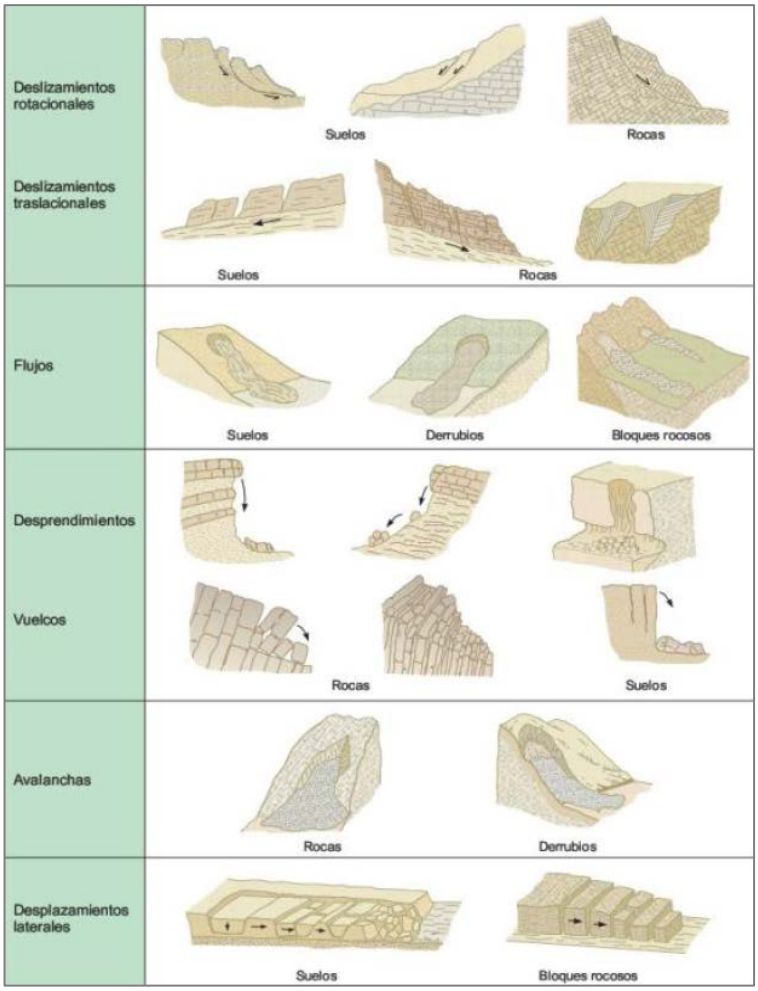


Figura 22. Clasificación general de fenómenos de remoción en masa Tomado de Ingeniería Geológica (p. 624) por Gonzales de Vallejo et al., 2002, Madrid, España: Prentice Hall.

2.18. Análisis Remoto

El análisis remoto en geociencias se refiere a las actividades de grabación, observación y percepción de objetos o eventos que se dan lugar en lugares lejanos por medio de sensores que no están en contacto directo con los objetos o eventos que se observan. Weng (2010) describe el análisis con sensores remotos como la ciencia o tecnología de adquirir información acerca de la superficie de la tierra ya sea superficie terrestre, océanos o la atmosfera utilizando sensores a bordo en el aire (aviones o globos aerostáticos) o en el espacio (satélites y transbordadores espaciales).

Dependiendo del fin, en análisis remoto puede subdividirse en: sensores remotos satelitales (plataformas satelitales), fotografía y fotogrametría (las fotografías captan la luz visible), sensores remotos termales (porción termal infrarroja del espectro electromagnético), sensores remotos con radares (longitudes de onda microondas), y análisis remoto LiDAR que se refiere a pulsos laser que se trasmiten al suelo.

2.18.1. Procesos del análisis remoto

El proceso de análisis remoto implica la interacción entre una radiación incidente con los objetos de interés y su posterior procesamiento y análisis. En este proceso intervienen siete elementos, cada uno desempeña un papel en la calidad y precisión de las imágenes satelitales y modelos de elevación digital obtenidas en el proceso.

El proceso de análisis remoto inicia en el momento que se emite la energía en forma de radiación La energía que viaja de la fuente hacia los objetos de interés es variable en intensidad, además que interacciona con las partículas y gases, principalmente el ozono, dióxido de carbono y partículas de agua, que se encuentran en la atmosfera terrestre. Este efecto lo producen los mecanismos de dispersión (desviación de la radiación) y la absorción (absorción de la radiación), una vez la energía sobrepasa la atmosfera y llega al objetivo las características de la interacción de los objetos y la radiación dependerá de las propiedades físicas y químicas

del objeto y de la radiación, una vez que la radiación es dispersada por el objeto el sensor remoto procede a recolectar la radiación por medio de los instrumentos que se encuentran en el satélite. La energía que fue recolectada por el sensor es transmitida, usualmente de forma electrónica a una estación de procesamiento ubicada en la superficie terrestre donde la información será procesada en una imagen satelital.

La imagen que se obtiene del procesamiento de la información es interpretada, visualmente, digitalmente o electrónicamente y se le extrae la información necesaria en el estudio para la cual fue requerida. El elemento final y el objetivo del análisis remoto se da al momento de extraer la información necesaria y con ella ayudar a revelar nueva información, tomar decisiones para resolver un problema en particular o proponer teorías que inicien el proceso resolución de estos objetivos. El análisis remoto es utilizado en todo el mundo con aplicaciones multidisciplinarias, en el campo de la geología es utilizado en geodesia, exploración y explotación de recursos naturales, geodinámica, gestión de riesgos de desastres, entre otros.

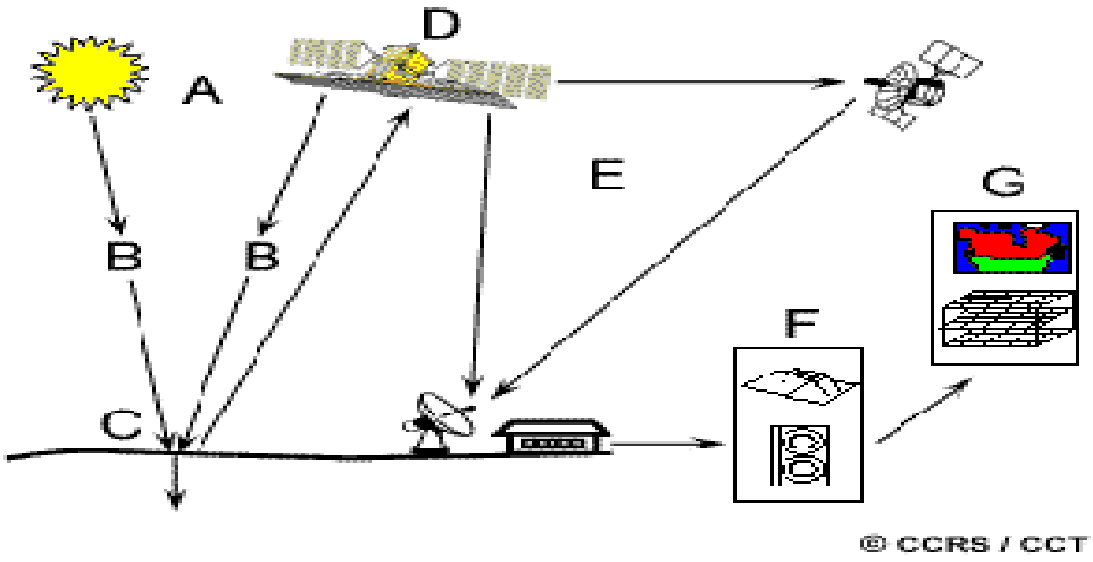


Figura 23. Elementos del análisis remoto
A. Fuente de energía. B. Atmosfera. C. Interacción con la superficie. D. Recolección de energía por el sensor. E. Transmisión y recepción de la información. F. Procesamiento. G. Interpretación y análisis. Tomado de *Fundamentals of remote sensing* (p. 16), por Canada Centre for Remote Sensing, 2013. Recuperado de https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/remote-sensing-tutorials/download/9333

2.18.2. Imágenes satelitales

Una imagen es la representación gráfica de la información capturada por un sensor equipado en un satélite artificial. Las imágenes satelitales proveen información de gran importancia para muchas disciplinas científicas y técnicas. Existe una gran variedad de servicios de imágenes satelitales y cada uno posee sus propias características y son utilizados para diferentes propósitos, para el monitoreo climático el satélite GOES (Geostationary Operational Enviromental Satellite) es utilizado, así como el satélite NOAA AVHRR y DSMP (Defense Meteorological Satellite Program). Para el análisis en la superficie terrestre los satélites de mayor uso son LANDSAT, SPOT, IRS, MEIS II and CASI, IKONOS, SAR, entre otros.

Para el presente estudio utilizamos el análisis remoto para la elaboración de los mapas temáticos utilizando las imágenes satelitales provenientes del satélite espacial LANDSAT 8 y modelos de elevación provenientes del satélite espacial ALOS-PALSAR.

Las imágenes satelitales poseen características que difieren dependiendo del tipo de satélite que las captura, algunas de las características más relevantes de las imágenes satelitales se describen a continuación.

2.18.2.1. Resolución espacial

La resolución espacial se define como el tamaño del elemento más pequeño posible que puede ser detectado por el sensor. Las imágenes satelitales están compuestas por una matriz de elementos llamados pixeles, las cuales son las unidades más pequeñas en la imagen, son de forma cuadrada y cada uno representa un área de la imagen. La resolución espacial y los pixeles no son lo mismo. Si bien es cierto que si un sensor posee una resolución espacial de 30 metros y la imagen se presenta con su máxima resolución cada pixel representara un área de 30m x 30 m sin embargo es posible representar una imagen con un tamaño de pixel diferente que la resolución espacial.

2.18.2.2. Resolución espectral

La resolución espectral se refiere a la capacidad de un sensor para definir intervalos de las longitudes de onda los cuales son llamados bandas o canales. Mientras más preciso sea el sensor los rangos de las longitudes de ondas serán más estrechos y por ende tendrán más bandas. Los sensores multiespectrales son capaces de capturar gran número de longitudes de onda a través de la luz visible, ultravioleta, el infrarrojo cercano – medio, ondas de radio, microondas.

2.18.2.3. Resolución temporal

La resolución temporal se define como el tiempo requerido para que un determinado satélite complete un ciclo orbital completo. En la mayoría de satélites esto toma varios días para volver a tomar imágenes en la misma área. La resolución temporal de un sensor depende en una variedad de factores como las capacidades de los satélites o sensores, las latitudes entre otros.

2.18.3. LANDSAT 8

El programa LANDSAT es el satélite con más trayectoria en el mercado, el 23 de Julio de 1972 se lanzó el primer satélite llamado “Earth Resources Technology Satellite” después renombrado como LANDSAT. A partir del primero se han lanzado en total 8 satélites, cada uno con mejoras y actualizaciones en los sensores en comparación al anterior.

Landsat 8 es el último satélite lanzado por el programa LANDSAT en el año 2013, originalmente llamado “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) en colaboración de la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

El satélite Landsat 8 tienen la capacidad de recolectar información de diferentes bandas o canales espectrales que no solo cubren el espectro visible de la radiación electromagnética sino varias partes del espectro infrarrojo con particular interés en identificar y diferenciar la superficie de la tierra. La misión LANDSAT 8 presenta avances tecnológicos muy relevantes

frente a su predecesor, con la adición de las bandas TIR-1, TIR-2, Cirrus y Coastal/Aerosol y la mejora técnica de los instrumentos utilizados en el sensor (Ver Fig. 24).

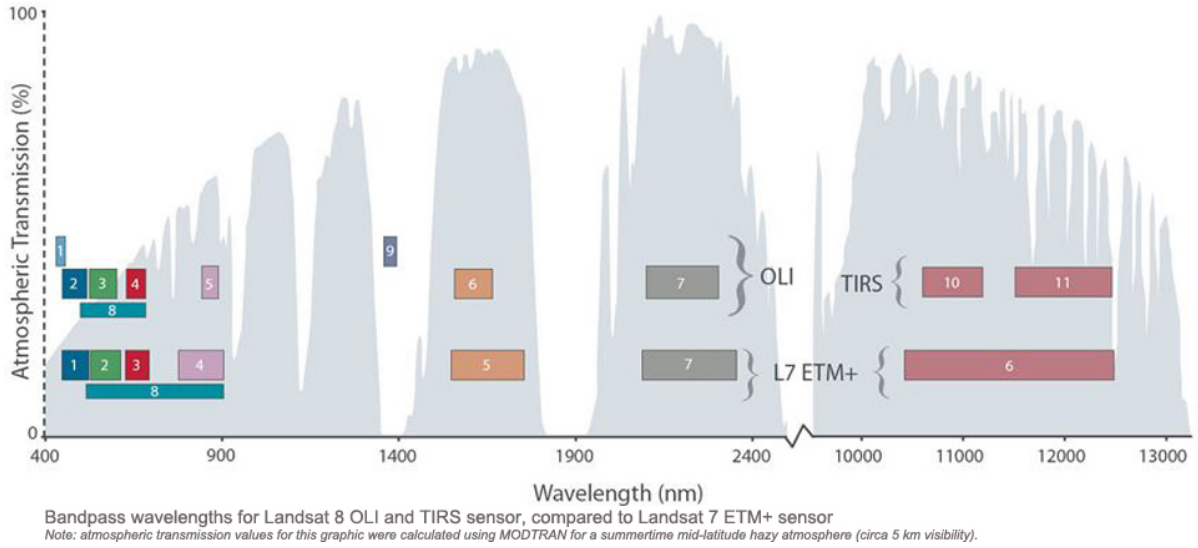


Figura 24. Comparación de las bandas espectrales LANDSAT 7 y LANDSAT 8. Tomado de "Landsat Science" por National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2013 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/)

Cada banda espectral posee sus propias características y son utilizadas para usos multidisciplinarios (Ver Tabla 6). En el presente estudio de riesgos geológicos debido a la actividad sísmica en la localidad de Cabanaconde, se utilizó data provista por el USGS proveniente del satélite LANDSAT 8 a fin de aumentar la precisión de los mapas provistos por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en la sección 3.6 se detalla el proceso de análisis, procesamiento y utilidad de la data en este proyecto.

Tabla 6

Bandas espectrales LANDSAT 8

Banda Espectral	Longitud de Onda (µm)	Resolución Espectral (m)	Uso Común
Banda 1 - Coastal Aerosol	0.43 - 0.45	30	Estudios costeros
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30	Batimetría, distinción entre el suelo y la vegetación
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30	Estudios de Vegetación
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30	Distinción de la vegetación de las pendientes
Banda 5 - Infrarrojo (NIR)	0.85 - 0.88	30	Enfatiza el contenido de biomasa y las orillas
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30	Distinción el contenido de humedad del suelo y vegetación.
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30	Distinción el contenido de humedad del suelo y vegetación.
Banda 8 - Pancromática	0.5 - 0.68	15	Definición de imagen más precisa
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30	Detección mejorada de la contaminación de las nubes cirrus
Banda 10 - TIRS 1	10.6 - 11.19	100	Mapeo termal y humedad del suelo estimada
Banda 11 - TIRS 2	11.5 - 12.51	100	Mapeo termal y humedad del suelo estimada

Nota. Adaptado de "Landsat Science" por National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2013 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/)

2.18.4. Modelos de Elevación Digital

Se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bidimensional. Los MDE poseen datos vectoriales o raster. En los datos vectoriales se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la red de triángulos irregulares (TIN) en el segundo paquete se encuentran las matrices de celdas regulares y columnas equidistantes.

Los MDE difieren en sus características como la resolución espacial (unidad de medida mínima que se utiliza para registrar datos), la exactitud del MDE está sujeta a dos fuentes de error, la fuente aleatoria que se refiere a la estimación inexacta de los valores reales de elevación como resultado del azar y la sistemática que tiene un patrón determinado.

Existen varias fuentes de modelos de elevación digital, comerciales y gratuitas, entre las más importantes se encuentran: ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite), STRM (Shuttle Radar Topography Mission), entre otros. En la realización de este proyecto se utilizó un MDE proveniente del satélite ALOS PALSAR, el procesamiento y análisis de esta data se detalla sección 3.7.

3. MATERIALES DE ESTUDIO

3.1. Delimitación del Área de Estudio

El distrito de Cabanaconde pertenece a la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, el poblado de Cabanaconde se encuentra ubicado en la margen derecha del Rio Colca, en las coordenadas geográficas 15º 37' 17' S 71º, 58' 47" W, se ubica a una altura de 3 296 m.s.n.m. posee una población de 2096 habitantes, según el censo del año 2017, realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática.

El presente proyecto de investigación toma como área de estudio el poblado de Cabanaconde y sus alrededores, área que cubre 7.540 km^2 aproximadamente (Ver Fig. 25).

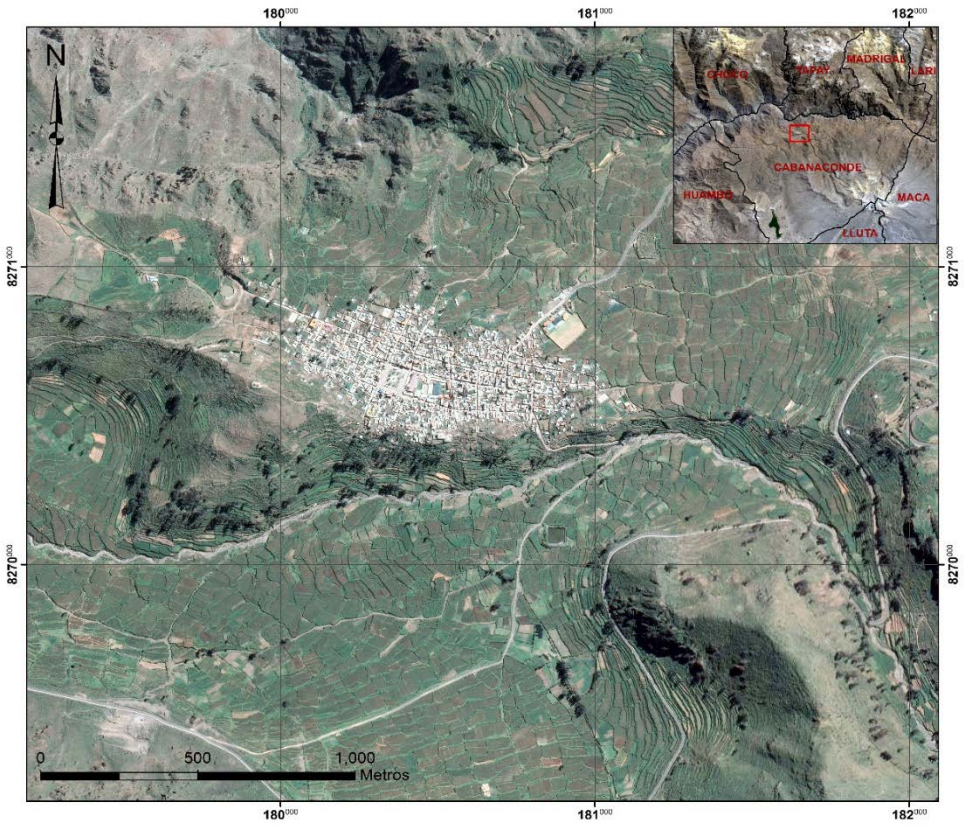


Figura 25. Imagen satelital de la zona de interés
Tomado de Imagen Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 ID: LC08_L1TP_004071_20190815_ 20190820 _01_T1 por U.S Geological Survey (USGS), 2019. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

3.2. Fisiografía

La fisiografía del distrito de Cabanaconde es controlada por una variedad de procesos propios de la geodinámica interna y geodinámica externa, la caracterización del ámbito fisiográfico incluye el análisis de subdisciplinas como: topografía, hidrografía, humedad, climatología, formaciones ecológicas, unidades de cobertura vegetal, uso de suelos.

El distrito de Cabanaconde se ubica en la Cordillera Occidental, en el margen izquierdo del rio Colca, generalmente el territorio que comprende el Valle del Colca, presenta características fisiográficas abruptas y disectadas, quebradas y ríos que originan paisajes escabrosos, valles profundos y cañones. A continuación, se describirá algunas características fisiográficas de la zona de estudio, en la localidad de Cabanaconde y alrededores, a fin de crear un modelo fisiográfico que son de importancia en el análisis de peligrosidad y riesgo geológico detonado por la actividad sísmica.

3.2.1. Pendiente

Una pendiente de define como un declive del terreno y a su inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente. La Autoridad Nacional del Agua (2015) propone intervalos de pendiente representativos, que son asociados de manera general a unidades geomorfológicas (Ver Tabla 7).

Tabla 7

Intervalos de Pendientes

Intervalo	Pendiente	Geoformas asociadas
0°-10°	Pendiente llana	Terrazas, abanicos aluviales, planicies costaneras, fondos de valles glaciares.
10°-25°	Pendiente suave	Colinas, lomadas mesetas.
25°-35°	Pendiente moderada	Vertientes, laderas de Cordillera.
35°-50°	Pendiente fuerte	Laderas escarpadas y valles tributarios.
>45°	Pendiente muy fuerte	Escarpas y tramos de valles encañonadas.

Nota. Adaptado de *"Evaluación de Recursos Hídricos de la cuenca Camaná-Majes-Colca"* (p. 42) por Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2015. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12543/7

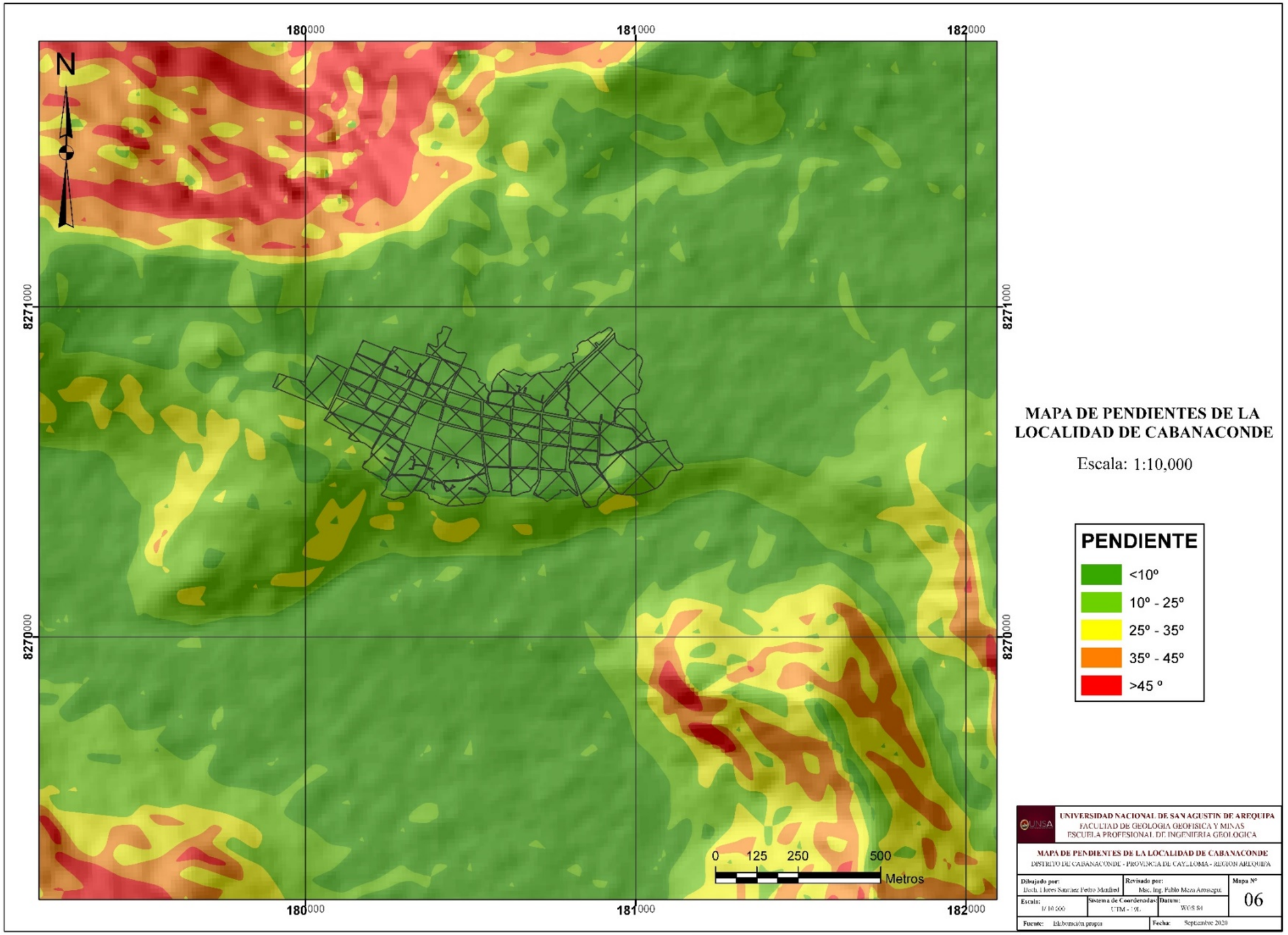


Figura 26. Mapa de pendientes de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

Para la creación del modelo de pendientes de la localidad de Cabanaconde se requiere el procesamiento los modelos de elevación digital (MDE). El método de procesamiento y análisis se encuentra detallado en la sección 3.7.

3.2.2. Uso actual del suelo

Según la clasificación propuesta por ONERN (1973), los suelos predominantes en el territorio que comprende el Valle del Colca son los Leptosoles. En el área de la localidad de Cabanaconde predomina el Leptosol lítico – Afloramiento lítico (LPq-R) caracterizado por ocurrir en las estribaciones de la vertiente occidental de la cadena montañosa andina. Los usos actuales de estos suelos en el área que comprende la localidad de Cabanaconde y alrededores se asocian principalmente a la actividad agrícola, en menor medida también a zonas urbanas o de actividad humana y praderas o matorrales (Ver Tabla 8).

Tabla 8

Uso actual del suelo en la localidad de Cabanaconde

Zona	Km^2
Zona agrícola	5.140
Zona de praderas	1.823
Zona urbana	0.577
Total	7.540

Nota. Elaboración propia

3.2.1. Cobertura Vegetal

En la localidad de Cabanaconde y alrededores, el uso predominante de tierra es destinado para la actividad agrícola, la cual consta en la producción de alfalfa, avena, cebada, maíz, papa, tuna, entre otras frutas y verduras, el área que no es utilizada para fines agrícolas consta de áreas inaccesibles debido a la topografía y generalmente está cubierta por cardonales, matorrales y arbustos, finalmente también áre as urbanas (Ver Tabla 9).

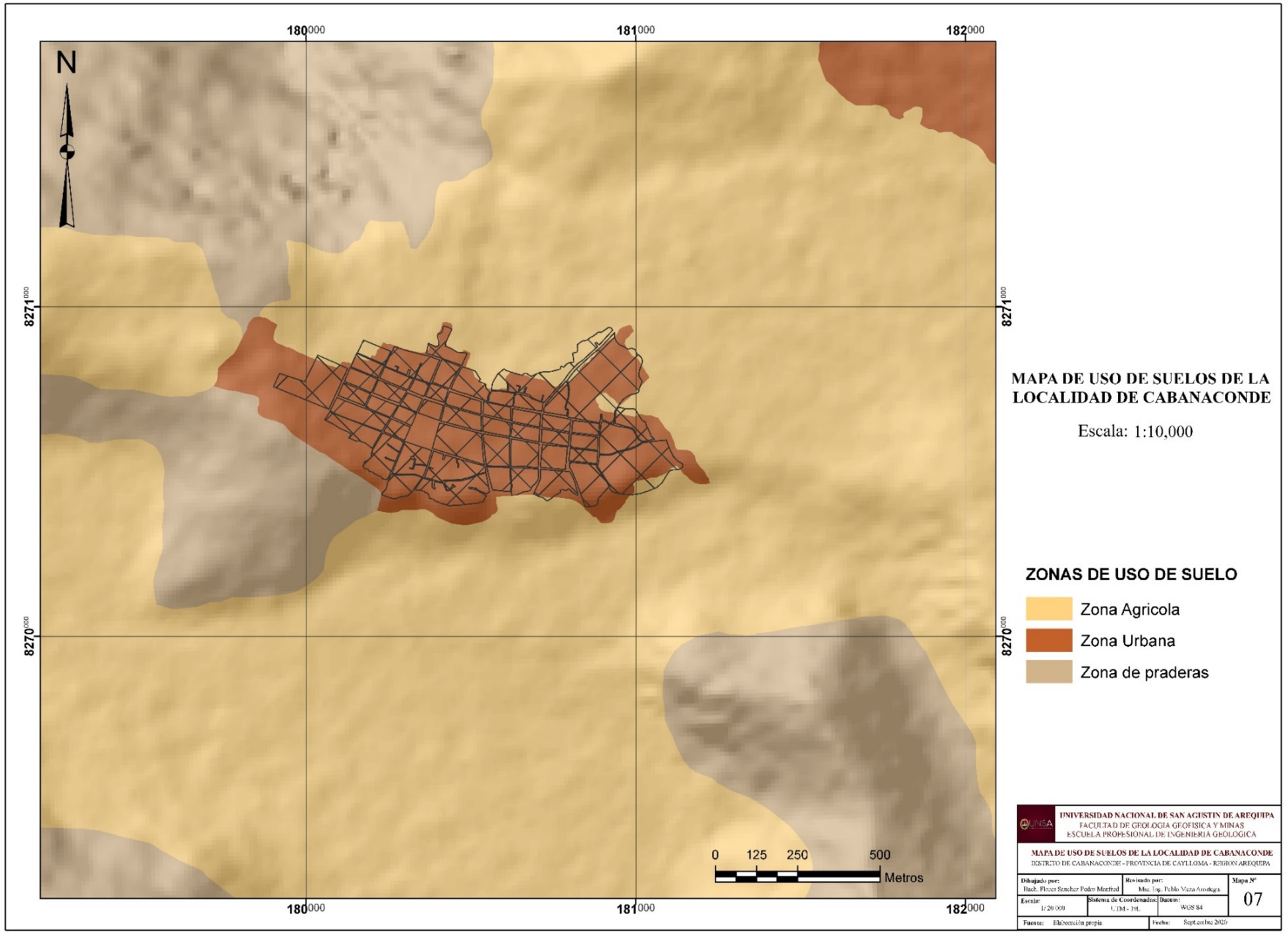


Figura 27. Mapa de Uso de Suelos de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Cobertura vegetal en la localidad de Cabanaconde

Vegetación	Km^2
Cardonal	0.451
Cultivo Agrícola	4.954
Matorral Arbustivo	1.500
Zona Urbana	0.632
Total	7.540

Nota. Elaboración propia

Figura 28. Uso de suelos y cobertura vegetal
Vista panorámica de la localidad de Cabanaconde, se aprecia la zona urbana, el área de cultivo agrícola y hacia el fondo el área de matorrales.
Fuente: Elaboración propia

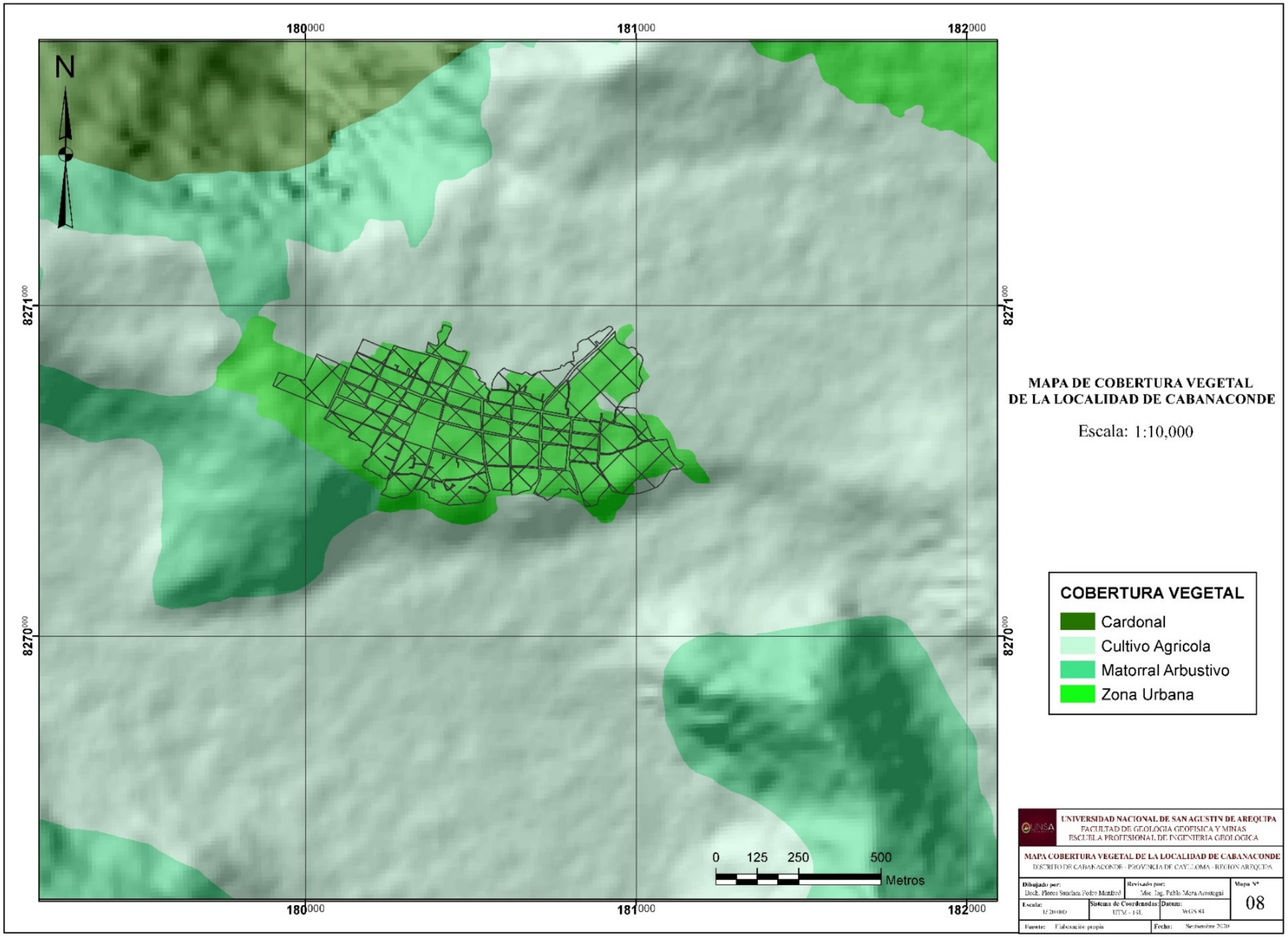


Figura 29. Mapa de Cobertura Vegetal de localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

3.3. Geomorfología Local

En la localidad de Cabanaconde y en sus aledañas, las unidades geomorfológicas presentes están principalmente relacionadas genéticamente al vulcanismo del complejo volcánico Ampato, asociado al proceso de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana.

Alcalá, Palacios y Zamorano (2016) consideran que el complejo volcánico Ampato se compone de los productos volcánicos producidos por tres grandes estratovolcanes andesíticos alineados N-S. Hualca Hualca (6025 m.s.n.m.), Sabancaya (5980 m.s.n.m.) y Ampato (6288 m.s.n.m.). La actividad volcánica y subsiguiente proceso de erosión y meteorización ha permitido la generación de hasta 35 geoformas, distribuidas en un área aproximada de 930 km^2.

Alcalá et al. (2016) propone la clasificación de las geoformas del complejo volcánico Ampato en dos tipos de relieves: volcánico (relacionado a la actividad volcánica) y exógeno (relacionado a procesos de erosión, meteorización y acumulación). A su vez las geoformas pueden subdividirse en base a procesos específicos de génesis y procesos exógenos, a continuación, se describe, clasifica y se esquematiza las geoformas que ocurren en la zona de interés, finalmente se delimita las unidades en un mapa geomorfológico (ver Figura 33).

3.3.1. Relieves Volcánicos

La intensa actividad volcánica que tuvo lugar en el Complejo Volcánico Ampato, ha desarrollado una variedad de geoformas relacionadas con el vulcanismo, que incluyen volcanes compuestos, estratovolcanes, conos de lava, conos de ceniza, domos de lava, cráteres, chimeneas y flujos de lava de diferentes episodios volcánicos. En la zona de estudio ocurren geoformas volcánicas denudacionales, geoformas que han sido parcialmente remodeladas por procesos exógenos que incluyen procesos de erosión, meteorización y acumulación.

3.3.1.1. Flujos de lava erosionados por glaciares

Se trata de los flujos de lava ubicados al norte del estratovolcán Hualca Hualca, poseen una topografía moderada a abrupta, Alcalá et al. (2016) describe estos relieves como superficies pulidas y estriadas que sugieren intensa erosión glacial o aparecen parcialmente destruidos.

3.3.1.2. Conos de lava erosionados por glaciares

Se trata de estructuras monogénicas con perfiles altos y fuertes pendientes (>25°), se presentan en el flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca. Estas geoformas han sido modeladas parcialmente por procesos exógenos, especialmente intensa erosión glacial, aparecen parcialmente destruidos.

Figura 30. Relieve volcánico denudacional
Vista al este de la localidad de Cabanaconde. Se aprecia los conos volcánicos erosionados, caracterizados por los perfiles altos y pendientes fuertes, al fondo de observa los flujos de lava también erosionados, caracterizado por una topografía abrupta. Fuente: Propia

3.3.2. Relieves Exógenos

El relieve exógeno del área de estudio comprende geoformas resultantes del desmantelamiento y destrucción del relieve volcánico estructural producido por la dinámica acción de procesos externos (químicos o físicos), que incluyen el intemperismo, erosión, denudación, sedimentación y esencialmente fracturamiento mecánico, que es descrito por Alcalá et al. 2016:

El fracturamiento mecánico en el área de estudio es producida por las intensas fluctuaciones de temperatura mientras la alteración química se relaciona a la influencia hidrotermal, particularmente intensa en el estratovolcán Hualca Hualca, donde un manto grueso de rocas volcánicas fue intemperizado. La erosión, denudación y sedimentación se llevaron a cabo fundamentalmente por glaciares, sistemas fluviales, oscilaciones de temperatura y movimientos en masa. (Alcalá et al., 2016, p. 4).

3.3.2.1. Geoformas glaciares

Al flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca se observa la intensa acción de los glaciares que se traducen en vertientes empinadas. En la zona de estudio se desarrollaron pendientes erosionadas que fueron afectadas intensamente por procesos de abrasión y sobreexcavación.

3.3.2.2. Geoformas fluviales

Las altas pendientes y el intenso levantamiento tectónico generaron sistemas de fallas que facilitaron la incisión fluvial. Como resultado se desarrolló un cañón profundo con paredes escarpadas en territorio de flujos piroclásticos y flujos de lava.

Figura 31. Pared de cañón
Vista del norte de la localidad de Cabanaconde, se observa la pared de Cañón del Colca. Fuente: Propia.

3.3.2.3. Geoformas aluviolacustres

Al noreste del estratovolcán Hualca Hualca, se identificaron depósitos aluviolacustres asociados al “Paleolago Colca”, se compone de una alternancia de materiales aluviales, proluviales y lacustres acumulados, presenta una pendiente suave en la zona de estudio.

Figura 32. Vertientes aluviolacustres
Vista al sur de la localidad de Cabanaconde, se observa las vertientes aluviolacustres caracterizadas por una pendiente suave y es utilizada generalmente para el cultivo agrícola. Al fondo se observan las vertientes de origen volcánico que fueron afectadas intensamente por procesos de abrasión y sobreexcavación. Fuente: Propia.

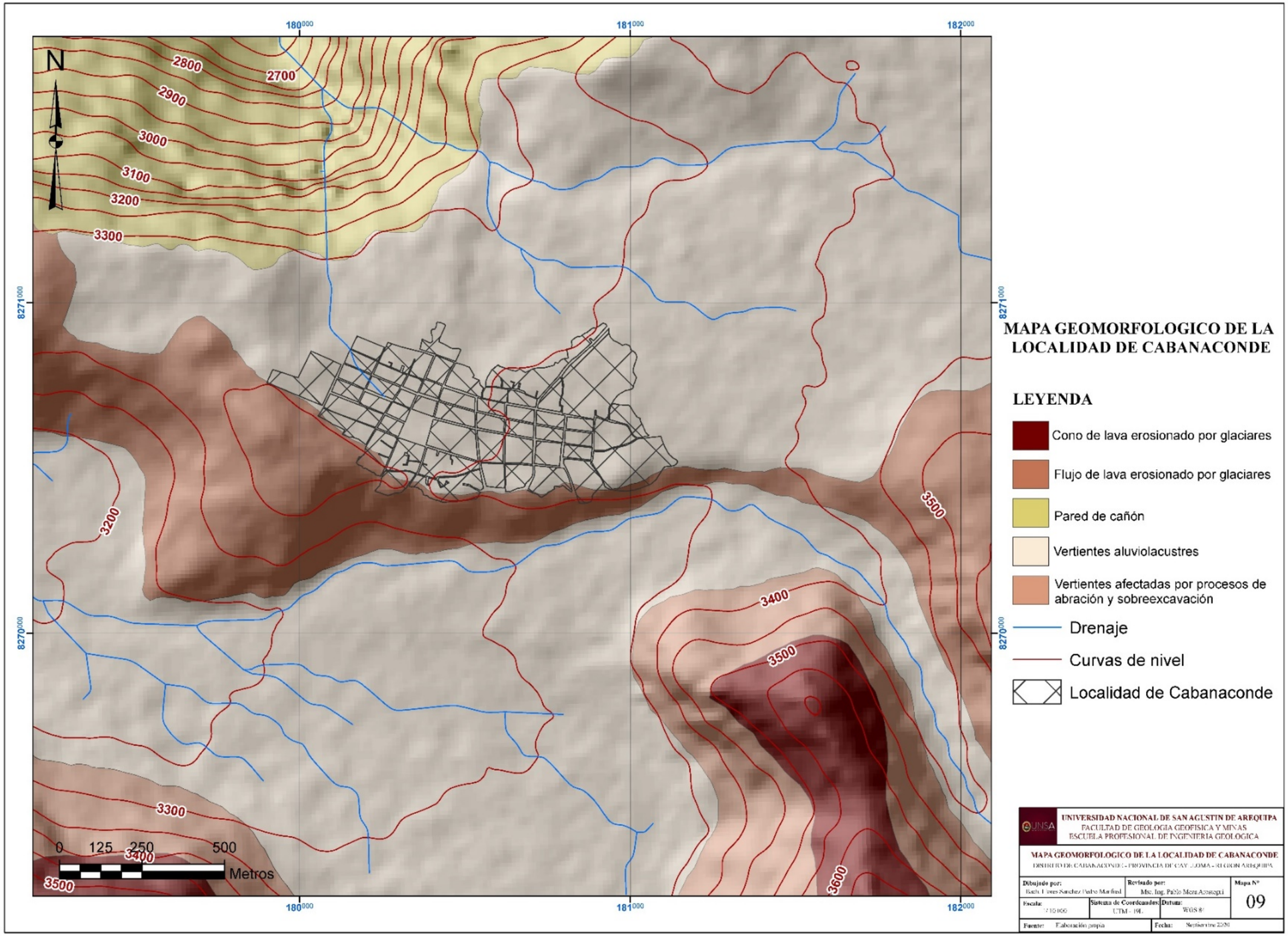


Figura 33. Mapa Geomorfológico de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

3.4. Geología Local

En la localidad de Cabanaconde y en sus zonas aledañas afloran secuencias volcánicas de paredes muy abruptas que corresponden a secuencias de edad Paleógeno – Neógeno, que ocurren como flujos de lava andesíticas y traquiandesíticas del Complejo Hualca Hualca del Pleistoceno. Las lavas andesíticas del primer episodio del Hualca Hualca descienden hasta cerca del cañón haciendo un recodo importante y cubren discordantemente a secuencias de la Formacion Puente (Jurásico-Cretácico), que forma parte del substrato en el fondo del cañón. Estructuralmente, las lavas están dispuestas en forma horizontal a subhorizontal, donde destacan niveles con estructuras columnares observables en las paredes del cañón, que alcanzan hasta 1000 metros desde el fondo del cañón, y que descienden bruscamente desde superficies planonduladas hasta depresiones en las partes superiores formando mesetas volcánicas.

3.4.1. Depósitos del Complejo Volcánico Hualca Hualca

En la zona estudio aflora la unidad correspondiente al segundo evento (Qpl-hh/an1), consiste de flujos de andesita intercalados con tobas cristalolíticas, ambos forman la base del complejo volcánico, se extienden hacia el este y oeste, cubriendo a los depósitos del Tacaza indiviso. El quinto evento (Qpl-hh/ da), consiste de domos y flujos dacíticos posteriores, el emplazamiento de este domo originó el colapso del flanco norte del complejo, por lo que se emplazaron depósitos de avalanchas de escombros hacia el río Colca y hacia Cabanaconde, estos depósitos conforman el sexto evento (Qpl-hh/dae) que taponaron las aguas del río, creando un represamiento aguas arriba con posterior sedimentación de depósitos lacustrinos de Madrigal y Maca.

Figura 34. Depósitos del Complejo Volcánico Hualca Hualca
Flujos de andesitas rosáceas pertenecientes al segundo evento (Qpl-hh/an1), afloran en la carretera Cabanaconde – Huambo. Fuente: Propia.

3.4.2. Grupo Andahua (Qpl-an_s)

En la localidad de Cabanaconde el Grupo Andahua se halla compuesto únicamente por coladas volcánicas afaníticas a porfiríticas de composición andesítica a andesita basáltica, presentando coloraciones gris oscuras y negras. También se pueden encontrar escorias formando conos volcánicos. A pesar de presentar una litología monótona; en base a sus características morfológicas y al grado de meteorización se divide en dos subunidades: inferior y superior que juntos alcanzan hasta 200 m de grosor aproximadamente.

3.4.3. Depósitos Aluviales (Qpl-al)

Corresponden a los mayores depósitos del Cuaternario y se distribuyen en toda la zona de estudio. Están constituidos por gravas y bloques subangulosos a subredondeados envueltos en una matriz limoarenosa que se encuentran formando terrazas aluviales a lo largo de los valles.

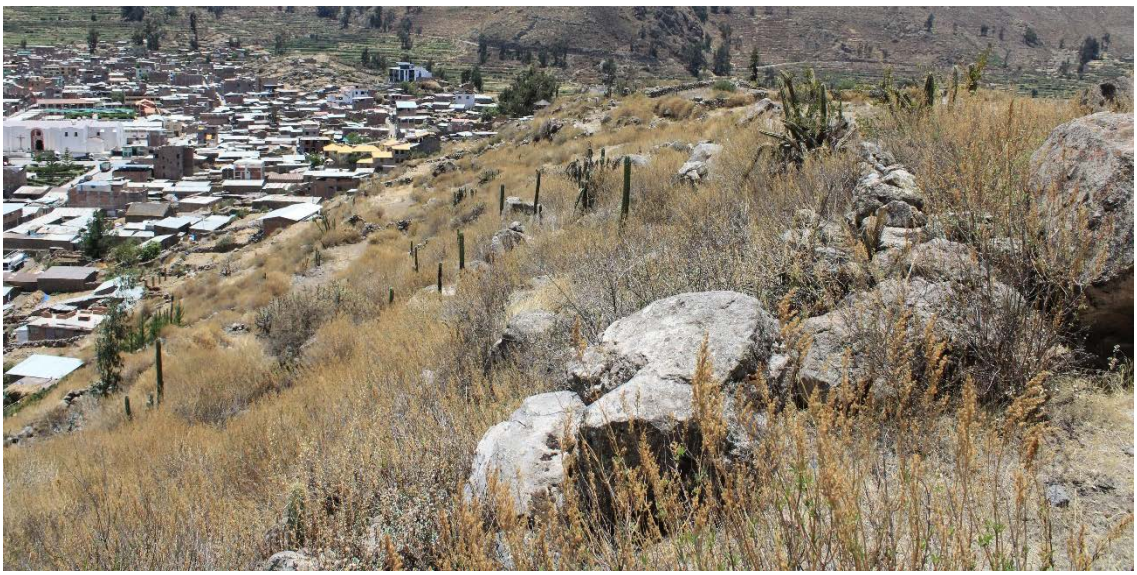


Figura 35. Coladas de lava del Grupo Andahua
Afloran alrededor de la localidad de Cabanaconde en forma de flujos lávicos erosionados. Fuente: Propia

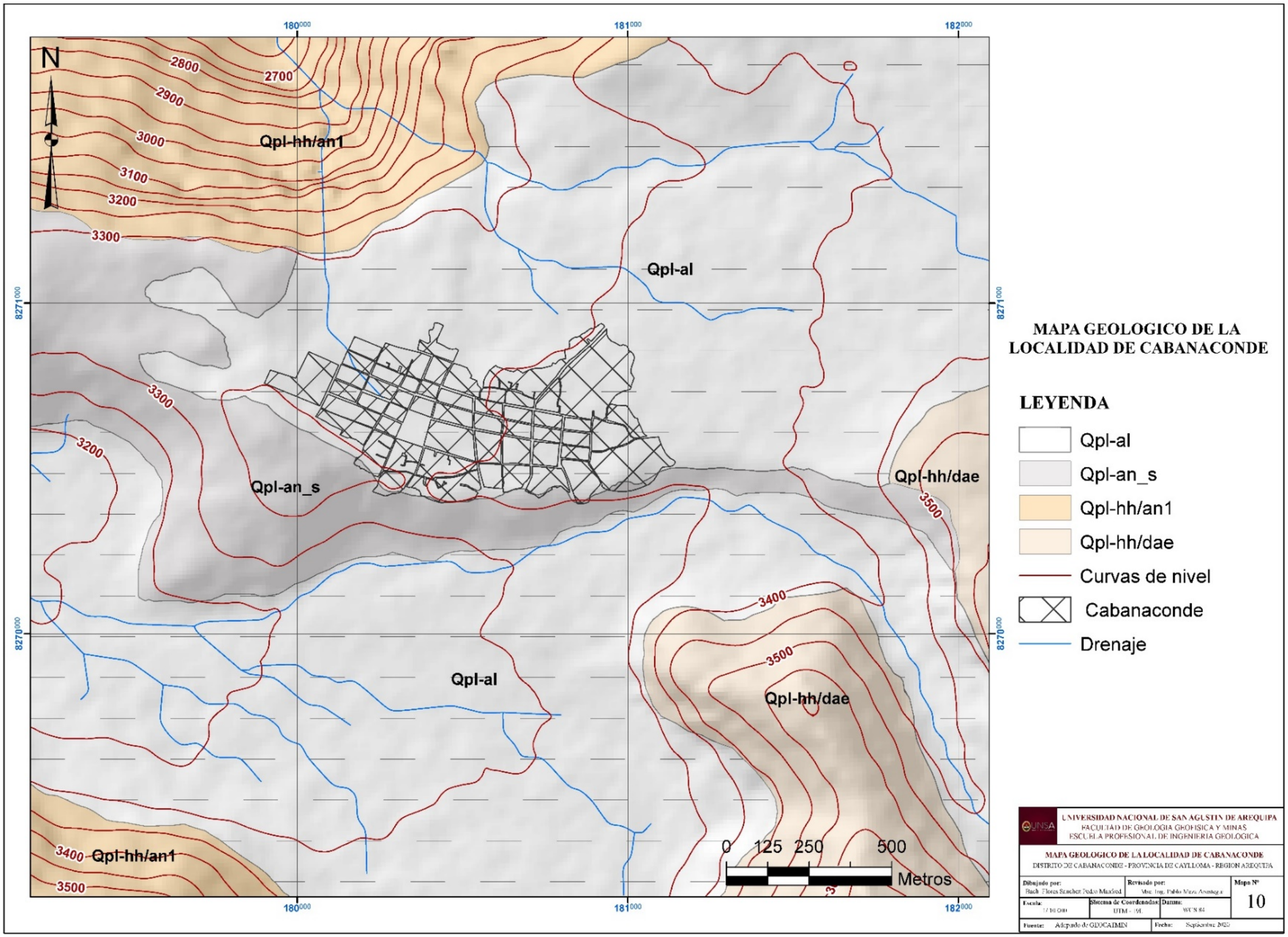


Figura 36. Mapa Geológico de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

3.5. Neotectónica

El Valle de la Colca se localiza en una zona tectónicamente activa, Benavente, Carlotto y Del Castillo (2010) describen un control estructural NO-SE en el arco volcánico Cuaternario a lo largo de aproximadamente 300 km, corredor estructural conformado por fallas normales, principalmente con buzamientos opuestos que cortan depósitos volcánicos cuaternarios, depósitos fluvioglaciares y aluviales. El estudio de la reactivación de las fallas activas le concierne a la neotectónica.

Stewart y Hancock (1994) definen a la neotectónica como el estudio de los procesos y estructuras tectónicas que se han propagado o reactivado dentro del campo de esfuerzos-deformación que están aún activos en la actualidad. Se considera una estructura o un proceso activo cuando han actuado dentro del periodo histórico y se espera que actúen en el futuro sin que exista prueba de que vayan a terminar.

Benavente et al. (2017) realizó una actualización del mapa geotectónico de Valle del Colca, añadiendo al registro, 14 nuevas fallas activas. Entre las fallas de mayor importancia se encuentran las fallas Trigal y Solarpampa, ubicadas en las alturas del Cañón del Colca entre las localidades de Huambo y Cabanaconde, Sébrier, Mercier, Mégard, Laubacher y Carey-Gailhardis (1985) describen estas estructuras como fallas constituidas por segmentos que se extienden a lo largo de 30 kilómetros, con orientaciones E-O y cortan depósitos volcánicos y fluvioglaciares, son fallas tectónicamente activas y en épocas recientes han sido generadoras de sismos (Ver Figura 37). A continuación, se describe las estructuras de mayor importancia.

3.5.1. Falla Solarpampa-Puye Puye-Pillo

La Falla Solarpampa se emplaza en la meseta volcánica de la margen derecha del rio Colca a 4800 m.s.n.m., desde Chingane hasta Cabanaconde. Benavente et al. (2017) proponen que la Falla Solarpampa, se prolonga a lo largo de más de 100 kilómetros en segmentos, formando escarpes en su trayectoria que afecta a los depósitos del vulcanismo cuaternario

(Holoceno) así como a depósitos aluviales recientes. Los escarpes tienen una altura que varía entre los 20 y 40 metros, lo que originó una perturbación del drenaje y la formación de lagunas de colapso a lo largo de la traza de la falla.

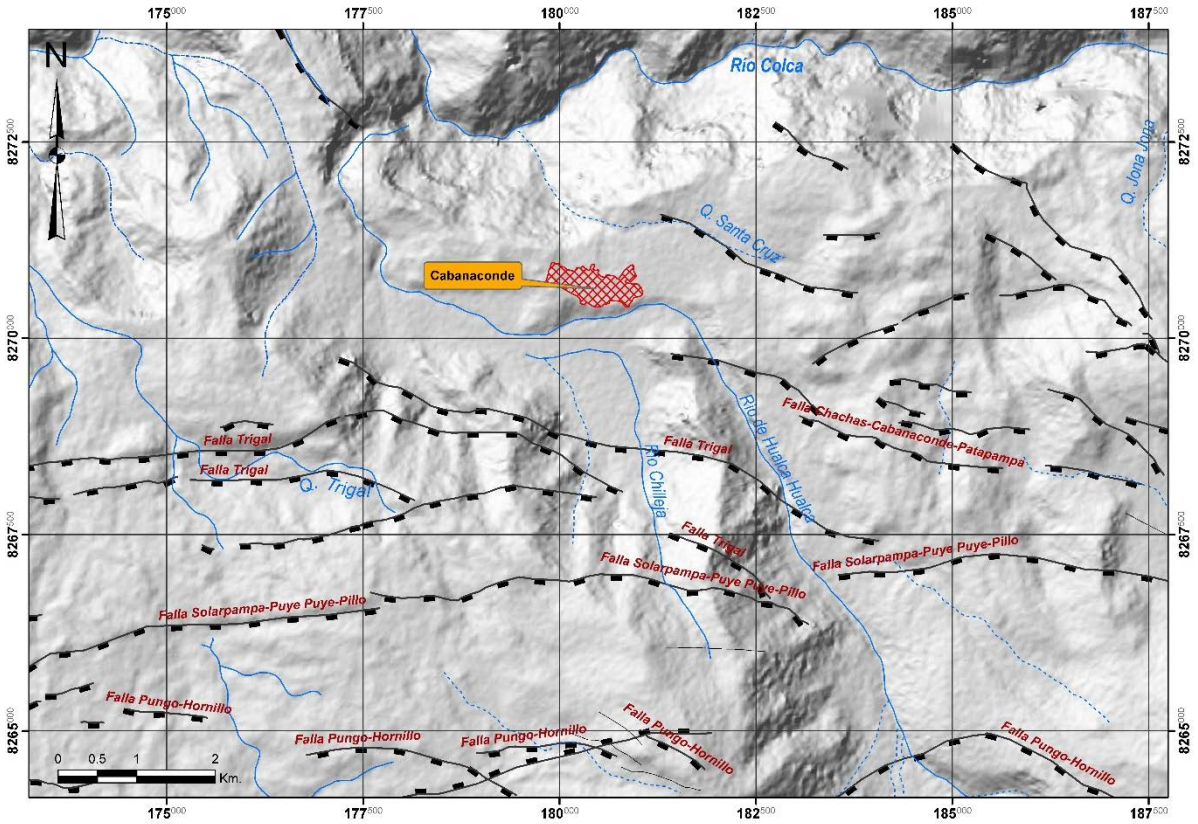


Figura 37. Fallas activas en el Valle del Colca – sector Cabanaconde
La imagen muestra las fallas activas pertenecientes al sistema de Fallas Solarpampa – Puye Puye – Pillo, Trigal, Pungo – Hornillo. Adaptado de "Falla Neotectónica" por Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (GEOCATMIN), 2020. Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

El poblado de Cabanaconde fue afectado en 1998 por dos sismos superficiales (5 km) de 5.5 Mb de magnitud. Antayhua, Tavera, Bernal, Palza y Aguilar (2002) estudiaron estos sismos y concluyeron que los mecanismos focales sugieren fallas de tipo normal, con planos nodales orientados en dirección este-oeste buzando ambos con ángulos de aproximadamente 45º y eje de tensión norte-sur.

La localidad de Cabanaconde y en general el territorio que comprende el Valle del Colca, es afectado por recurrente actividad sísmica, la reactivación de la falla Solarpampa se evidencio en los últimos años con el sismo de Huambo en el año 2013 y el sismo de

Cabanaconde el año 2015. Tavera et al. (2013) y Tavera et al. (2015) concluyen que estos sismos tuvieron origen en la traza de la falla Solarpampa, falla que pertenece al sistema de fallas Huambo-Cabanaconde.

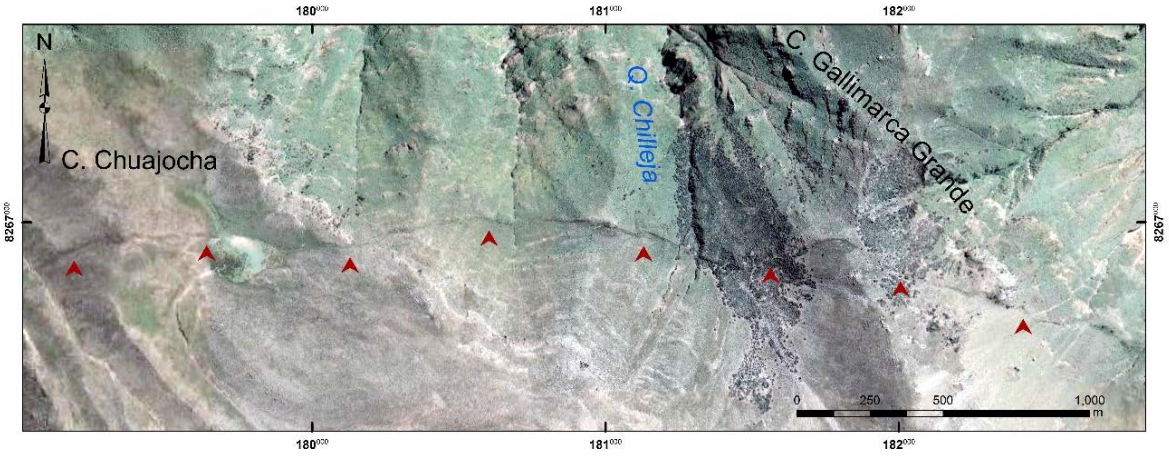


Figura 38. Escarpe del sistema de fallas Solarpampa – Puye Puye - Pillo
Escarpe de falla ubicado entre la localidad de Cabanaconde y el volcán Sabancaya, se señala el escarpe en dirección E-W. Adaptado de Imagen CNES/Airbus por Google, 2020. Recuperado de https://www.google.com/intl/es/earth/versions/

3.5.2. Falla Trigal

Cruza el pampa Trigal con rumbo E-O y buzamiento de 65°S, con longitudes de 12 y 10 km, y hacia el SO de Cabanaconde varían entre 1 a 5 km. Presenta un escarpe de falla con longitud de 20 km y con un desnivel de 50 m, afecta al vulcanismo más reciente (Holoceno). Los análisis estructurales realizados en la quebrada Trigal por Sébrier et al. (1985) demuestran que los movimientos son muy recientes y de tipo normal, con una tectónica en extensión cercana a N-S, la actividad de la falla generó depresiones y a su vez represamientos de río que formaron charcas de colapso por falla (sagpond).

Benavente et al. (2017) realizaron trabajos de paleosismología concluyendo que las rocas volcánicas de tipo andesitas se encuentran cortadas por fallas verticales a subverticales de tipo sinestral, cinemáticamente, en la trinchera se puede observar una historia amplia de la falla, tiene movimientos inversos, normales y de rumbo, en las depresiones se sedimentaron depósitos finos en los cuales se observan estructuras sedimentarias de deformación, tales como

slumps, sismitas y laminaciones convolutas, volcanes de lodo, colapsos y diques, que son resultado de la actividad sísmica de la falla.

3.6. Procesamiento y análisis de imágenes LANDSAT 8 con Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Burgos (2014) define un Sistema de Información Geográfica (SIG) como una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada. Los SIG son herramientas fundamentales al momento de interpretar los datos provenientes de la teledetección, ambos trabajan en conjunto para el modelamiento y análisis de la superficie terrestre. En el presente proyecto de investigación se utilizó imágenes provenientes del satélite Landsat 8, imagen que abarca gran parte de la región Arequipa, incluyendo el Cañón del Colca donde se realizó el presente estudio, con el fin de contribuir con el análisis fisiográfico, geológico, geotectónico y de riesgos geológicos (Ver Figura 39).

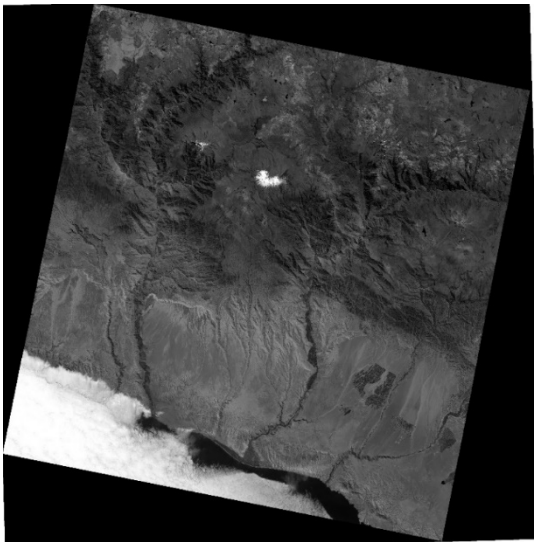


Figura 39. Imagen satelital del área de estudio
Imagen proveniente de la misión LANDSAT 8 con código "C08_L1TP_004071_20190815_20190820_01_T1" perteneciente al Path: 4 y Row: 71. Recuperado de "Landsat Collection 1 Level-1" por USGS, 2019. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

3.6.1. Preprocesamiento

3.6.1.1. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es un proceso usado para tratar los valores de píxel perdidos o distorsionados de una imagen satelital para obtener valores de intensidad homogéneos a partir de equilibrar histogramas o corregir imperfecciones presentes en los píxeles. Entre los diversos motivos que influyen en estas distorsiones de las imágenes satélite encontramos fallos de los propios sensores, alteraciones en el movimiento del sensor o instrumento a bordo del satélite/avioneta o la interferencia de la atmósfera.

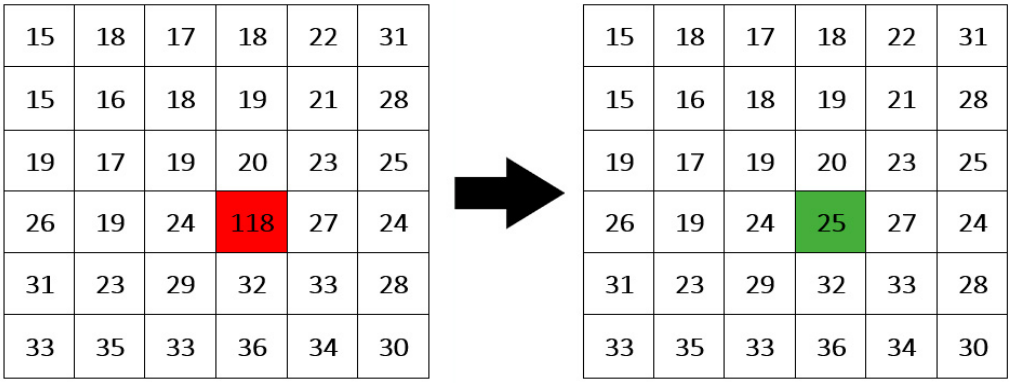


Figura 40. Corrección radiométrica
Principio básico de la corrección radiométrica Fuente: Elaboración propia

3.6.1.2. Corrección atmosférica

La radiación electromagnética interacciona con la atmosfera de manera que la información obtenida por los observatorios espaciales es afectada por los fenómenos de dispersión y absorción de la atmosfera, la corrección atmosférica en base a metodologías muy variadas, reduce el efecto de estos efectos en la reflectancia (propiedades de la superficie), un método utilizado en la corrección atmosférica es la sustracción de objetos oscuros. Adicionalmente existen otras correcciones que pueden ser necesarias como el cambio de tamaño de la data o la reducción de ruido.

3.6.2. Procesamiento y análisis

3.6.2.1. Composición de bandas espectrales

La diferencia en los niveles de energía dentro de una sola banda puede no estar claro, por esta razón la comparación de las características espectrales en múltiples bandas brida un mejor contraste entre las diferentes superficies. Además de la gran variedad de herramientas que los sistemas de información geográfica proveen para el análisis remoto, una herramienta fundamental es la que permite la composición de las bandas espectrales. Una composición satelital consiste entre bandas diferentes del sensor, dispuestas cada una en los tres canales de proyección en pantalla: Rojo (R), Verde (G) y Azul (B), el producto resultante son imágenes a color (Ver Imagen 45).

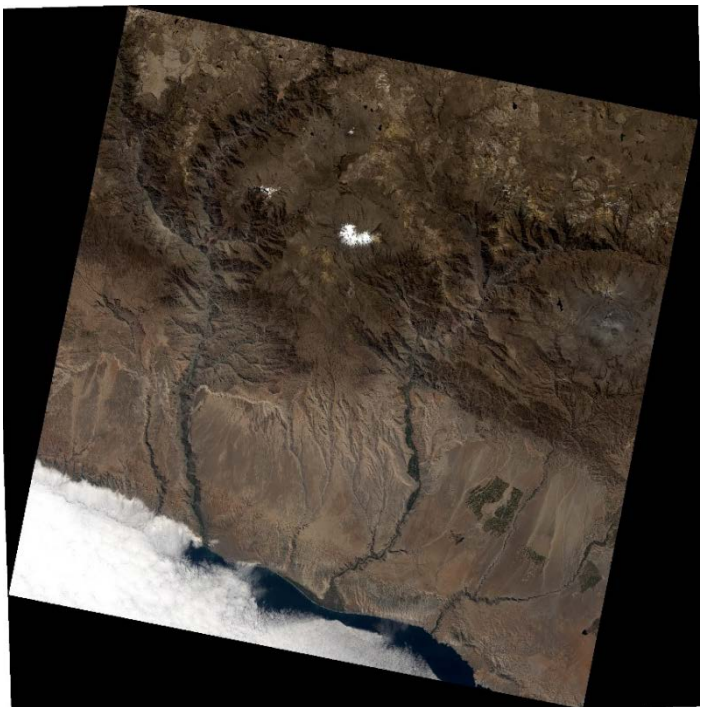


Figura 41.Imagen satelital en color natural
Imagen Landsat 8 “LC08_L1TP_004071_20190815
_20190820_01_T1” en composición de color RGB: 432
Adaptado de “Landsat Collection 1 Level-1” por USGS,
2019. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

Çorumluoğlu Ö, Vural A. y Asri, İ. (2013) afirman que el objetivo de esta herramienta es combinar la información multiespectral con las regiones de longitudes de onda visibles, a

fin de que puedan ser vistas en el ojo humano. Cada objeto en la naturaleza tiene una reflectancia única en diferentes longitudes de onda, los SIG exhiben las longitudes de onda visibles imitando el ojo humano. Algunas composiciones comunes utilizadas en imágenes LANDSAT 8 se describen en la Tabla 10.

Tabla 10

Composiciones comunes de bandas espectrales

Composición RGB	Aplicaciones comunes
431	Batimetría (permite diferenciar cuerpos de agua)
432	Color natural (combinación que se aproxima al color real de la superficie a la vista humana)
543	Infrarrojo, esta combinación es útil para estudios de vegetación, patrones de suelos, crecimiento de cultivos y monitoreo de drenajes. La vegetación saludable aparece en un color rojo brillante
562	Distinción de vegetación saludable
564	Diferenciación de tierra/agua para destacar áreas boscosas
652	Agricultura
654	Análisis de vegetación
742	Geología (elementos geológicos)
753	Color natural con remoción atmosférica
754	Combinación de infrarrojos
764	Permite destacar formaciones rocosas
765	Es útil para estudios geológicos, así como para análisis de humedad en suelos

Nota. Elaboración propia

3.6.2.2. Clasificación de imágenes

Las técnicas de clasificación de imágenes permiten la transformación de datos de teledetección en datos que reflejan datos de temáticas específicos (cobertura vegetal, agricultura, entre otros). Las técnicas de clasificación de imágenes pueden dividirse en dos métodos clásicos: clasificación supervisada y clasificación no supervisada.

3.6.2.3. Realce espectral

Otra herramienta en el procesamiento de imágenes satelitales con el objetivo del análisis geológico, en diferentes áreas de estudio, la combinación de bandas por medio de ratios a lo que de denomina realce o mejoramiento espectral. La racionalización de bandas es un método que emplea la división de una banda espectral con otra. Esta división resulta en la ratio de la reflectancia espectral medida en una banda espectral con la reflectancia de otra banda espectral. Çorumluoğlu Ö, Vural A. y Asri, İ. (2013) afirman que la racionalización de bandas está basada en el realce las diferencias espectrales que son únicas en los objetos que se mapean, esta herramienta es muy útil en la caracterización de la litología y en la exploración de yacimientos minerales. Para el estudio litológico del área de estudio se utilizó variedad de ratios, pero fueron dos (7/4, 5/1, 4/3 y 6/7, 4/2, 5/4) los cuales dieron los mejores resultados al momento de analizar el comportamiento estructural y las estructuras geológicas en las rocas volcánicas que afloran en el área de estudio.

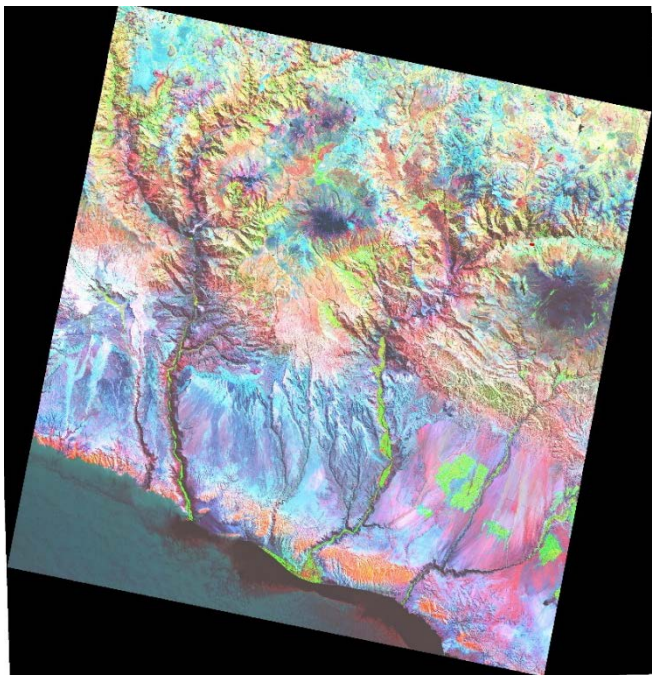


Figura 42. Imagen satelital compuesta en ratios
Imagen Landsat 8 “LC08_L1TP_004071_20190815 _20190820_01_T1” en composición de ratios RGB: (7/4, 5/1, 4/3). Adaptado de “Landsat Collection 1 Level-1” por USGS, 2019. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

3.6.2.4. Realce radiométrico

El método de realce radiométrico manipula los números digitales en las imágenes y cambian la forma en que la imagen o los datos se muestran en la pantalla del computador, muchas de estas técnicas utilizan histogramas y estadísticas de imágenes para producir los resultados previstos. Algunos métodos de realce radiométrico son: estiramiento de contraste (contrast stretching), corte de nivel/densidad, umbral y enmascaramiento de imagen, entre otros.

3.6.2.5. Realce espacial

El método de realce espacial es utilizado para aumentar la resolución espacial de la data satelital con el objetivo de obtener información más detalladas de las zonas de interés de estudio, así como para remover efectos de ruido en las imágenes, el método más utilizado para el realce espacial es el “image sharpening”.

3.6.3. Imágenes satelitales en la Gestión de Riesgos de Desastres

El uso de información remota en el ámbito científico ha cambiado la forma de estudiar el comportamiento dinámico del planeta, el uso de imágenes satelitales se ha extendido a diversidad de sectores económicos públicos y privados como en la exploración y explotación de recursos minerales y energéticos, gestión ambiental, gestión de ordenamiento territorial entre otros. La actualización periódica de datos, la variada disponibilidad y el relativo bajo costo del uso de las imágenes satelitales son algunos de los beneficios que se obtienen al momento de decidir operar un proyecto con la utilización de estos datos.

En el caso particular de la Gestión de Riesgo de Desastres, el uso de las imágenes satelitales se ha convertido en una herramienta fundamental en la realización de proyectos de esta área, en el caso peruano, donde encontramos una geodinámica externa e interna en constante evolución es necesario poseer data (a veces en tiempo real) que nos permita evaluar de forma eficiente los posibles peligros a los que están expuestos los elementos sociales,

económicos y ambientales, a fin de construir y elaborar los Planes de Gestión de Riesgos con el objetivo final de reaccionar de la mejor manera frente a un desastre natural.

El uso eficiente de las herramientas SIG de procesamiento de imágenes satelitales anteriormente mencionadas nos ayudara a obtener la mayor cantidad de información posible para el posterior análisis de riesgo en el área de estudio (Ver Figura. 43).

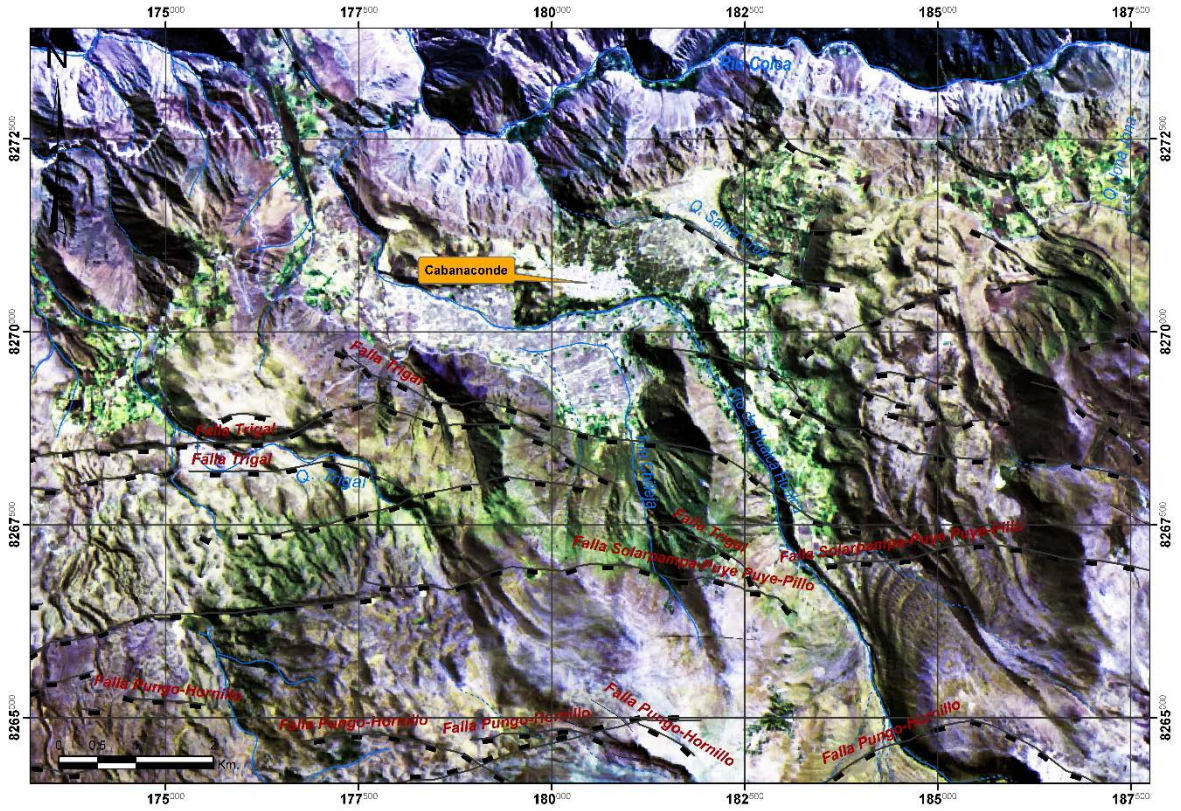


Figura 43. Imagen satelital de la margen izquierda del Rio Colca
Se muestra la imagen Landsat 8 “LC08_L1TP_004071_20190815 _20190820_01_T1” recortada en la zona de estudio. Esta imagen fue procesada mediante los métodos siguientes: corrección atmosférica, de composición de bandas RGB: 651, realce radiométrico (contrast stretching), realce espacial (image sharpening). Adaptado de “Landsat Collection 1 Level-1” por USGS, 2019. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

3.7. Procesamiento y análisis de los Modelos de Elevación Digital (MDE) con Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Felicísimo (1992) define como Modelo Digital de Elevación (MDE) a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de

la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bidimensional.

Los MDE poseen datos vectoriales o ráster. En los datos vectoriales se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la red de triángulos irregulares (TIN) en el segundo paquete se encuentran las matrices de celdas regulares y columnas equidistantes. Los MDE difieren en sus características como la resolución espacial (unidad de medida mínima que se utiliza para registrar datos), según la precisión de la resolución espacial nos es posible hacer estudios con cierto nivel de detalle en el terreno.

La exactitud del MDE está sujeta a dos fuentes de error, la aleatoria que se refiere a la estimación inexacta de los valores reales de elevación como resultado del azar y la sistemática que tiene un patrón determinado. Los MDE globales son generados constantemente por diferentes organismos como la NASA y pasan a ser de acceso público mediante en ocasiones. Fuentes comunes de MDE son STRM, ASTER, ALOS PALSAR, entre otros. En la realización de este proyecto de investigación se tomó en consideración el MDE proveniente del satélite ALOS – PALSAR.

3.7.1.1. ALOS PALSAR

El satélite ALOS fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), durante su operación (mayo 16, 2006 – abril 22, 2011), el satélite recolecto imágenes de radar en escenas de 50 km x 70 km de todo el planeta con una resolución temporal de 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic_Aperture Radar). Las imágenes poseen una resolución espacial de 12.5 m y fueron tomadas con un ángulo de incidencia de 8°. Las imágenes PALSAR están disponibles según 3 niveles de procesamiento: 1.0 (Imagen Cruda), 1.1 (Datos comprimidos) o 1.5 (Imagen expandida), disponibles en formato CEOS con una resolución radiométrica de 16 bits.

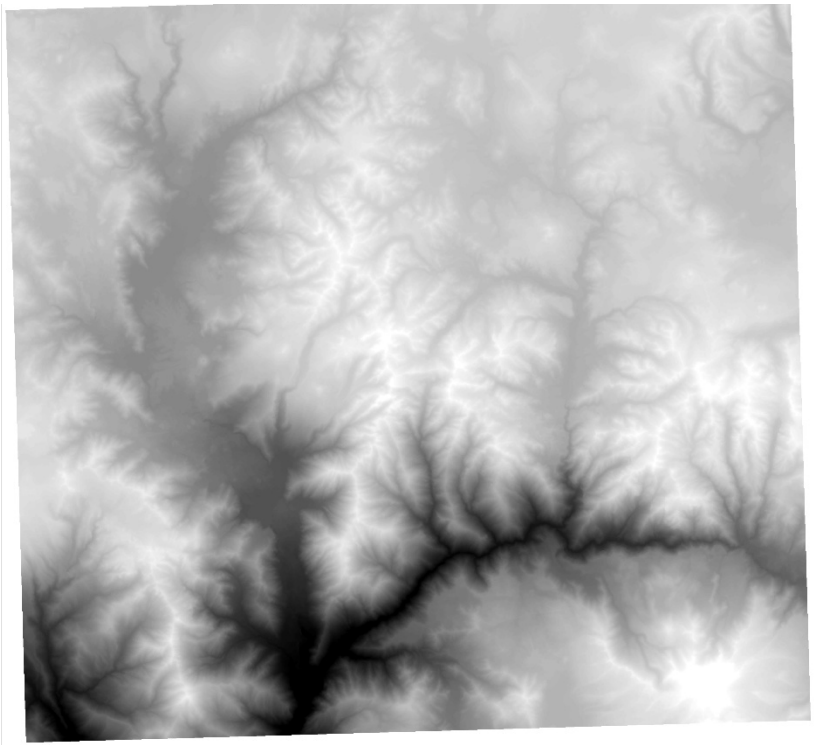


Figura 44. Modelo de elevación digital de la zona sur del Perú Modelo proveniente de la misión ALOS con código "AP_24842_FBS_F6870_RT1". Tomado de "ALOS PALSAR" por Alaska Satellite Facility, 2011. Recuperado de https://search.asf.alaska.edu/#/

Los modelos de elevación digital brindan información importante en el análisis geológico – geográfico, a partir del procesamiento de los MDE en los sistemas de información geográfica podemos obtener información específica en áreas como: topografía, hidrología, geología estructural.

Con la información proveniente del MDE "AP_24842_FBS_F6870_RT1"se realizó el análisis geológico y geomorfológico local, se extrajo las curvas de nivel, drenaje, de la localidad de Cabanaconde, además, a partir de la creación de un modelo de sombras (Ver Figura 48) se corroboro la existencia de fallas activas en el área de interés.

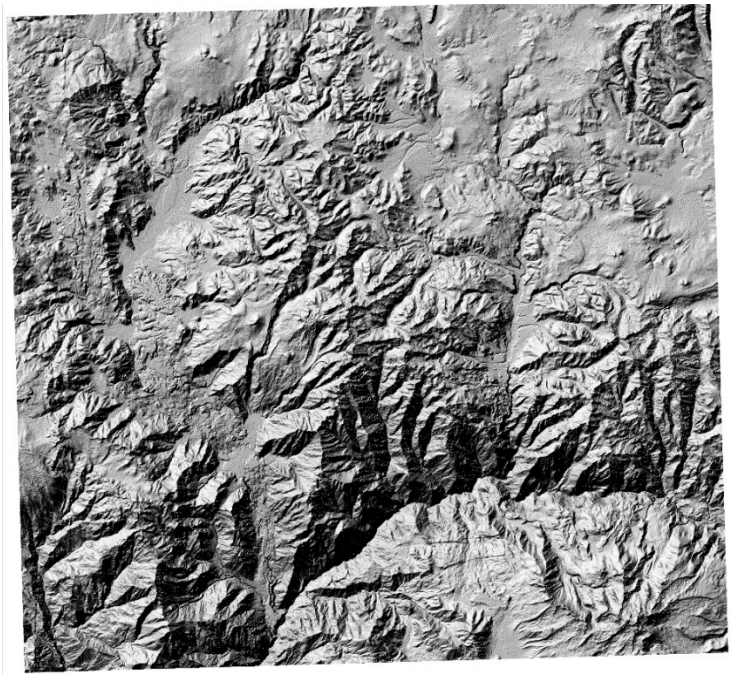


Figura 45. Modelo de sombras del sur del Perú
Modelo obtenido a través del procesamiento del MDE "AP_24842_FBS_F6870_RT1". Adaptado de "ALOS PALSAR" por Alaska Satellite Facility, 2011. Recuperado de https://search.asf.alaska.edu/#/

3.8. Modelo de Atenuación Sísmica

Las metodologías usadas en la caracterización de la amenaza sísmica se basan en el análisis estadístico de los parámetros físicos de la fuente sismogenética, a fin de generar modelos de peligrosidad o amenaza sísmica, cada modelo se basa en las características inherentes a las regiones sísmicas, que se tratan de representar, es así que se existen una variedad de modelos sísmicos aplicados a diferentes zonas alrededor del mundo.

Benavente et al. (2017) plantean una metodología aplicada a nuestra realidad basada en la caracterización de fallas activas y el cálculo de la aceleración sísmica a partir del modelo de atenuación sísmica de Abrahamson y Silva (2007).

3.8.1. Fallas activas en la zona de estudio

Benavente et al. (2017) afirman que la caracterización de una falla geológica se basa principalmente en investigaciones neotectónicas y paleosismológicas; donde lo primero a analizar es la geometría y cinemática de la falla, y su influencia en el modelado del relieve.

La caracterización de fallas activas complementa la información obtenida en el catálogo sísmico historio e instrumental, al poder comprender el comportamiento dinámico de la fuente sismogénica en base a la paleosismología, en una ventana de tiempo mayor de la que se tiene con el catálogo sísmico. Benavente et al. (2018) analizaron hasta 16 fallas con capacidad de generar sismos de gran magnitud en la región Arequipa, seis de estas cercanas a la zona de interés (Ver Tabla 11).

Tabla 11

Características de las fallas ubicadas en el área de interés

Falla	Tipo	Dirección	Longitud (km)	Buzamiento	Ruptura promedio (m)
Falla Trigal	Normal	O-E	16.539	75 S	0.45
Falla Solarpampa	Normal	O-E	21.884	75 S	0.45
Falla Madrigal	Normal	NO-SE	9.884	70 S	0.5
Falla Maca (segmento oeste)	Normal	O-E	9.234	75 S	0.8
Falla Maca (segmento este)	Normal	NO-SE	8.086	75 S	0.5
Falla Maca (segmentos este-oeste)	Normal	O-E	17.319	75 S	0.75

Nota. Adaptado de "Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa" (p. 220) por Benavente et al., 2017. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223

Otro parámetro importante en la caracterización del peligro sísmico es la magnitud máxima posible. Wells y Coppersmith (1994) obtuvieron sobre la base de un gran número de terremotos en el mundo una relación empírica entre la ruptura máxima (MD) o la ruptura promedio (AD) y la magnitud máxima posible de un sismo que una falla puede generar en una reactivación, este parámetro es importante a la hora de proponer escenarios de riesgo sísmico. A continuación, se muestran las relaciones empíricas de la longitud máxima para fallas normales, inversas y de rumbo. En esta oportunidad tomamos en cuenta los datos de la falla Trigal (con una ruptura promedio de 0.45 m) al sur de la localidad de Cabanaconde y concluimos una magnitud máxima posible de 6.55 Mw.

- Magnitud momento en función de la longitud de ruptura máxima

$$M = a + b \times \log (MD)$$

Para fallas normales: $M = 6.61 + 0.71 \times \log (MD)$

Para fallas inversas: $M = 6.52 + 0.44 \times \log (MD)$

Para fallas de rumbo $M = 6.81 + 0.78 \times \log (MD)$

- Magnitud momento en función de la longitud promedio de ruptura

$$M = a + b \times \log (AD)$$

Para fallas normales: $M = 6.78 + 0.65 \times \log (AD)$

Para fallas inversas: $M = 6.64 + 0.13 \times \log (AD)$

Para fallas de rumbo $M = 7.04 + 0.89 \times \log (AD)$

Siendo M = Magnitud máxima, MD = longitud ruptura máxima, AD = longitud de ruptura promedio.

3.8.2. Aceleración sísmica y curvas de atenuación

La aceleración sísmica es una medida que representa la velocidad a la cual las ondas sísmicas se propagan sobre un terreno, se representan a través de las curvas de atenuación que representan la relación de los efectos de un movimiento sísmico en una determinada ubicación con respecto a la magnitud del sismo, la distancia epicentral y las características físicas del lugar. El modelo de atenuación utilizado en esta investigación es el desarrollado por Abrahamson y Silva en el año 2007, los parámetros requeridos en este modelo se ajustan a la realidad de las fuentes sismogenéticas en la zona de estudio.

3.8.3. Modelo de atenuación sísmica de Abrahamson y Silva (2007)

Es un modelo empírico del movimiento del suelo para el movimiento independiente de la rotación del componente horizontal de los terremotos que se dan en la corteza superficial, fue desarrollado con datos sísmicos recolectados por el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacifico (PEER).

Este modelo es aplicable para fuentes sismogenéticas que puedan producir sismos con magnitudes momento (Mw) entre 5 y 8.5, que ocurran a una distancia epicentral menor a 200 km y periodos espectrales de entre 0 y 10 segundos. Entre los parámetros necesarios para la aplicación del modelo son las características físicas del suelo, profundidad del basamento rocoso, tipo y geometría de la falla. La ecuación principal del modelo de atenuación de formula a continuación y sus parámetros de definen en la Tabla 12.

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(PGA_{1100}, VS_{30})$$

$$+ F_{HW}\, f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, \delta, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_8(R_{rup}, M) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30})$$

Tabla 12

Definición de parámetros usados en el modelo de atenuación

Parámetro	Definición	Notas
M	Magnitud momento (Mw)	
R_{rup}	Distancia de ruptura (km)	
R_{jb}	Distancia Joyner-Boore (km)	
R_x	Distancia horizontal desde el frente de la proyección del plano de ruptura	Medido perpendicular al rumbo de la falla
Z_{TOR}	Profundidad al tope del plano de ruptura (km).	
F_{RV}	Indicador para una falla inversa.	1 para terremotos inverso/oblicuo definido por ángulo de rake de entre 30 y 150 grados, 0 para otros casos
F_{NM}	Indicador de falla normal.	1 para terremotos normales definidos por ángulo de rake entre -60 y -120 grados, 0 para otros casos
F_{AS}	Indicador para sismo de tipo réplica.	1 para replicas, 0 para sismo principal y precursores
F_{HW}	Indicador para sitio ubicado en el lado de la pared colgante de la falla.	1 para ubicaciones dentro del lado de la pared colgante, 0 para otros casos. Para dips de 90 grados F_{HW}=0
δ	Angulo de buzamiento de la falla.	
V_{S30}	Velocidad de la onda de corte sobre los 30 metros de profundidad (m/s).	
$Z_{1.0}$	Profundidad en metros de Vs=1 km/s en el sitio de cálculo.	
PGA_{1100}	Promedio de la aceleración pico (g) para VS30= 1100m/s.	
W	Longitud del ancho de ruptura (km).	

Nota. Las funciones representadas por f_1, f_4, f_5, f_6 f_7, f_8 y f_{10} y los demás parámetros usados en el modelo son definidas en el Anexo 05. Adaptado de Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations (p.75) por Abrahamson, N. & Silva, W., 2008. DOI: https://doi.org/10.1193/1.2924360

4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1. Introducción

La presente investigación se encuentra dividida en cinco fases: fase de recopilación bibliográfica, fase de gabinete, fase de estudios de campo, fase de laboratorio, fase de procesamiento e integración de datos y redacción del informe final.

4.2. Fase de Recopilación Bibliográfica

La fase de recopilación bibliográfica implica la recolección de información relevante al tema de investigación, esta información debe estar debidamente referenciada y debe de provenir de fuentes fidedignas comprobables, entre las fuentes de información disponibles tenemos:

a. Artículos científicos de publicación periódica
b. Libros de edición impresa o edición electrónica
c. Manuales, informes técnicos y de investigación
d. Disertaciones doctorales, tesis de maestría y pregrado
e. Software y conjuntos de datos
f. Instrumentos de medición
g. Información histórica (periódicos y crónicas)
h. Medios audiovisuales

4.3. Fase de Gabinete

La fase de Gabinete implica la realización de estudios preliminares, recolección de datos, reconocimiento inicial y elaboración de mapas temáticos preliminares. En la fase de gabinete se realizaron las siguientes actividades:

a. Elaboración de los marcos conceptuales de disciplinas científicas referentes al proyecto
b. Elaboración del mapa topográfico base.

c. Elaboración de mapas temáticos preliminares a escala regional, incluyendo el mapa hidrográfico, geológico, geomorfológico.
d. Análisis del inventario de peligros geológicos, provistos por entidades técnico-científicas, presentes en la zona de estudio.

4.4. Fase de Estudio de Campo

En la fase de estudio de campo, teniendo como base la información previamente analizada, se actualizo la información y se generó nuevos conocimientos en cuanto a las características de la zona de estudio, además se realizó la recolección de los datos para la realización de los ensayos, y el análisis de peligrosidad y vulnerabilidad. En la fase de estudio de campo se realizaron las siguientes actividades:

a. Reconocimiento de la zona de estudio.
b. Análisis de las zonas críticas y peligros geológicos cartografiados en la zona de estudio.
c. Cartografiado de las unidades geológicas y geomorfológicas de la zona de estudio a partir de los mapas bases elaborados en la fase de gabinete.
d. Recolección de datos de vulnerabilidad social, económica y ambiental de la localidad de Cabanaconde.

4.4. Fase de Procesamiento e Integración de Datos

En esta fase se realizó el procesamiento, depuración e integración de los datos obtenidos en las fases anteriores, se realizaron las siguientes actividades:

a. Depuración de datos obtenidos en las fases anteriores.
b. Elaboración de mapas temáticos a escala local, incluyendo el mapa hidrográfico, geológico, geomorfológico, neotectónico, pendientes, tipo de suelos, uso de suelos, cubierta vegetal.
c. Determinación y delimitación territorial de los niveles de peligrosidad.

d. Análisis de vulnerabilidad social, económica y ambiental.

e. Procesamiento de datos mediante el análisis jerárquico.

f. Integración de los mapas temáticos en los sistemas de información geográfica.

g. Determinación y delimitación territorial de los valores de riesgo.

4.5. Fase de redacción del informe final

En esta última fase se procede a sintetizar la información recopilada y obtenida en el análisis y evaluación de riesgos geológicos generados por actividad sísmica en la localidad de Cabanaconde, el informe final se genera gracias a la realización de las siguientes actividades:

a. Introducción al problema que genera la investigación

b. Desarrollo del marco conceptual

c. Desarrollo de la caracterización geológica, geotécnica, neotectónica y fisiográfica.

d. Análisis de peligrosidad y vulnerabilidad

e. Procesamiento e integración de datos

f. Análisis de riesgos

g. Análisis y discusión de resultados

5. EVALUACIÓN DEL RIESGO GEOLOGICO DEBIDO A LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA LOCALIDAD DE CABANACONDE

5.1. Introducción

En la localidad de Cabanaconde tienen lugar procesos geodinámicos que a través del tiempo han modificado y modelado sus características fisiográficas, geomorfológicas y geológicas, gran parte de estos procesos han sido ocasionados por la actividad sísmica a gran escala que causa el proceso de subducción de las placas tectónicas y a su vez la reactivación de los sistemas de fallas activas cercanas a la localidad. Para definir los posibles efectos que tiene el fenómeno sísmico en la localidad de Cabanaconde utilizaremos, el análisis de riesgos, el principio principal del análisis de riesgos es convertir las características físicas descritas cualitativamente a características expresadas en términos numéricos.

En el análisis del riesgo geológico por actividad sísmica de la localidad de Cabanaconde, se caracterizara el fenómeno sísmico, el medio físico, social, económico y ambiental de la localidad de Cabanaconde, posteriormente se asignara de manera cuantitativa niveles de peligrosidad y vulnerabilidad para finalmente definir un escenario de riesgo por actividad sísmica, describiendo los posibles daños a las dimensiones, todo esto con la finalidad de proponer medidas que contribuyan a reducir el riesgo de desastres por actividad sísmica en la localidad de Cabanaconde.

5.2. Amenaza Sísmica

El resultado del procesamiento de los datos sísmicos aplicando el modelo de atenuación sísmica de Abrahamson y Silva, es la aceleración sísmica en un punto determinado, para la creación de un mapa de amenaza sísmica es necesario el cálculo de las aceleraciones sísmicas en diferentes puntos. Para tal efecto se construyó una matriz de puntos con separación de 50 metros en el área de interés, calculando la aceleración sísmica en cada punto. En este caso particular los resultados representan la aceleración máxima horizontal del suelo (PGA),

tomando en cuenta la caracterización de aceleración sísmica que propone la Norma E.030 de diseño sismorresistente de edificios del Perú (2016) y el mapa de zonificación sísmica del Perú, Benavente et al. (2017) reclasificaron los rangos propuestos considerándolos así más apropiados para la evaluación de la amenaza sísmica. (Ver Figura 46).

Aceleración		Grado
<0.1		Muy Baja
0.1-0.25		Baja
0.25-0.35		Media
0.35-0.45		Alta
>0.45		Muy Alta

Figura 46. Grados de aceleración sísmica
Tomado de "Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa" (p. 227) por Benavente et al., 2017. Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223

A partir de esta zonificación se generó el mapa de aceleraciones sísmicas (Ver Figura 47). con ayuda de las herramientas de procesamiento en un sistema de información geográfica.

Cabe resaltar que los cálculos realizados basados en el modelo de atenuación de Abrahamson y Silva (2007), pueden optimizarse a la luz de información técnica especifica en el lugar de interés, como información geotécnica o la aplicación de métodos geofísicos en zonas específicas (microzonificación).

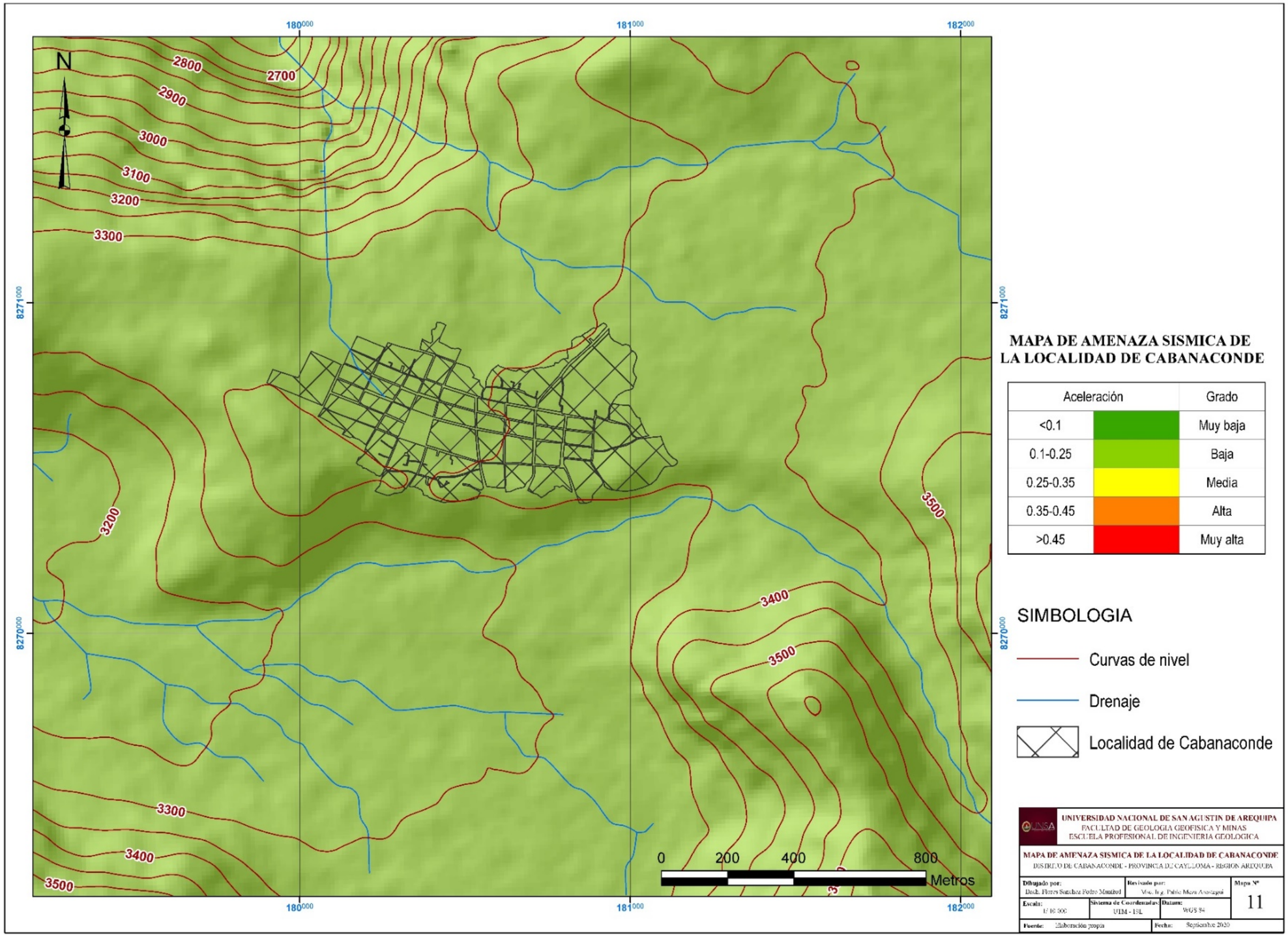


Figura 47. Mapa de Amenaza Sísmica de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

5.3. Peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos

Los sismos de intensidad moderada a alta son detonantes naturales de fenómenos cosísmicos o postsísmicos, estos fenómenos ponen en peligro las zonas afectadas por el movimiento sísmico, en este caso particular estudiaremos los movimientos en masa que puede generan la falla Trigal al ocurrir un movimiento sísmico de magnitud 6.00 Mw, estos fenómenos incluyen derrumbes, deslizamientos, desprendimientos, vuelcos entre otros. Para este análisis de peligrosidad se tomaron en cuenta dos aspectos principales, la caracterización cualitativa de los factores condicionantes y desencadenantes y su susceptibilidad a producir fenómenos de remoción en masa (ver Capitulo 3), y su relación cuantitativa por medio del proceso de análisis jerárquico (ver Anexo 01). La metodología utilizada para la caracterización de la peligrosidad de movimientos en masa detonados por sismos, se basa a la propuesta por CENEPRED (2014) para la evaluación de peligros generados por fenómenos naturales (ver Diagrama 14).

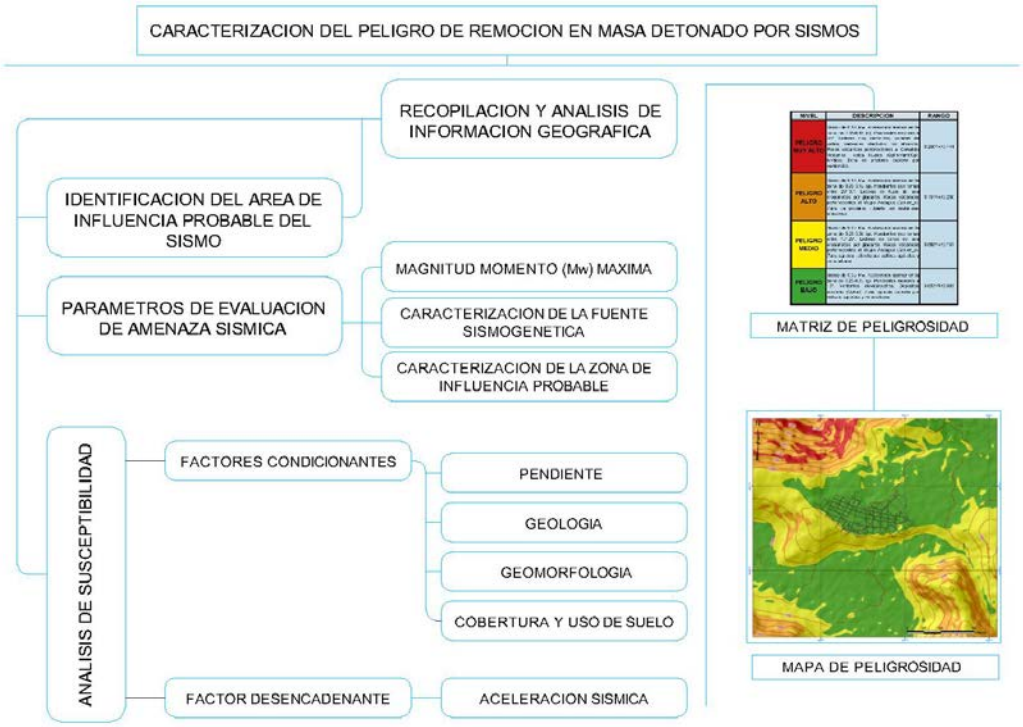


Diagrama 14. Metodología para la caracterización del peligro de remoción en masa generado por sismos. Se describe de manera sistemática los procesos necesarios para la generación del mapa de peligrosidad. Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Análisis de susceptibilidad

Para el análisis de susceptibilidad, procedemos a la ponderación de los factores condicionantes y desencadenantes mediante el proceso de análisis jerárquico, evaluando sus características físicas y su susceptibilidad a producir fenómenos de remoción en masa.

5.3.1.1. Factores condicionantes

a. Parámetros de evaluación de los factores condicionantes

Se consideraron cinco factores condicionantes en este estudio: pendiente, geomorfología, geología, cobertura vegetal y uso de suelos, a continuación, se presenta la matriz de comparación de pares, matriz de normalización para obtener los pesos ponderados y su relación de consistencia a fin de proponer una relación cuantitativa entre los factores condicionantes y sus descriptores.

PARAMETRO	Pendiente	Geomorfología	Geología	Cobertura vegetal	Uso de suelo
Pendiente	1	2	3	5	7
Geomorfología	1/2	1	5	3	5
Geología	1/3	1/2	1	2	3
Cobertura Vegetal	1/5	1/3	1/2	1	2
Uso de suelo	1/7	1/5	1/3	1/2	1
SUMA	2.176	4.033	9.833	11.500	18.000
1/ SUMA	0.460	0.248	0.102	0.087	0.056

Figura 48. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de los factores condicionantes. Fuente: Elaboración propia

PARAMETRO	Pendiente	Geomorfología	Geología	Cobertura vegetal	Uso de suelo	Vector priorización
Pendiente	0.460	0.496	0.305	0.435	0.389	0.417
Geomorfología	0.230	0.248	0.508	0.261	0.278	0.305
Geología	0.153	0.124	0.102	0.174	0.167	0.144
Cobertura vegetal	0.092	0.083	0.051	0.087	0.111	0.085
Uso de suelo	0.066	0.050	0.034	0.043	0.056	0.050
INDICE DE CONSISTENCIA		0.086	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1) *			0.078

Figura 49. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de los factores condicionantes. * Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

b. Pendiente

El parámetro de evaluación pendiente indica el grado de susceptibilidad a generar fenómenos de remoción en masa, a partir de la inclinación del terreno y la intervención natural de la gravedad.

PENDIENTE	>45º	45º-35º	35º-25º	25º-10º	<10º
>45º	1	3	5	7	9
45º-35º	1/3	1	3	5	7
35º-25º	1/5	1/3	1	3	5
25º-10º	1/7	1/5	1/3	1	3
<10º	1/9	1/7	1/5	1/3	1
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25.000
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 50. Matriz de comparación de pares del parámetro pendiente.
Fuente: Elaboración propia

PENDIENTE	>45º	45º-35º	35º-25º	25º-10º	<10º	Vector priorización
>45º	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360	0.503
45º-35º	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
35º-25º	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
25º-10º	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120	0.068
<10º	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.061	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)			0.054

Figura 51. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro pendiente.
*Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

c. Geomorfología

El parámetro geomorfología indica el grado de susceptibilidad a generar fenómenos de remoción en masa, a partir de la geometría, génesis y procesos geodinámicos que modelaron el terreno.

GEOMORFOLOGIA	Pared de Cañón	Vertientes afectadas por abrasión	Flujo de lava erosionado	Cono de lava erosionado	Vertientes aluviolacustres
Pared de Cañón	1	2	3	4	5
Vertientes afectadas por abrasión	1/2	1	2	3	4
Flujo de lava erosionado	1/3	1/2	1	2	3
Cono de lava erosionado	1/4	1/3	1/2	1	2
Vertientes aluviolacustres	1/5	1/4	1/3	½	1
SUMA	2.537	4.289	6.994	10.765	15.360
1/SUMA	0.394	0.233	0.143	0.093	0.065

Figura 52. Matriz de comparación de pares del parámetro geomorfología.
Fuente: Elaboración propia

GEOMORFOLOGIA	Pared de Cañón	Vertientes afectadas por abrasión	Flujo de lava erosionado	Cono de lava erosionado	Vertientes aluviolacustres	Vector priorización
Pared de Cañón	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Vertientes afectadas por abrasión	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Flujo de lava erosionado	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Cono de lava erosionado	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Vertientes aluviolacustres	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.017	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)			0.015

Figura 53. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro geomorfología
*Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

d. Geología

El parámetro geología indica el grado de susceptibilidad a generar fenómenos de remoción en masa, a partir de la composición física y química de las rocas, y su comportamiento al ser afectada por un sismo.

GEOLOGIA	Qpl-hh/an1	Qpl-hh/dae	Qpl-an_s	Qpl-al
Qpl-hh/an1	1	2	2	7
Qpl-hh/dae	1/2	1	1	5
Qpl-an_s	1/2	1	1	5
Qpl-al	1/7	1/5	1/5	1
SUMA	2.705	4.727	4.761	18.619
1/SUMA	0.370	0.212	0.210	0.054

Figura 54. Matriz de comparación de pares del parámetro geología.
Fuente: Elaboración propia

GEOLOGIA	Qpl-hh/an1	Qpl-hh/dae	Qpl-an_s	Qpl-al	Vector priorización
Qpl-hh/an1	0.015	0.021	0.024	0.019	0.452
Qpl-hh/dae	0.007	0.011	0.016	0.014	0.247
Qpl-an_s	0.005	0.005	0.008	0.009	0.247
Qpl-al	0.004	0.004	0.004	0.005	0.054
INDICE DE CONSISTENCIA		0.017	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.08)		0.015

Figura 55. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro geología.
*Para matrices de 4x4 la relación de consistencia debe ser menor a 0.08
Fuente: Elaboración propia

e. Cobertura vegetal

El parámetro cobertura vegetal indica el grado de susceptibilidad a generar fenómenos de remoción en masa, a partir de la estabilidad que la cobertura vegetal puede generar en una superficie de suelos y su comportamiento frente a un sismo.

COBERTURA VEGETAL	Cardonal	Matorral Arbustivo	Cultivo agrícola	Zona urbana
Cardonal	1.000	2.000	3.000	5.000
Matorral Arbustivo	0.500	1.000	3.000	5.000
Cultivo agrícola	0.333	0.333	1.000	3.000
Zona urbana	0.200	0.200	0.333	1.000
SUMA	2.033	3.533	7.333	14.000
1/SUMA	0.492	0.283	0.136	0.071

Figura 56. Matriz de comparación de pares del parámetro cobertura vegetal.
Fuente: Elaboración propia

COBERTURA VEGETAL	Cardonal	Matorral Arbustivo	Cultivo agrícola	Zona Urbana	Vector priorización
Cardonal	0.492	0.566	0.409	0.357	0.456
Matorral Arbustivo	0.246	0.283	0.409	0.357	0.324
Cultivo agrícola	0.164	0.094	0.136	0.214	0.152
Zona Urbana	0.098	0.057	0.045	0.071	0.068
INDICE DE CONSISTENCIA		0.035	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.08)		0.040

Figura 57. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro cobertura vegetal. *Para matrices de 4x4 la relación de consistencia debe ser menor a 0.08
Fuente: Elaboración propia

f. Uso de suelos

El parámetro uso de suelos indica el grado de susceptibilidad a generar fenómenos de remoción en masa, a partir de la relación del uso de suelos y su comportamiento al ser afectada por un sismo.

USO DE SUELOS	Zona Praderas	Zona Agrícola	Zona Urbana
Zona Praderas	1	3	5
Zona Agrícola	1/3	1	3
Zona Urbana	1/5	1/3	1
SUMA	1.533	4.333	9.000
1/SUMA	0.652	0.231	0.111

Figura 58. Matriz de comparación de pares del parámetro uso de suelos. Fuente: Elaboración propia

USO DE SUELOS	Zona Praderas	Zona Agrícola	Zona Urbana	Vector priorización
Zona Praderas	0.652	0.692	0.556	0.633
Zona Agrícola	0.217	0.231	0.333	0.260
Zona Urbana	0.130	0.077	0.111	0.106
INDICE DE CONSISTENCIA		0.019	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04)	0.037

Figura 59. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro uso de suelos. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2. Factor desencadenante

Se presenta a continuación la matriz de comparación de pares, matriz de normalización para obtener los pesos ponderados y su relación de consistencia a fin de proponer una relación cuantitativa a los descriptores del factor desencadenante.

a. Aceleración Sísmica

En el estudio de la amenaza sísmica se calculó el grado de afectación que tendría un sismo de 6.00 Mw generado por la falla Trigal en el área de estudio, este estudio

permitió delimitar territorialmente la aceleración sísmica en gales, a partir del modelo sísmico que engloba las características físicas y geométricas de la fuente sismogenética y las características físicas de las zonas de influencia del fenómeno sísmico.

ACELERACION	>0.45	0.45-0.35	0.35-0.25	0.25-10	<0.1
>0.45	1	2	3	4	5
0.45 -0.35	1/2	1	2	3	4
0.35-0.25	1/3	1/2	1	2	3
0.25-10	1/4	1/3	1/2	1	2
<0.1	1/5	1/4	1/3	1/2	1
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15.000
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 60. Matriz de comparación de pares del parámetro aceleración sísmica.
Fuente: Elaboración propia

ACELERACION	>0.45	0.45-0.35	0.35-0.25	0.25-10	<0.1	Vector Priorización
>0.45	0.416	0.524	0.483	0.394	0.312	0.416
0.45 -0.35	0.208	0.262	0.322	0.296	0.250	0.262
0.35-0.25	0.139	0.131	0.161	0.197	0.187	0.161
0.25-10	0.104	0.087	0.081	0.099	0.125	0.099
<0.1	0.083	0.065	0.054	0.049	0.062	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.019	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)			0.037

Figura 61. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro aceleración sísmica. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.3. Parámetros de evaluación

A partir del cálculo de la aceleración sísmica con el modelo de atenuación de Abrahamson y Silva (2007), se abarco parámetros sísmicos como la distancia al epicentro, magnitud, intensidad. Para los parámetros de evaluación, tomaremos en cuenta la frecuencia y la duración del fenómeno, para este análisis asumiremos los parámetros de evaluación con el mismo peso ponderado (0.5).

5.3.1.4. Duración del sismo

La duración del sismo indica la cantidad de tiempo en el que los elementos expuestos están siendo afectados por el fenómeno natural.

Duración del sismo	>2 min	1-2 min	30- 60 segundos	10-30 segundos	<10 segundos
>2 min	1	2	3	5	7
1-2 min	1/2	1	2	3	5
30- 60 segundos	1/3	1/2	1	2	3
10-30 segundos	1/5	1/3	1/2	1	2
<10 segundos	1/7	1/5	1/3	1/2	1
SUMA	2.176	4.033	6.833	11.500	18.000
1/SUMA	0.460	0.248	0.146	0.087	0.056

Figura 62. Matriz de comparación de pares del parámetro duración del sismo
Fuente: Elaboración propia

Duración del sismo	>2 min	1-2 min	30- 60 segundos	10-30 segundos	<10 segundos	Vector priorización
>2 min	0.444	0.524	0.458	0.446	0.368	0.444
1-2 min	0.222	0.262	0.306	0.267	0.263	0.262
30- 60 segundos	0.148	0.131	0.153	0.178	0.158	0.153
10-30 segundos	0.089	0.087	0.076	0.089	0.105	0.089
<10 segundos	0.063	0.052	0.051	0.045	0.053	0.053
INDICE DE CONSISTENCIA	0.007	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)		0.006		

Figura 63. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro duración del sismo. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.5. Frecuencia del sismo

La frecuencia del sismo indica la cantidad promedio de sismos ocurridos en un determinado territorio. En el caso de la localidad de Cabanaconde tomaremos en cuenta la cantidad de sismos de magnitud moderada (> 5 Mw) que han ocurrido en la localidad.

Frecuencia de Sismos	<2 años	5-2 años	5-8 años	10-20 años	>20 años
<2 años	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360
5-2 años	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280
5-10 años	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200
10-20 años	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120
>20 años	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25.000
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 64. Matriz de comparación de pares del parámetro frecuencia de sismos
Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Sismos	<2 años	5-2 años	5-8 años	10-20 años	>20 años	Frecuencia de Sismos	Vector priorización
<2 años	0.503	0.781	0.672	0.474	0.313	0.503	0.503
5-2 años	0.168	0.260	0.403	0.339	0.244	0.168	0.260
5-10 años	0.101	0.087	0.134	0.203	0.174	0.101	0.134
10-20 años	0.072	0.052	0.045	0.068	0.104	0.072	0.068
>20 años	0.056	0.037	0.027	0.023	0.035	0.056	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.061	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)			0.054	

Figura 65. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro frecuencia de sismos
*Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Matriz de peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos

A partir del análisis de susceptibilidad, de los parámetros de evaluación y del procesamiento de la información con los sistemas de información geográfica (SIG), es posible construir una matriz de peligrosidad referencial, describiendo las características de los descriptores y señalando el rango de valores asignado a cada nivel de peligrosidad. Estos niveles de peligrosidad están delimitados territorialmente en el mapa de peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos (Ver Figura 67).

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
PELIGRO MUY ALTO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes mayores a 35º. Laderas muy inestables, paredes de cañón, vertientes afectadas por abrasión. Rocas volcánicas pertenecientes al Complejo Volcánico Hualca Hualca (Qpl-hh/an1/Qpl-hh/dae). Zona de praderas cubierta por cardonales.	0.260≤R<0.444
PELIGRO ALTO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes que varían entre 25º-35º. Laderas de flujos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona de praderas cubierta por matorrales arbustivos.	0.161≤R<0.260
PELIGRO MEDIO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.25-0.35 (g). Pendientes que varían entre 15º-25º. Laderas de conos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona agrícola cubierta por cultivos agrícolas y zona urbana.	0.083≤R<0.161
PELIGRO BAJO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.25-0.35 (g). Pendientes menores a 15º. Vertientes aluviolacustres. Depósitos aluviales (Qpl-al). Zona agrícola cubierta por cultivos agrícolas y zona urbana.	0.053≤R<0.083

Figura 66. Matriz de peligrosidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos.
Fuente: Elaboración propia

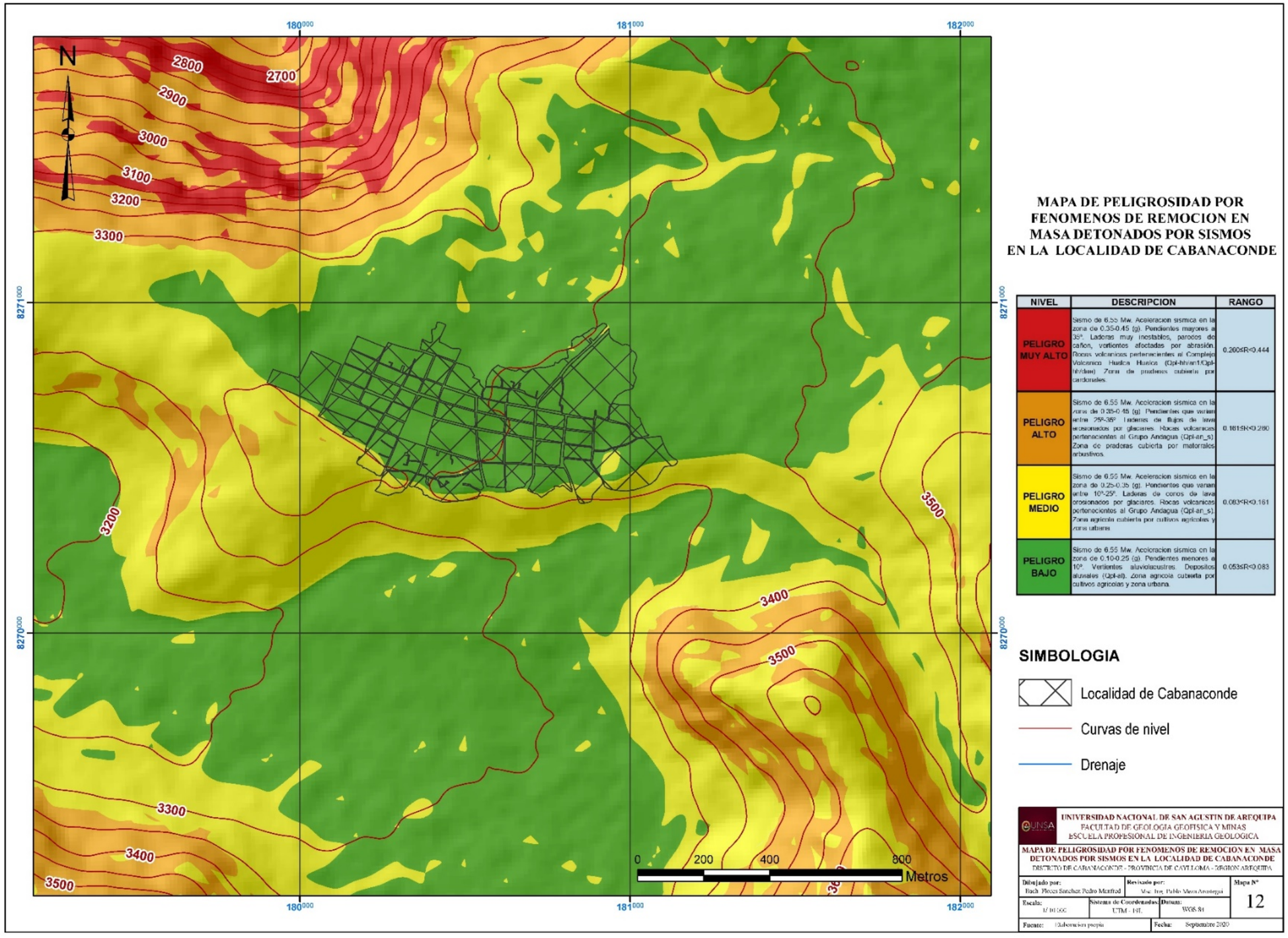


Figura 67. Mapa de Peligrosidad por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

5.4. Análisis de Vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa

El análisis de vulnerabilidad define como la población, la infraestructura y sus medios de vida, afrontara los posibles daños que ocasionaría la ocurrencia de un peligro. Con respecto al peligro de fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde, se tiene en cuenta las dimensiones social y económica, analizándolos en base a la exposición de los elementos expuestos, su fragilidad y la resiliencia de la población de la localidad. Así como con el análisis de peligrosidad, la vulnerabilidad es analizada con el proceso de análisis jerárquico.

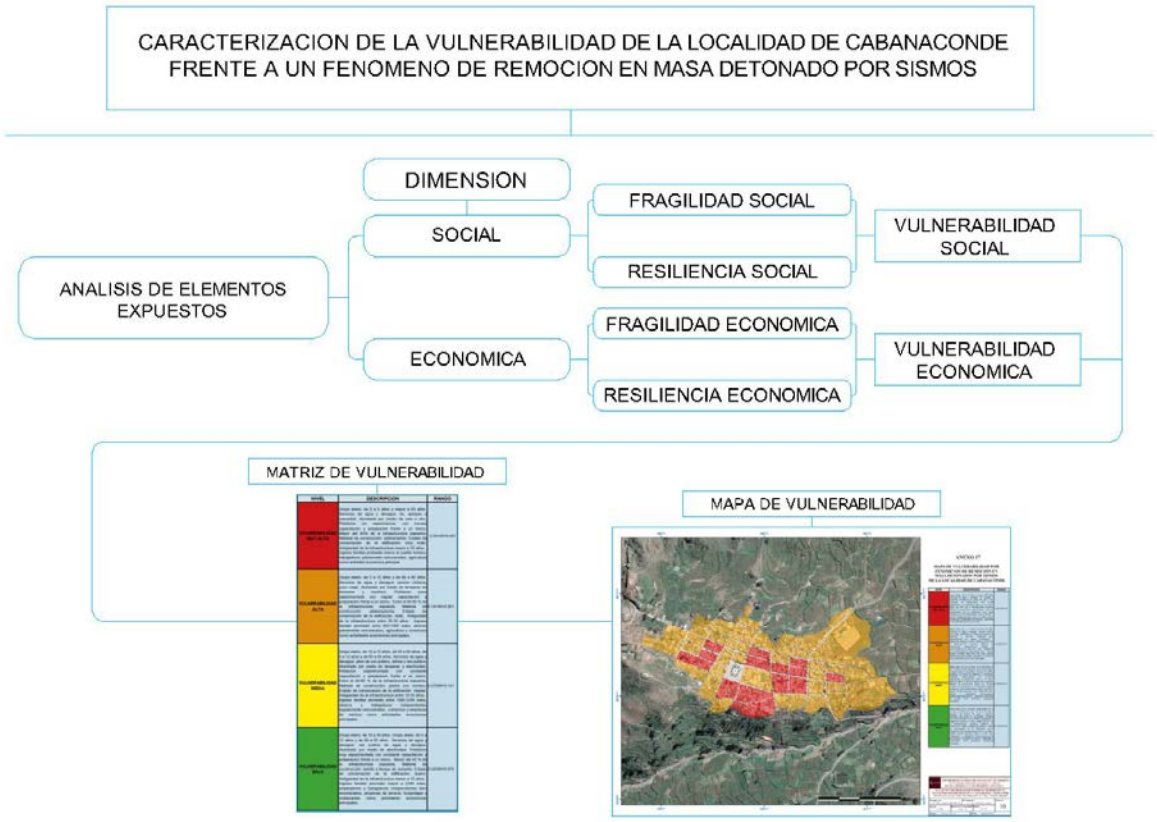


Diagrama 15. Metodología para la caracterización de la vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a un fenómeno de remoción en masa detonado por sismos
Se describe de manera sistemática los procesos necesarios para la generación del mapa de vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia

5.4.1. Vulnerabilidad de la dimensión social

La vulnerabilidad de la dimensión social se refiere a la capacidad de los medios de vida de la población a afrontar un fenómeno, identificando la población vulnerable evaluándola en base a su exposición, fragilidad y resiliencia. En el caso de la localidad de Cabanaconde, los parámetros más importantes para la evaluación vulnerabilidad social son aquellos que caracterizan el grupo etario, bienestar social y la actitud al afrontar un sismo de gran magnitud. A continuación, se analiza los parámetros en base al proceso de análisis jerárquico.

Dimensión Social	Exposición social	Fragilidad social	Resiliencia social
Exposición social	1.000	2.000	4.000
Fragilidad social	1/2	1.000	3.000
Resiliencia social	1/4	1/3	1.000
SUMA	1.750	3.333	8.000
1/SUMA	0.571	0.300	0.125

Figura 68.Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad social.

Dimensión Social	Exposición social	Fragilidad social	Resiliencia social	Vector Priorización
Exposición social	0.571	0.600	0.500	0.557
Fragilidad social	0.286	0.300	0.375	0.320
Resiliencia social	0.143	0.100	0.125	0.123
INDICE DE CONSISTENCIA		0.009	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04)*	0.017

Figura 69. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad social. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia

5.4.1.1. Exposición social

La exposición social indica las características físicas de la sociedad que está expuesta a un peligro.

a. Grupo etario

Según el censo del INEI (2017), en la localidad de Cabanaconde, el mayor grupo de personas expuestas se encuentra en edades mayores de 40 años en su mayoría, mientras que poblaciones de edades menores de 40 años son aproximadamente el 40% de la población.

Grupo Etario	De 0 a 5 años y mayores de 65 años	De 5 a 12 años y de 60 a 65 años	De 12 a 15 años y de 50 a 60 años	De 15 a 30 años	De 30 a 50 años
De 0 a 5 años y mayores de 65 años	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
De 5 a 12 años y de 60 a 65 años	1/3	1.000	3.000	5.000	7.000
De 12 a 15 años y de 50 a 60 años	1/5	1/3	1.000	3.000	5.000
De 15 a 30 años	1/7	1/5	1/3	1.000	3.000
De 30 a 50 años	1/9	1/7	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 70. Matriz de comparación de pares del parámetro grupo etario.
Fuente: Elaboración propia

Grupo Etario	De 0 a 5 años y mayores de 65 años	De 5 a 12 años y de 60 a 65 años	De 12 a 15 años y de 50 a 60 años	De 15 a 30 años	De 30 a 50 años	Vector priorización
De 0 a 5 años y mayores de 65 años	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360	0.503
De 5 a 12 años y de 60 a 65 años	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
De 12 a 15 años y de 50 a 60 años	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
De 15 a 30 años	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120	0.068
De 30 a 50 años	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.061	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.054

Figura 71. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro grupo etario.
*Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.4.1.2. Fragilidad Social

La fragilidad social nos indica la capacidad de los medios de vida de la población a contener o mantenerse en funcionamiento a pesar de la acción de un fenómeno natural.

a. Parámetros de evaluación de la fragilidad social

Fragilidad Social	Abastecimiento de agua	Servicios higiénicos	Tipo de alumbrado
Abastecimiento de agua	1.000	2.000	3.000
Servicios Higiénicos	1/2	1.000	2.000
Tipo de Alumbrado	1/3	1/2	1.000
SUMA	1.833	3.500	6.000
1/SUMA	0.545	0.286	0.167

Figura 72. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la fragilidad social. Fuente: Elaboración propia

Fragilidad Social	Abastecimiento de agua	Servicios higiénicos	Tipo de Alumbrado	Vector Priorización
Abastecimiento de agua	0.545	0.571	0.500	0.539
Servicios higiénicos	0.273	0.286	0.333	0.297
Tipo de alumbrado	0.182	0.143	0.167	0.164
INDICE DE CONSISTENCIA		0.005	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04) *	0.009

Figura 73. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la fragilidad social. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia

b. Abastecimiento de agua

Según el censo del INEI (2017), la localidad de Cabanaconde, en su gran mayoría (>90%) de las viviendas e infraestructuras poseen servicios de agua mediante el uso de la red pública de agua, el resto tiene un abastecimiento entre pilones de uso público, acequias y manantiales.

Abastecimiento de Agua	No tiene	Rio, acequia, manantial o similar	Camión cisterna u otro similar	Pilón de uso publico	Red publica
No tiene	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
Rio, acequia, manantial o similar	1/3	1.000	3.000	5.000	7.000
Camión cisterna u otro similar	1/5	1/3	1.000	3.000	5.000
Pilón de uso publico	1/7	1/5	1/3	1.000	3.000
Red publica	1/9	1/7	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 74. Matriz de comparación de pares del parámetro abastecimiento de agua. Fuente: Elaboración propia

Abastecimiento de Agua	No tiene	Rio, acequia, manantial o similar	Camión cisterna u otro similar	Pilón de uso publico	Red publica	Vector Priorización
No tiene	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360	0.503
Rio, acequia, manantial o similar	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
Camión cisterna u otro similar	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
Pilo de uso publico	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120	0.068
Red publica	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.061	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1) *			0.054

Figura 75. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro abastecimiento de agua. * Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

c. Servicio higiénico

Según el censo del INEI (2017), la localidad de Cabanaconde, en su gran mayoría (>90%) de las viviendas e infraestructuras cuentan con servicio de desagua de agua mediante el uso de la red pública, el resto poseen servicios higiénicos a base de letrinas pozos ciegos.

Servicio Higiénico	No tiene	Río, acequia o canal	Pozo ciego/negro	Letrina	Red pública de desagüe
No tiene	1.000	3.000	4.000	5.000	6.000
Río, acequia o canal	1/3	1.000	3.000	4.000	5.000
Pozo ciego/negro	1/4	1/3	1.000	3.000	4.000
Letrina	1/5	1/4	1/3	1.000	3.000
Red pública de desagüe	1/6	1/5	1/4	1/3	1.000
SUMA	1.950	4.783	8.583	13.333	19.000
1/SUMA	0.513	0.209	0.117	0.075	0.053

Figura 76. Matriz de comparación de pares del parámetro servicio higiénico.
Fuente: Elaboración propia

Servicios higiénicos	No tiene	Río, acequia o canal	Pozo ciego/negro	Letrina	Red pública de desagüe	Vector Priorización
No tiene	0.513	0.627	0.466	0.375	0.316	0.459
Río, acequia o canal	0.171	0.209	0.350	0.300	0.263	0.259
Pozo ciego/negro	0.128	0.070	0.117	0.225	0.211	0.150
Letrina	0.103	0.052	0.039	0.075	0.158	0.085
Red pública de desagüe	0.085	0.042	0.029	0.025	0.053	0.047
INDICE DE CONSISTENCIA		0.080	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1) *			0.072

Figura 77. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro servicio higiénico. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

d. Tipo de alumbrado

Actualmente localidad de Cabanaconde, cuenta con alumbrado público en su totalidad a base de electricidad mediante la red nacional de alumbrado.

Tipo de Alumbrado	No tiene	Vela u otro	Petróleo, gas, lámpara	Kerosene, mechero, lamparín	Electricidad
No tiene	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Vela u otro	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
Petróleo, gas, lámpara	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
Kerosene, mechero, lamparín	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
Electricidad	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 78. Matriz de comparación de pares del parámetro tipo de alumbrado.
Fuente: Elaboración propia

Tipo de Alumbrado	No tiene	Vela u otro	Petróleo, gas, lámpara	Kerosene, mechero, lamparín	Electricidad	Vector Priorización
No tiene	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Vela u otro	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Petróleo, gas, lámpara	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Kerosene, mechero, lamparín	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Electricidad	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1) *			0.057

Figura 79. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro tipo de alumbrado. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.4.1.3. Resiliencia social

La resiliencia social, indica el grado de conocimiento, preparación de una sociedad ante la ocurrencia de un fenómeno natural. Yauri y Hilares (2015) caracterizaron la resiliencia de la localidad de Cabanaconde a travez de una encuesta mediante las siguientes preguntas: ¿Sabe que hacer en caso de sismo?, ¿Ha identificado usted los lugares seguros ante la ocurrencia de un sismo? y ¿Ha participado usted en algun simulacro de sismo?.

Ante la primera pregunta el 73% de la población respondió afirmativamente mientras que el 27% respondió de manera negativa, en cuanto a la ubicación de lugares seguros solo un 57% está al tanto de los lugares seguros de evacuación. Finalmente, en cuanto a la participación en simulacros de sismos solo un 49% de la población encuestada ha participado. Según esta información concluimos que la localidad de Cabanaconde posee una grado medio – bajo en cuanto a la resiliencia y que es necesario trabajar en este aspecto.

En este estudio tomamos en cuenta el parámetro experiencia pasada con sismos, la capacitación recibida con relación a sismos y la preparación de la población ante los sismos, la caracterización de la vulnerabilidad con ayuda de estos parámetros se realizó teniendo en cuenta los datos del estudio realizado por Yauri y Hilares (2015).

a. Parámetros de evaluación de la resiliencia social

Resiliencia Social	Experiencia pasada de sismos	Capacitación en temas de sismos	Preparación ante sismos
Experiencia pasada de sismos	1.000	3.000	5.000
Capacitación en temas de sismos	1/3	1.000	3.000
Preparación ante sismos	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.533	4.333	9.000
1/SUMA	0.652	0.231	0.111

Figura 80. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la resiliencia social. Fuente: Elaboración propia

Resiliencia Social	Experiencia pasada de sismos	Capacitación en temas de sismos	Preparación ante sismos	Vector Priorización
Experiencia pasada de sismos	0.652	0.692	0.556	0.633
Capacitación en temas de sismos	0.217	0.231	0.333	0.260
Preparación ante sismos	0.130	0.077	0.111	0.106
INDICE DE CONSISTENCIA		0.019	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04)*	0.037

Figura 81. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la resiliencia social. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia

b. Experiencia de la población ante sismos

Experiencia de la población ante sismos	Nula experiencia	Escasa experiencia	Regular experiencia	Experimentado	Mucha experiencia
Nula experiencia	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Escasa experiencia	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
Regular experiencia	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
Experimentado	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
Mucha experiencia	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15.000
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 82. Matriz de comparación de pares del parámetro experiencia de la población ante sismos. Fuente: Elaboración propia

Experiencia de la población ante sismos	Nula experiencia	Escasa experiencia	Regular experiencia	Experimentado	Mucha experiencia	Vector priorización
Nula experiencia	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Escasa experiencia	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Regular experiencia	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Experimentado	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Mucha experiencia	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.037	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.033

Figura 83. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro experiencia de la población ante sismos. * Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

c. Capacitación en temas de sismos

Capacitación en temas de sismos	Nunca	Escasamente	Regular	Constantemente	Intensamente
Nunca	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Escasamente	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
Regular	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
Constantemente	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
Intensamente	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 84. Matriz de comparación de pares del parámetro capacitación en temas de sismos. Fuente: Elaboración propia

Capacitación en temas de sismos	Nunca	Escasamente	Regular	Constantemente	Intensamente	Vector priorización
Nunca	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Escasamente	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Regular	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Constantemente	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Intensamente	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.057

Figura 85. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro capacitación en temas de sismos. * Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

d. Preparación frente a un sismo

Preparación frente a un sismo	Nula preparación	Escasa preparación	Regular preparación	Buena preparación	Excelente preparación
Nula preparación	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Escasa preparación	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
Regular preparación	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
Buena preparación	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
Excelente preparación	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15.000
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 86. Matriz de comparación de pares del parámetro preparación frente a un sismo. Fuente: Elaboración propia

Preparación frente a un sismo	Nula preparación	Escasa preparación	Regular preparación	Buena preparación	Excelente preparación	Vector Priorización
Nula preparación	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Escasa preparación	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Regular preparación	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Buena preparación	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Excelente preparación	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.037	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.033

Figura 87. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro preparación frente a un sismo. * Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Vulnerabilidad de la dimensión económica

La vulnerabilidad de la dimensión económica se refiere a la capacidad de las actividades económicas y la infraestructura de una población a afrontar los posibles daños y complicaciones que puede generar un fenómeno natural, a continuación, se analizará la exposición, la fragilidad y la resiliencia de la dimensión económica de la localidad de Cabanaconde.

Dimensión Económica	Exposición económica	Fragilidad económica	Resiliencia económica
Exposición económica	1.000	2.000	4.000
Fragilidad económica	0.500	1.000	3.000
Resiliencia económica	0.250	0.333	1.000
SUMA	1.750	3.333	8.000
1/SUMA	0.571	0.300	0.125

Figura 88. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la dimensión económica. Fuente: Elaboración propia

Dimensión Económica	Exposición	Fragilidad	Resiliencia	Vector priorización
Exposición	0.571	0.600	0.500	0.557
Fragilidad	0.286	0.300	0.375	0.320
Resiliencia	0.143	0.100	0.125	0.123
INDICE DE CONSISTENCIA		0.009	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04)*	0.017

Figura 89. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la dimensión económica. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración

5.4.2.1. Exposición económica

Teniendo en cuenta que el fenómeno estudiado es un sismo, la localidad de Cabanaconde está expuesta en su totalidad.

a. Infraestructura expuesta

Infraestructura expuesta	100% de infraestructura expuesta	80% de infraestructura expuesta	60% de infraestructura expuesta	40% de infraestructura expuesta	20% de infraestructura expuesta
100% de exposición	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
80% de exposición	1/3	1.000	3.000	5.000	7.000
600% de exposición	1/5	1/3	1.000	3.000	5.000
40% de exposición	1/7	1/5	1/3	1.000	3.000
20% de exposición	1/9	1/7	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25.000
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 90. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación exposición económica. Fuente: Elaboración propia

Infraestructura expuesta	100% de infraestructura expuesta	80% de infraestructura expuesta	60% de infraestructura expuesta	40% de infraestructura expuesta	20% de infraestructura expuesta	Vector priorización
100% de infraestructura expuesta	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360	0.503
80% de infraestructura expuesta	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
60% de infraestructura expuesta	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
40% de infraestructura expuesta	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120	0.068
20% de infraestructura expuesta	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.061	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.054

Figura 91. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro exposición económica. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

5.4.2.2. Fragilidad económica

La fragilidad económica se refiere a la capacidad de los medios de vida de una sociedad a afrontar la ocurrencia de un desastre natural, en la localidad de Cabanaconde proponemos tres parámetros de mayor importancia material de construcción de la infraestructura, su antigüedad y el estado de conservación.

a. Parámetros de evaluación de la fragilidad económica

Fragilidad económica	Material de construcción	Antigüedad	Estado de conservación
Material de construcción	1.000	3.000	5.000
Antigüedad	1/3	1.000	3.000
Estado de conservación	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.533	4.333	9.000
1/SUMA	0.652	0.231	0.111

Figura 92. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la fragilidad económica. Fuente: Elaboración propia

Fragilidad económica	Material de construcción	Antigüedad	Estado de conservación	Vector priorización
Material de construcción	0.652	0.692	0.556	0.633
Antigüedad	0.217	0.231	0.333	0.260
Estado de conservación	0.130	0.077	0.111	0.106
INDICE DE CONSISTENCIA	0.019	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04) *	0.037	

Figura 93. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la fragilidad económica. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia

b. Material de construcción

La infraestructura de la localidad de Cabanaconde en su gran mayoría, está construida con materiales nobles, piedra con mortero, quincha o adobe, solo cerca del 30% de la infraestructura está construida con ladrillos o bloques de cemento, mientras que los ladrillos y bloques de cemento poseen características físicas que les permite resistir la ocurrencia de un sismo sin colapsar, los materiales nobles antes mencionados, son mucho más frágiles y pueden colapsar, este es el parámetro más importante en el estudio de la vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde y es necesario la obtención de más datos a fin de caracterizar con mayor precisión la vulnerabilidad de la infraestructura de la localidad.

Material de construcción	Estera, madera o triplay	Adobe o tapia	Quincha (caña con barro)	Piedra con Mortero de barro	Ladrillo o bloque de cemento
Estera, madera o triplay	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Adobe o Tapia	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
Quincha (caña con barro)	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
Piedra con Mortero de barro	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
Ladrillo o bloque de cemento	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 94. Matriz de comparación de pares del parámetro material de construcción. Fuente: Elaboración propia

Material de construcción	Estera, madera o triplay	Adobe o tapia	Quincha (caña con barro)	Piedra con Mortero de barro	Ladrillo o bloque de cemento	Vector priorización
Estera, madera o triplay	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
Adobe o Tapia	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
Quincha (caña con barro)	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
Piedra con Mortero de barro	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
Ladrillo o bloque de cemento	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1) *			0.057

Figura 95. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro material de construcción. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

c. Antigüedad infraestructura

La infraestructura de la localidad de Cabanaconde, si bien está siendo modernizada mediante el uso de materiales de construcción más resistentes, la antigüedad de la infraestructura suele estar entre los 10-20 años de antigüedad, para materiales nobles de construcción esta antigüedad incrementa la probabilidad de colapso.

Antigüedad Infraestructura	>30 años	20-30 años	10-20 años	5-10 años	1-5 años
>30 años	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
20-30 años	1/2	1.000	2.000	3.000	4.000
10-20 años	1/3	1/2	1.000	2.000	3.000
5-10 años	1/4	1/3	1/2	1.000	2.000
1-5 años	1/5	1/4	1/3	1/2	1.000
SUMA	2.283	4.083	6.833	10.500	15
1/SUMA	0.438	0.245	0.146	0.095	0.067

Figura 96. Matriz de comparación de pares del parámetro antigüedad de la infraestructura. Fuente: Elaboración propia.

Antigüedad Infraestructura	>30 años	20-30 años	10-20 años	5-10 años	1-5 años	Vector priorización
>30 años	0.438	0.490	0.439	0.381	0.333	0.416
20-30 años	0.219	0.245	0.293	0.286	0.267	0.262
10-20 años	0.146	0.122	0.146	0.190	0.200	0.161
5-10 años	0.109	0.082	0.073	0.095	0.133	0.099
1-5 años	0.088	0.061	0.049	0.048	0.067	0.062
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.057

Figura 97. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro antigüedad de la infraestructura. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

d. Estado de conservación

Estado de conservación	Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Muy malo	1.000	3.000	7.000	9.000	11.000
Malo	1/3	1.000	3.000	7.000	9.000
Regular	1/7	1/3	1.000	3.000	7.000
Bueno	1/9	1/7	1/3	1.000	3.000
Muy bueno	0	1/9	1/7	1/3	1.000
SUMA	1.678	4.587	11.476	20.333	31
1/SUMA	0.596	0.218	0.087	0.049	0.032

Figura 98. Matriz de comparación de pares del parámetro estado de conservación. Fuente: Elaboración propia

Estado de conservación	Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Vector priorización
Muy malo	0.596	0.654	0.610	0.443	0.355	0.531
Malo	0.199	0.218	0.261	0.344	0.290	0.263
Regular	0.085	0.073	0.087	0.148	0.226	0.124
Bueno	0.066	0.031	0.029	0.049	0.097	0.054
Muy bueno	0.054	0.024	0.012	0.016	0.032	0.028
INDICE DE CONSISTENCIA		0.073	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.065

Figura 99.Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro estado de conservación. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

5.4.2.3. Resiliencia económica

a. Parámetros de evaluación de la resiliencia económica

Resiliencia económica	Ingreso promedio familiar	Actividad laboral	Ocupación principal
Ingreso promedio familiar	1.000	3.000	5.000
Actividad laboral	1/3	1.000	3.000
Ocupación principal	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.533	4.333	9.000
1/SUMA	0.652	0.231	0.111

Figura 100. Matriz de comparación de pares de los parámetros de evaluación de la resiliencia económica. Fuente: Elaboración propia

Resiliencia Económica	Ingreso promedio familiar	Actividad laboral	Ocupación principal	Vector priorización
Ingreso promedio familiar	0.652	0.692	0.556	0.633
Actividad Laboral	0.217	0.231	0.333	0.260
Ocupación principal	0.130	0.077	0.111	0.106
INDICE DE CONSISTENCIA		0.019	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.04)*	0.037

Figura 101. Matriz de normalización y relación de consistencia de los parámetros de evaluación de la resiliencia económica. *Para matrices de 3x3 la relación de consistencia debe ser menor a 0.04. Fuente: Elaboración propia.

b. Ingreso promedio familiar

El ingreso promedio familiar en la localidad de Cabanaconde según el INEI es de 950-1500 soles.

Ingreso promedio familiar	Menor del sueldo mínimo	De 850 a 1500 soles	De 1501 a 2200 soles	De 2201 a 2860 soles	Mayor a 2860 soles
Menor del sueldo mínimo	1.000	2.000	5.000	9.000	11.000
De 950 a 1500 soles	1/2	1.000	2.000	5.000	9.000
De 1501 a 2200 soles	1/5	1/2	1.000	2.000	5.000
De 2201 a 2860 soles	1/9	1/5	1/2	1.000	2.000
Mayor a 2860 soles	0	1/9	1/5	1/2	1.000
SUMA	1.902	3.811	8.700	17.500	28
1/SUMA	0.526	0.262	0.115	0.057	0.036

Figura 102. Matriz de comparación de pares del parámetro ingreso promedio familiar. Fuente: Elaboración propia.

Ingreso promedio familiar	Menor del sueldo mínimo	De 850 a 1500 soles	De 1501 a 2200 soles	De 2201 a 2860 soles	Mayor a 2860 soles	Vector priorización
Menor del sueldo mínimo	0.526	0.525	0.575	0.514	0.393	0.506
De 950 a 1500 soles	0.263	0.262	0.230	0.286	0.321	0.272
De 1501 a 2200 soles	0.105	0.131	0.115	0.114	0.179	0.129
De 2201 a 2860 soles	0.058	0.052	0.057	0.057	0.071	0.059
Mayor a 2860 soles	0.048	0.029	0.023	0.029	0.036	0.033
INDICE DE CONSISTENCIA		0.014	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.012

Figura 103. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro ingreso promedio familiar. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1. Fuente: Elaboración propia

c. Actividad laboral

La actividad laboral predominante en la localidad de Cabanaconde según el INEI es la agricultura, el comercio y el turismo, todas estas actividades económicas se verían afectadas ante la ocurrencia de un sismo, principalmente el turismo, la agricultura y ganadería.

Actividad laboral	Agricultura, ganadería y pesca	Comercio	Empresas de servicios	Hospedajes y restaurantes	Otros
Agricultura, ganadería y pesca	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
Comercio	1/3	1.000	3.000	5.000	7.000
Empresas de servicios	1/5	1/3	1.000	3.000	5.000
Hospedajes y restaurantes	1/7	1/5	1/3	1.000	3.000
Otros	1/9	1/7	1/5	1/3	1.000
SUMA	1.787	4.676	9.533	16.333	25.000
1/SUMA	0.560	0.214	0.105	0.061	0.040

Figura 104. Matriz de comparación de pares del parámetro actividad laboral. Fuente: Elaboración propia

Actividad laboral	Agricultura, ganadería y pesca	Comercio	Empresas de servicios	Hospedajes y restaurantes	Otros	Vector priorización
Agricultura, ganadería y pesca	0.560	0.642	0.524	0.429	0.360	0.503
Comercio	0.187	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
Empresas de servicios	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
Hospedajes y restaurantes	0.080	0.043	0.035	0.061	0.120	0.068
Otros	0.062	0.031	0.021	0.020	0.040	0.035
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.057

Figura 105. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro actividad laboral. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

d. Ocupación principal

La ocupación principal de la localidad de Cabanaconde según el INEI es obrero.

Ocupación principal	Trabajador Familiar No Remunerado	Obrero	Empleado	Trabajador Independiente	Empleador
Trabajador Familiar No Remunerado	1.000	3.000	4.000	5.000	7.000
Obrero	1/3	1.000	3.000	4.000	7.000
Empleado	1/4	1/3	1.000	3.000	4.000
Trabajador Independiente	1/5	1/4	1/3	1.000	3.000
Empleador	1/7	1/7	1/4	1/3	1.000
SUMA	1.926	4.726	8.583	13.333	22.000
1/SUMA	0.519	0.212	0.117	0.075	0.045

Figura 106. Matriz de comparación de pares del parámetro ocupación principal.
Fuente: Elaboración propia

Ocupación principal	Trabajador Familiar No Remunerado	Obrero	Empleado	Trabajador Independiente	Empleador	Vector Priorización
Trabajador Familiar No Remunerado	0.519	0.635	0.466	0.375	0.318	0.463
Obrero	0.173	0.212	0.350	0.300	0.318	0.270
Empleado	0.130	0.071	0.117	0.225	0.182	0.145
Trabajador Independiente	0.104	0.053	0.039	0.075	0.136	0.081
Empleador	0.074	0.030	0.029	0.025	0.045	0.041
INDICE DE CONSISTENCIA		0.063	RELACION DE CONSISTENCIA (<0.1)*			0.057

Figura 107. Matriz de normalización y relación de consistencia del parámetro ocupación principal. *Para matrices de 5x5 la relación de consistencia debe ser menor a 0.1.
Fuente: Elaboración propia

5.4.3. Matriz de vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos

A partir del análisis de vulnerabilidad, de los parámetros de evaluación y del procesamiento de la información con los sistemas de información geográfica (SIG), es posible construir una matriz de vulnerabilidad referencial, describiendo las características de los descriptores y señalando el rango de valores asignado a cada nivel de peligrosidad. Estos niveles de peligrosidad están delimitados territorialmente en el mapa de vulnerabilidad de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos (Ver Figura 109).

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
VULNERABILIDAD MUY ALTA	Grupo etario: de 0 a 5 años y mayor a 65 años. Servicios de agua y desagüe: rio, acequia o manantial. Alumbrado por medio de vela u otro. Población sin experiencia, con escasa capacitación y preparación frente a un sismo. Mayor del 80% de la infraestructura expuesta. Material de construcción: estera/cartón. Estado de conservación de la edificación: muy malo. Antigüedad de la infraestructura mayor a 30 años. Ingreso familiar promedio menor al sueldo mínimo, trabajadores pobremente remunerados, agricultura como actividad económica principal.	0.261≤R<0.481
VULNERABILDIAD ALTA	Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: camión cisterna, pozo ciego. Alumbrado por medio de lámparas de kerosene y mechero. Población poco experimentada con regular capacitación y preparación frente a un sismo. Entre el 60-80 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: adobe/quincha. Estado de conservación de la edificación: malo. Antigüedad de la infraestructura entre 20-30 años. Ingreso familiar promedio entre 950-1500 soles, obreros pobremente remunerados, agricultura y comercios como actividades económicas principales.	0.141≤R<0.261
VULNERABILIDAD MEDIA	Grupo etario: de 12 a 15 años, de 50 a 60 años, de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: pilón de uso público, letrina y red pública. Alumbrado por medio de lámparas y electricidad. Población experimentada con constante capacitación y preparación frente a un sismo. Entre el 40-60 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: piedra con mortero. Estado de conservación de la edificación: regular. Antigüedad de la infraestructura entre 10-20 años. Ingreso familiar promedio entre 1500-2200 soles, obreros y trabajadores independientes regularmente remunerados, comercios y empresas de servicio como actividades económicas principales.	0.075≤R<0.141
VULNERABILIDAD BAJA	Grupo etario: de 15 a 50 años. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: red pública de agua y desagüe. Alumbrado por medio de electricidad. Población muy experimentada con constante capacitación y preparación frente a un sismo. Menor del 40 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: ladrillo o bloque de cemento. Estado de conservación de la edificación: bueno. Antigüedad de la infraestructura menor a 10 años. Ingreso familiar promedio mayor a 2200 soles, empleadores y trabajadores independientes bien remunerados, empresas de servicio, hospedajes y restaurantes como actividades económicas principales.	0.042≤R<0.075

Figura 108. Matriz de vulnerabilidad de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos. Fuente: Elaboración propia

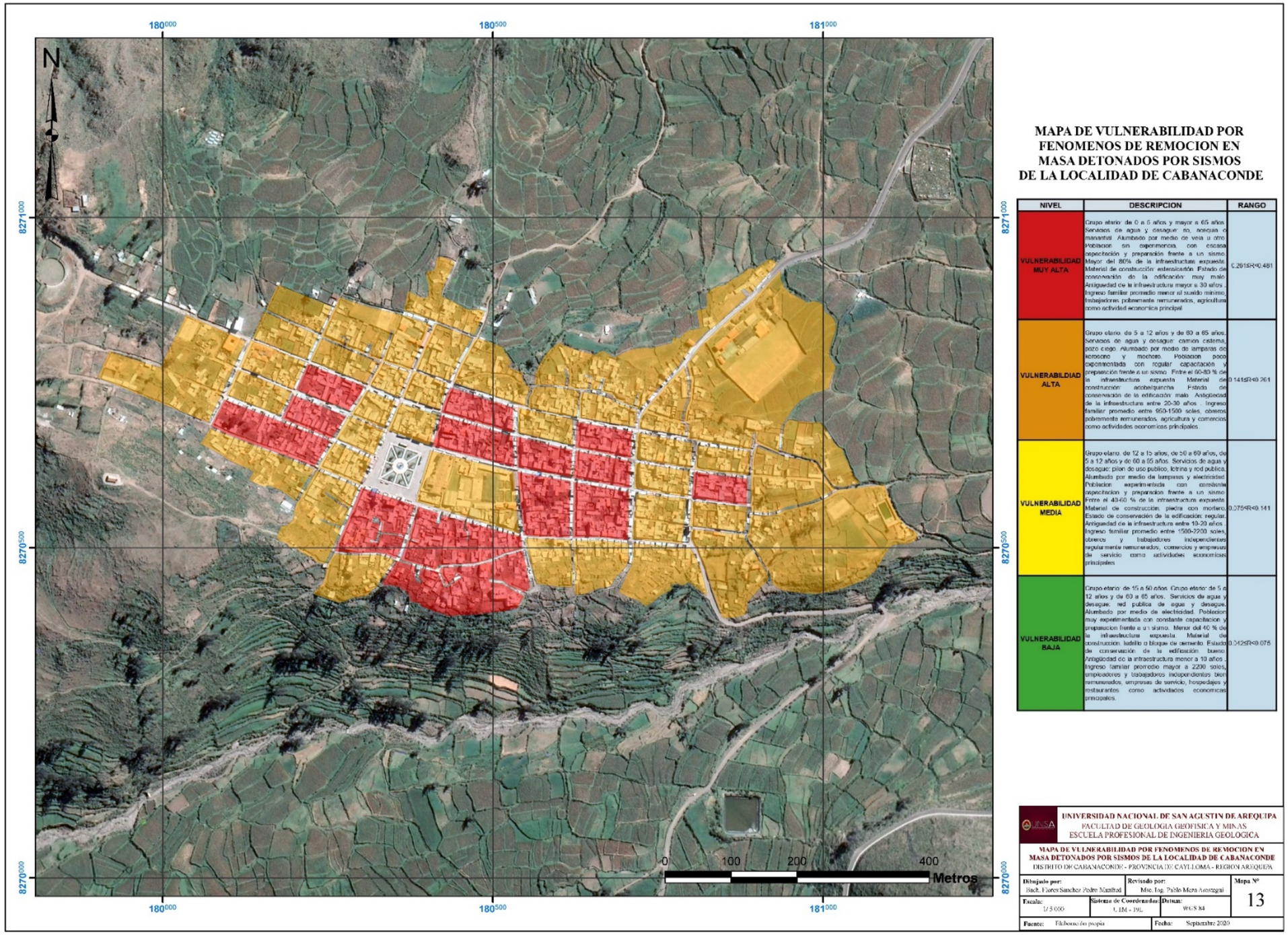


Figura 109. Mapa de Vulnerabilidad por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde Fuente: Elaboración propia

5.5. Análisis de riesgo en localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonado por sismos

El análisis del riesgo por fenómenos de remoción en masa detonados por sismos se basa en la relación entre la peligrosidad y la vulnerabilidad y está representada con la siguiente expresión matemática:

$$R_{ie} \mid_{t} = f\,(P_{i,}\, V_e) \mid_{t}$$

Donde:

R= Riesgo

f = En función

P_i = Peligro con la intensidad mayor o igual a Pi durante un período de exposición t

V_e = Vulnerabilidad de un elemento expuesto

Aplicando esta ecuación podemos obtener un valor de riesgo en la zona potencialmente afectada por un fenómeno natural, en el caso del peligro de los fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde es necesario proponer un escenario de riesgo a fin de evaluar cómo se comportan los factores que han sido caracterizados anteriormente mediante el proceso de análisis jerárquico para poder así determinar a qué nivel de riesgo están expuestos.

5.5.1. Escenario de riesgo

A partir de la caracterización de la amenaza sísmica, el análisis de peligrosidad y la vulnerabilidad, es posible proponer un escenario de riesgo que incluye la ocurrencia de un sismo magnitud 6.00 Mw producido por la reactivación de la falla Trigal, con el epicentro a distancia de 3 a 4 kilómetros de la localidad de Cabanaconde con una intensidad de III-IV.

5.5.2. Niveles de riesgo

Para estratificar el nivel del riesgo se hará uso de una matriz de doble entrada: matriz del grado de peligro y matriz del grado de vulnerabilidad. Para tal efecto, se requiere que previamente se halla determinado los niveles de peligro y del análisis de vulnerabilidad, respectivamente, es decir, es el valor (X, Y), en un plano cartesiano, donde en el eje de la Y están los niveles del peligro y en eje de la X están las vulnerabilidades, está la relación está dada por la ecuación matemática mencionada en la sección 5.5.

Utilizando los valores de los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad y el procesamiento de la información con los sistemas de información geográfica (SIG), es posible construir una matriz de nivel de riesgo (ver Figura 110).

		Vulnerabilidad Baja	Vulnerabilidad Media	Vulnerabilidad Alta	Vulnerabilidad Muy Alta
		0.075	0.141	0.261	0.481
Peligro Muy Alto	0.444	0.033	0.063	0.116	0.214
Peligro Alto	0.260	0.020	0.037	0.068	0.125
Peligro Medio	0.161	0.012	0.023	0.042	0.077
Peligro Bajo	0.083	0.006	0.012	0.022	0.040

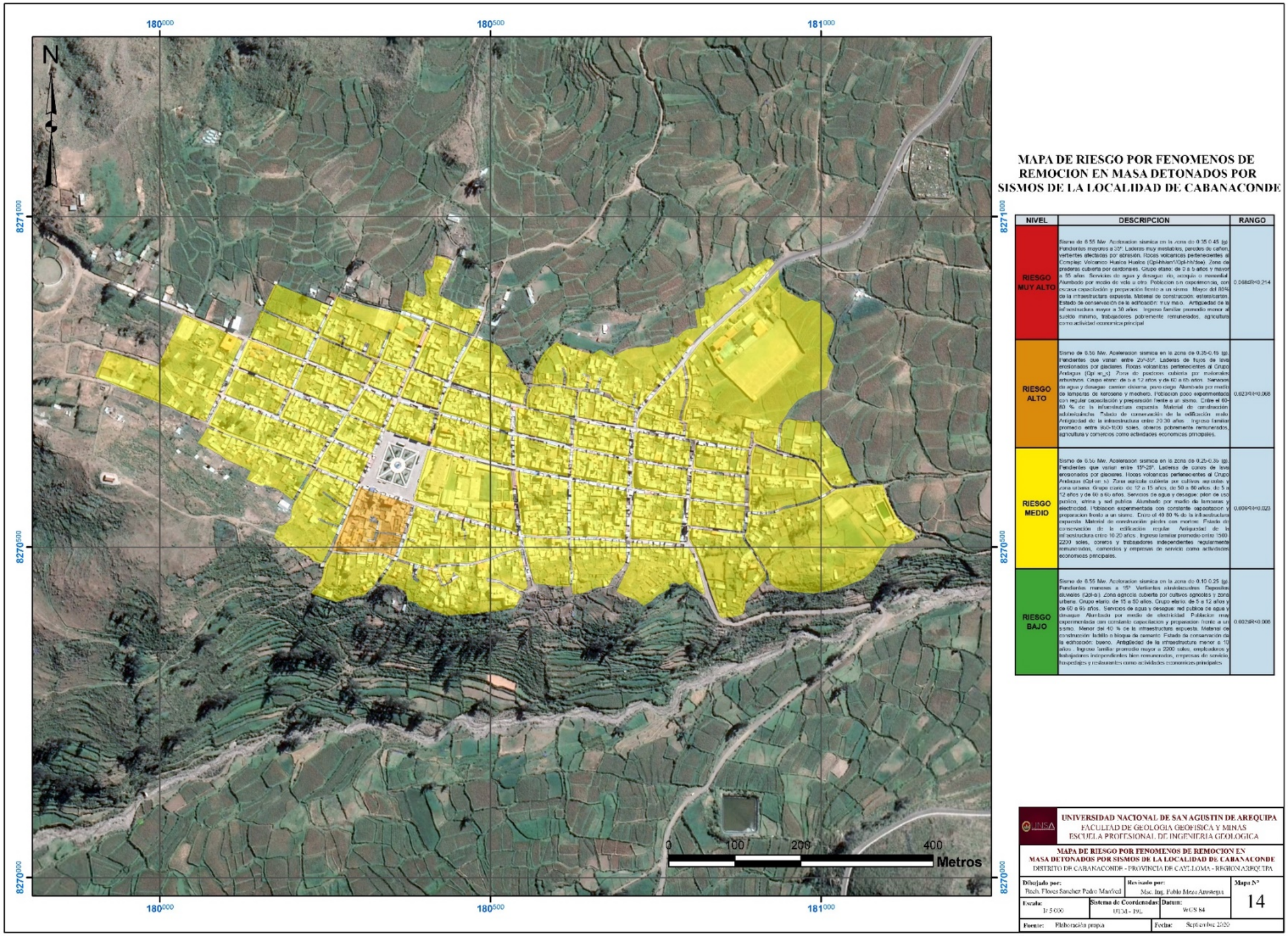
Figura 110. Matriz de niveles de riesgo
Matriz de riesgo obtenida a partir de la relación matemática entre los valores de peligrosidad y vulnerabilidad. El código de colores tiene como significado el siguiente: rojo: riesgo muy alto, naranja: riesgo alto, amarillo: riesgo medio y verde: riesgo bajo. Fuente: Elaboración propia.

5.5.3. Matriz de Riesgo

Al determinar los niveles de riesgos nos es posible ubicar las características cualitativas de los descriptores, señalando el rango de valores asignado a cada nivel de riesgo (ver Figura 111).

RIESGO MUY ALTO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes mayores a 35º. Laderas muy inestables, paredes de cañón, vertientes afectadas por abrasión. Rocas volcánicas pertenecientes al Complejo Volcánico Hualca Hualca (Qpl-hh/an1/Qpl-hh/dae). Zona de praderas cubierta por cardonales. Grupo etario: de 0 a 5 años y mayor a 65 años. Servicios de agua y desagüe: rio, acequia o manantial. Alumbrado por medio de vela u otro. Población sin experiencia, con escasa capacitación y preparación frente a un sismo. Mayor del 80% de la infraestructura expuesta. Material de construcción: estera/cartón. Estado de conservación de la edificación: muy malo. Antigüedad de la infraestructura mayor a 30 años. Ingreso familiar promedio menor al sueldo mínimo, trabajadores pobremente remunerados, agricultura como actividad económica principal.	0.068≤R<0.214
RIESGO ALTO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes que varían entre 25º-35º. Laderas de flujos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona de praderas cubierta por matorrales arbustivos. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: camión cisterna, pozo ciego. Alumbrado por medio de lámparas de kerosene y mechero. Población poco experimentada con regular capacitación y preparación frente a un sismo. Entre el 60-80 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: adobe/quincha. Estado de conservación de la edificación: malo. Antigüedad de la infraestructura entre 20-30 años. Ingreso familiar promedio entre 950-1500 soles, obreros pobremente remunerados, agricultura y comercios como actividades económicas principales.	0.023≤R<0.068
RIESGO MEDIO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.25-0.35 (g). Pendientes que varían entre 15º-25º. Laderas de conos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcánicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona agrícola cubierta por cultivos agrícolas y zona urbana. Grupo etario: de 12 a 15 años, de 50 a 60 años, de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: pilón de uso público, letrina y red pública. Alumbrado por medio de lámparas y electricidad. Población experimentada con constante capacitación y preparación frente a un sismo. Entre el 40-60 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: piedra con mortero. Estado de conservación de la edificación: regular. Antigüedad de la infraestructura entre 10-20 años. Ingreso familiar promedio entre 1500-2200 soles, obreros y trabajadores independientes regularmente remunerados, comercios y empresas de servicio como actividades económicas principales.	0.006≤R<0.023
RIESGO BAJO	Sismo de 6.00 Mw. Aceleración sísmica en la zona de 0.25-0.35 (g). Pendientes menores a 15º. Vertientes aluviolacustres. Depósitos aluviales (Qpl-al). Zona agrícola cubierta por cultivos agrícolas y zona urbana. Grupo etario: de 15 a 50 años. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: red pública de agua y desagüe. Alumbrado por medio de electricidad. Población muy experimentada con constante capacitación y preparación frente a un sismo. Menor del 40 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: ladrillo o bloque de cemento. Estado de conservación de la edificación: bueno. Antigüedad de la infraestructura menor a 10 años. Ingreso familiar promedio mayor a 2200 soles, empleadores y trabajadores independientes bien remunerados, empresas de servicio, hospedajes y restaurantes como actividades económicas principales.	0.002≤R<0.006

Figura 111. Matriz de riesgo de la localidad de Cabanaconde frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos. Fuente: Elaboración propia.



MAPA DE RIESGO POR FENOMENOS DE REMOCION EN MASA DETONADOS POR SISMOS DE LA LOCALIDAD DE CABANACONDE

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
RIESGO MUY ALTO	Sismo de 8.55 Mw. Aceleracion sismica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes mayores a 35°. Laderas muy inestables, paredes de cañon, vertientes afectadas por abrasion. Rocas volcanicas pertenecientes al Complejo Volcanico Huaica Huaica (Qpl-hh/an1/Qpl-hh/dse). Zona de praderas cubierta por cardonales. Grupo etario: de 0 a 5 años y mayor a 65 años. Servicios de agua y desagüe: rio, acequia o manantial. Alumbado por medio de vela u otro. Poblacion sin experimentacion, con escasa capacitación y preparación frente a un sismo. Mayor del 80% de la infraestructura expuesta. Material de construcción: estera/carton. Estado de conservación de la edificación: muy malo. Antigüedad de la infraestructura mayor a 30 años. Ingreso familiar promedio menor al sueldo minimo, trabajadores pobremente remunerados, agricultura como actividad economica principal.	0.068≤R<0.214
RIESGO ALTO	Sismo de 8.56 Mw. Aceleracion sismica en la zona de 0.35-0.45 (g). Pendientes que varian entre 25°-35°. Laderas de flujos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcanicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona de praderas cubierta por malezas arbustivas. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: carrion cisterna, pozo ciego. Alumbado por medio de lamparas de kerosene y mechero. Poblacion poco experimentada con regular capacitación y preparación frente a un sismo. Entre el 60-80 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: adobe/quincha. Estado de conservación de la edificación: malo. Antigüedad de la infraestructura entre 20-30 años. Ingreso familiar promedio entre 950-1500 soles, obreros pobremente remunerados, agricultura y comercios como actividades economicas principales.	0.023≤R<0.068
RIESGO MEDIO	Sismo de 8.56 Mw. Aceleracion sismica en la zona de 0.25-0.35 (g). Pendientes que varian entre 15°-25°. Laderas de conos de lava erosionados por glaciares. Rocas volcanicas pertenecientes al Grupo Andagua (Qpl-an_s). Zona agricola cubierta por cultivos agricolas y zona urbana. Grupo etario: de 12 a 15 años, de 50 a 60 años, de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: pilon de uso publico, letrina y red publica. Alumbado por medio de lamparas y electricidad. Poblacion experimentada con constante capacitacion y preparacion frente a un sismo. Entre el 40-80 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: piedra con mortero. Estado de conservación de la edificación: regular. Antigüedad de la infraestructura entre 10-20 años. Ingreso familiar promedio entre 1500-2200 soles, obreros y trabajadores independientes regularmente remunerados, comercios y empresas de servicio como actividades economicas principales.	0.006≤R<0.023
RIESGO BAJO	Sismo de 8.55 Mw. Aceleracion sismica en la zona de 0.10-0.25 (g). Pendientes menores a 15°. Vertientes aluvio/acuatros. Depositos aluviales (Qpl-al). Zona agricola cubierta por cultivos agricolas y zona urbana. Grupo etario: de 15 a 50 años. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios de agua y desagüe: red publica de agua y desagüe. Alumbado por medio de electricidad. Poblacion muy experimentada con constante capacitacion y preparacion frente a un sismo. Menor del 40 % de la infraestructura expuesta. Material de construcción: ladrillo o bloque de cemento. Estado de conservación de la edificación: bueno. Antigüedad de la infraestructura menor a 10 años. Ingreso familiar promedio mayor a 2200 soles, empleadores y trabajadores independientes bien remunerados, empresas de servicio, hospedajes y restaurantes como actividades economicas principales.	0.002≤R<0.006

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGIA GEOFISICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

MAPA DE RIESGO POR FENOMENOS DE REMOCION EN MASA DETONADOS POR SISMOS DE LA LOCALIDAD DE CABANACONDE
DISTRITO DE CABANACONDE - PROVINCIA DE CAYLLOMA - REGION AREQUIPA

Dibujado por:	Revisado por:	Mapa N°
Bach. Flores Sanchez Pedro Manfred	Msc. Ing. Pablo Meza Arostegui	14
Escala: 1/ 5 000	Sistema de Coordenadas: UTM - 19L	Datum: WGS 84
Fuente: Elaboración propia	Fecha: Septiembre 2020	

Figura 112. Mapa de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa detonados por sismos de la localidad de Cabanaconde
Fuente: Elaboración propia

5.5.4. Delimitación territorial del riesgo

Al establecer los niveles de riesgo de manera cualitativa y cuantitativa podemos expresarlos en un mapa indicando territorialmente el nivel de riesgo en los elementos expuestos. En nuestro caso los niveles de riesgo están delimitados territorialmente en el mapa de riesgos de fenómenos de remoción en masa detonados por sismos en la localidad de Cabanaconde (Ver Figura 112).

5.5.5. Impactos significativos y consecuencias negativas potenciales

Los impactos significativos que el fenómeno de remoción en masa puede generar en la localidad de Cabanaconde pueden estimarse a través de la cuantificación o estimación de perdidas, para esto es necesario un estudio exhaustivo del mercado, el deterioro físico potencial de las edificaciones y de la infraestructura de la localidad, así como el costo económico de la pérdida o afectación de las actividades económicas, este análisis debe hacerse con datos actualizado, por las entidades públicas encargadas de la toma de decisiones, en el caso del estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde, se propone los siguientes impactos significativos en las dimensiones estudiadas (económico y social).

a. Perdida potencial de vidas humanas, heridos y enfermos
b. Daño estructural en la infraestructura de la localidad
c. Suspensión temporal del abastecimiento de bienes de primera necesidad en la localidad
d. Afectación a las redes de telecomunicación en la localidad
e. Afectación a las principales actividades económicas de la localidad (agricultura, comercio, turismo).
f. Suspensión de las actividades en el sector educación
g. Traumas psicológicos en la población

5.5.5.1. Niveles de consecuencias

A partir de la caracterización de la vulnerabilidad es posible estimar el nivel de consecuencias potenciales ante la ocurrencia de un fenómeno natural, en el caso particular de la localidad de Cabanaconde y su vulnerabilidad frente a fenómenos de remoción en masa detonados por sismos, se ubica en el nivel de consecuencia "media" (ver Figura 113).

NIVEL	NIVELES	DESCRIPCION
4	Muy Alta	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno de remoción en masa son catastróficas
3	Alta	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno de remoción en masa pueden ser gestionadas con apoyo externo
2	Media	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno de remoción en masa son gestionadas con los recursos disponibles
1	Bajo	Las consecuencias debido al impacto de un fenómeno de remoción en masa pueden ser gestionadas sin dificultad

Figura 113. Matriz de nivel de consecuencias
Matriz que indica el probable impacto del fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 167), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

5.5.5.2. Niveles de frecuencia de ocurrencia

Debido a la gran actividad sísmica de las fallas activas en el Valle del Colca, la localidad de Cabanaconde es afectada con cierta frecuencia por movimientos sísmicos significativos, es por ello que ubicamos a la localidad de Cabanaconde en el nivel "medio" en la matriz de frecuencia de ocurrencia de fenómenos.

NIVEL	PROBABILIDAD	DESCRIPCION
4	Muy Alta	Puede ocurrir en la mayoría de las circunstancias
3	Alta	Puede ocurrir en periodos de tiempo medianamente largos
2	Media	Puede ocurrir en periodos de tiempo largos
1	Bajo	Puede ocurrir en circunstancias excepcionales

Figura 114. Matriz de nivel de frecuencia de ocurrencia. Matriz que indica el nivel de frecuencia de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 167), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

5.5.6. Niveles cualitativos de consecuencias y daños

Relacionando los niveles de consecuencia y frecuencia de un fenómeno natural podemos determinar niveles cuantitativos de consecuencia y daños (ver Figura 115).

CONSECUENCIAS	NIVEL	ZONA DE CONSECUENCIAS Y DAÑOS			
Muy alta	4	Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Alta	3	Media	Alta	Alta	Muy Alta
Media	2	Media	**Media**	Alta	Alta
Bajo	1	Bajo	Media	Media	Alta
	Nivel	1	2	3	4
	Frecuencia	Bajo	Media	Alta	Muy alta

Figura 115. Matriz de consecuencias y daños
Matriz que relaciona las potenciales consecuencias y la frecuencia del fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Aplicando la matriz de consecuencia y daño, se ubica a la localidad de Cabanaconde una zona de consecuencia y daño “medio” frente a un fenómeno de remoción en masa, que en términos cualitativos se traduce en lesiones moderadas en la población, perdida de la capacidad de producción, perdida de bienes y materiales financieros considerables.

VALOR	DESCRIPTOR	DESCRIPCION
4	Muy alta	Muerte de personas, enorme perdida de bienes materiales y financieros
3	Alta	Lesiones graves en las personas, perdida de la capacidad de producción, perdidas de bienes materiales y financieros importantes
2	Media	Se requiere tratamiento médico en las personas, perdidas de bienes materiales y financieros considerables
1	Bajo	Tratamiento de primeros auxilios a las personas, perdidas mínimas de bienes materiales y financieros

Figura 116. Medidas cualitativas de consecuencia y daño. Matriz que indica cualitativamente los impactos probables frente al fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

5.6. Control de Riesgos

Al no existir entidad nacional o internacional que establezca los límites de riesgo aceptable o tolerable, las autoridades encargadas de la toma de decisiones en el Sistema de Riesgos de Desastres son responsables a establecer las medidas necesarias según su criterio en la prevención y mitigación del riesgo de desastres. Estos criterios deben estar basados en estudio de riesgo, bajo esta premisa podemos utilizar las siguientes metodologías al basar una decisión en la Gestión del Riesgo de Desastres: aceptabilidad o tolerancia de riesgos, para posteriormente evaluar medidas de control de riesgos.

5.6.1. Aceptabilidad o tolerancia de riesgo de fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde

La aceptabilidad o tolerancia del riesgo, es evaluada a partir de contraste de la matriz de consecuencias y la matriz de tolerancia del riesgo (ver Figura 117). Teniendo en cuenta el factor resiliencia del análisis de vulnerabilidad, se concluye que la tolerancia de un fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde es “tolerable”.

CONSECUENCIAS	**MATRIZ DE TOLERANCIA**			
Muy alta	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inadmisible	Riesgo Inadmisible
Alta	Riesgo Tolerable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inadmisible
Media	Riesgo Tolerable	**Riesgo Tolerable**	Riesgo Inaceptable	Riesgo Inaceptable
Bajo	Riesgo Aceptable	Riesgo Tolerable	Riesgo Tolerable	Riesgo Inaceptable
TOLERANCIA	Aceptable	Tolerable	Inaceptable	Inadmisible

Figura 117. Matriz de tolerancia al riesgo. Matriz que indica la tolerancia a los impactos probables frente al fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

VALOR	DESCRIPTOR	DESCRIPCION
4	Inadmisible	Se debe aplicar inmediatamente medidas de control físico y de ser posible transferir inmediatamente recursos económicos para reducir los riesgos.
3	Inaceptable	Se deben desarrollar actividades inmediatas y prioritarias para el manejo del riesgo.
2	Tolerable	Se deben desarrollar actividades para el manejo de riesgo.
1	Aceptable	El riesgo no presenta un riesgo significativo medidas mínimas de manejo del riesgo.

Figura 118. Matriz cualitativa de tolerancia al riesgo. Matriz que indica cualitativamente la tolerancia a los impactos probables frente al fenómeno de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 168), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Al definir la tolerancia al riesgo en la zona de influencia es necesario también asignar un nivel de priorización (ver Figura 119), el cual indica que tan rápido es necesario el actuar de las autoridades pertinentes a fin de ejecutar acciones para la reducción del riesgo, en base a análisis en este estudio consideramos a la localidad de Cabanaconde en un nivel de priorización "III".

VALOR	DESCRIPTOR	NIVEL DE PRIORIZACION
4	Inadmisible	I
3	Inaceptable	II
2	Tolerable	III
1	Aceptable	IV

Figura 119. Matriz de nivel de priorización. Matriz que indica el nivel de priorización que debe tener una zona en la ejecución de la gestión del riesgo de un fenómeno natural. Adaptado de *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales - 2da versión* (p. 169), por Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2014. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

5.6.2. Medidas de control

Las medidas de control son en esencia la ejecución de los Planes de Gestión de Desastres, dichas medidas se refieren a las oportunidades que tiene la entidad para disminuir el nivel de riesgo, de acuerdo con las prioridades establecidas en la etapa de cálculo de riesgos. En la práctica existen numerosos instrumentos que se pueden agrupar en cuatro categorías: protección, reducción del riesgo, transferencia del riesgo y compartimiento de perdidas, en esta sección en base al análisis del riesgo de fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde, se propone algunas medidas de control estructurales y no estructurales.

5.6.2.1. Medidas de protección

a. Mantener en funcionamiento ininterrumpido las estaciones sismológicas de la zona.
b. Instaurar una red de comunicaciones de emergencia ante la ocurrencia de sismos
c. Instaurar sistemas de alerta temprana ante sismos
d. Creación de un programa de capacitación y preparación ante sismos

5.6.2.2. Medidas de reducción

a. Fiscalizar la correcta ejecución de la norma E.030 en la construcción de nueva infraestructura de la localidad de Cabanaconde.
b. Construcción o implementación de barreras estructurales en terrenos de pendientes elevadas y susceptibles a generar fenómenos de remoción en masa.
c. Asegurar y reforzar la infraestructura de los servicios esenciales (agua, desagüe, alumbrado), frente a la ocurrencia de un sismo.

5.6.2.3. Transferencia y compartimiento del riesgo

a. Implementación de seguros de todo tipo (salud, propiedad, agrícola y catástrofe) por parte de las autoridades competentes de la localidad.

6. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los modelos de atenuación sísmica permiten relacionar las características físicas y geométricas de la fuente sismogenética, (falla Trigal) con las características físicas (geología) del área de estudio, la aplicación del modelo de Abrahamson y Silva, permitió la delimitación de la amenaza sísmica en base al cálculo de la aceleración sísmica. Si bien es cierto este modelo determinístico no toma en cuenta factores del análisis sísmico probabilístico (probabilidad de excedencia), permite determinar un escenario de riesgo, que es de gran utilidad a la hora de la toma de decisiones en la Gestión del Riesgo de Desastres.

En la localidad de Cabanaconde y alrededores, se obtuvo valores de aceleración sísmica de entre 0.13 g a 0.25 g, valores que siendo contrastados con los estudios sísmicos probabilísticos de Tavera et. al (2014) y Tavera (2020), reúnen cierta similitud teniendo en cuenta que al encontrarse cerca de una zona de sistemas de fallas activas como el sistema de fallas Trigal, los valores de las aceleraciones sísmicas tienden a aumentar.

La ocurrencia de un evento sísmico de una magnitud moderada puede desencadenar procesos geodinámicos como fenómenos de remoción en masa, licuefacción de suelos, entre otros. El fenómeno de remoción en masa en sus diferentes formas causa daños, en las localidades que se encuentran en zonas susceptibles al fenómeno.

En la localidad de Cabanaconde y en sus zonas aledañas los elementos condicionantes (pendiente, geología, geomorfología, cobertura vegetal) poseen una susceptibilidad alta a los fenómenos de remoción en masa que generan un nivel peligrosidad “baja” a peligrosidad “muy alta”, la delimitación de los niveles de peligrosidad deben ser actualizados y mejorados a partir de la recolección y análisis de información específica como la caracterización geotécnica o información geofísica de los suelos y de la infraestructura expuesta en la localidad, al tener en consideración que los parámetros de evaluación son afectados constantemente por procesos geodinámicos.

El análisis de vulnerabilidad de la dimensión social y económica de localidad de Cabanaconde frente a un proceso de remoción en masa, muestran niveles de vulnerabilidad "altos" a "muy altos". Esto es debido a factores como grupo etario, capacitación y preparación, pero principalmente los factores más influyentes al obtener estos niveles altos de vulnerabilidad son los niveles altos de fragilidad, el mal estado de conservación y la antigüedad de la infraestructura de la localidad de Cabanaconde.

La conjunción de un estado de peligrosidad medio a muy alto y un estado de vulnerabilidad alto, colocan a la localidad de Cabanaconde frente a los fenómenos de remoción en masa en un estado de riesgo "medio". Valores medios de riesgo implican tener consecuencias potencialmente moderadas en las dimensiones, tales como pérdidas de vidas humanas, heridos de gravedad, daño a la economía y la infraestructura de la localidad e incontables efectos negativos en los medios de vida de la población.

Desde el punto de vista de la Gestión del Riesgo, es de necesidad prioritaria evaluar el costo/beneficio de proyectos de mitigación y prevención del riesgo por fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde. Tales proyectos ya sean de naturaleza estructural o no estructural deben tener el objetivo de reducir con el tiempo el nivel de riesgo en la localidad a un nivel controlable, previniendo así que los efectos de un sismo y los fenómenos que se desencadenan del mismo tengan consecuencias graves en la población de la localidad de Cabanaconde.

7. CONCLUSIONES

1. En la localidad de Cabanaconde y alrededores afloran principalmente depósitos del Complejo Volcánico Hualca Hualca, depósitos andesíticos pertenecientes al Grupo Andagua y depósitos aluviolacustres, estas unidades forman principalmente geoformas relacionadas con la actividad volcánica y relacionadas a procesos de erosión, meteorización y acumulación.
2. Los agentes geodinámicos que se encuentran activos en la zona de estudio se dividen en procesos de geodinámica interna (tectónica y vulcanismo) y de geodinámica externa (precipitaciones, erosión, meteorización, entre otros).
3. El modelo determinístico de atenuación sísmica desarrollado por Abrahamson y Silva, aplicado al sistema de fallas Trigal, permitió calcular aceleraciones PGA que varían entre 0.13 g a 0.25 g en la localidad de Cabanaconde y alrededores.
4. La zona de estudio se encuentra afectada por un peligro sísmico de nivel “bajo”, a su vez la peligrosidad ante fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde se encuentra en entre niveles “bajo” a “muy alto”.
5. La vulnerabilidad de la dimensión social y económica de la localidad de Cabanaconde se encuentra en niveles de vulnerabilidad “alta” y “muy alta”.
6. En el escenario probable de un sismo de magnitud 6.00 Mw producido por la reactivación de la falla Trigal, con el epicentro a distancia de 3 a 4 kilómetros de la localidad de Cabanaconde, presenta un nivel de riesgo frente a un fenómeno de remoción en masa “medio” en la mayor parte del territorio y “alto” en una pequeña fracción de la localidad.
7. Las medidas de prevención y mitigación propuestas en la presente investigación reducirán la vulnerabilidad de la dimensión social y económica, así como el riesgo frente a fenómenos de remoción en masa en la localidad de Cabanaconde.

8. RECOMENDACIONES

1. Evaluar la implementación de un sistema de alerta temprana o en su defecto un sistema de comunicaciones de emergencia en caso de sismos.
2. Mantener comunicación permanente con las estaciones sismológicas de la zona.
3. Aplicación de la norma E.030 de diseño sismorresistente de edificios del Perú, en la construcción de nueva infraestructura de la localidad de Cabanaconde.
4. Iniciar una campaña de capacitación sobre la reconstrucción y el reforzamiento de viviendas de material noble sobre las bases de la norma E.030.
5. Evaluar el costo/beneficio de la implementación de barreras estructurales en zonas de pendientes altas y susceptibles a generar fenómenos de remoción en masa.
6. Evaluar el costo/beneficio de la construcción de infraestructura hidráulica, para el aseguramiento del recurso hídrico en la localidad.
7. Iniciar una campaña de capacitación sobre temas de sismos: planeamiento de rutas de evacuación, implementación de mochilas de emergencia, técnicas para mantener la calma, entre otros.
8. Creación de brigadas de primera respuesta e implementarlas con equipos de primeros auxilios, comunicaciones y equipo de protección personal.
9. Evaluar la viabilidad de la obtención de mecanismos financieros tales como seguros y bonos solidarios en caso de sufrir daños considerables en la localidad de Cabanaconde al ser afectado por un sismo de gran magnitud.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abrahamson, N. & Silva, W. (2007). Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters (Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report Nro. 200). Berkerley, CA.

Abrahamson, N. & Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*,24(1), p. 67-97. DOI: 10.1193/1.2924360

Alaska Satellite Facility (2011). ALOS PALSAR [Archivo de datos] Recuperado de https://search.asf.alaska.edu/#/

Alata O., N., & Barbarán T., N. (2017). *Informe de Evaluación del Riesgo por lluvias intensas en el área de influencia del Centro Poblado de Cabanaconde.* Centro de Estimación, Prevención del Riesgo de Desastres - Municipalidad Distrital de Cabanaconde.

Alcalá-Reygosa, J., Palacios, D., & Zamorano, J. (2016). Geomorphology of the Ampato volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Maps*, 12,1160-1169. doi: 10.1080/17445647.2016.1142479

Amick, D, Gelinas, R, Maurath, G, Cannon, R, Moore, D, Billington, E, & Kemppinen, H. (1990). *Paleoliquefaction features along the Atlantic seaboard* (Technical Report NUREG/CR-5613). Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission.

Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H. & Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de las fuentes de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998), región del volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín Sociedad Geológica del Perú,* 93, p. 63-71.

Autoridad Nacional del Agua (2012). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú.* Recuperado de https://es.calameo.com/read/0012719453af0e6eba3d7

Autoridad Nacional del Agua (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Camaná-Majes-Colca.* Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12543/7

Benavente, C., Carlotto, V. & Del Castillo, B. (2010). Extensión en el arco volcánico actual del sur del Perú. En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, 2010. *Resúmenes extendidos,* p.766-769. Lima: Sociedad Geológica del Perú.

Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. & Audin, L. (2017). *Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa* (Instituto Geológico

Minero y Metalúrgico, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 64). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/1223

Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 38,5-63.

Birkmann, S., Kienberger, S. & Alexander, D. (2014). *Assessment of vulnerability to natural hazards: A european perspective.* United Kingdom: Elsevier

Bisbal, A., Picón, J., Casaverde, M., Jáuregui, F., Anchayhua, R., Sánchez, R., y Masana M. (2006). *Manual Básico para la Estimación del Riesgo.* Recuperado del sitio de internet del Instituto Nacional de Defensa Civil, Direccion Nacional de Prevencion : http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319.htm

Burgos, V. & Salcedo, A. (2014). *Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información*. Presentado en el Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos – IFRH, 2, Ezeiza, Buenos Aires.

Caldas, J. (1993). *Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa: Hojas 32-r y 31-r* (INGEMMET, Boletín N ° 46 Serie A: Carta Geológica Nacional). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/166

Canada Centre for Remote Sensing (2013). *Fundamentals of remote sensing.* Ottawa, Ontario,Canada. Recuperado de https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/remote-sensing-tutorials/download/9333

Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa L., … Cueva E. (2009) Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 103, 1-89.

Centro Nacional de Estimacion, Prevencion y Reduccion del Riesgo de Desastres. (31 de diciembre de 2014). *Resolución Jefatural N° 112–2014–CENEPRED/J: Aprueba aprueba el "Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales", 2da Versión.* Lima, Peru.

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales", 2da versión.* Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf

Clark, R., Swayze, G., Gallagher, A., King T., Calvin W. (1993). *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 μm: U.S. Geological Survey Open File Report 93-592.* Recuperado de https://pubs.usgs.gov/of/1993/0592/report.pdf

Cobbing E., Ozard J. & Snelling, N. (1977). Reconnaissance geochronology of the crystalline basement rocks of the Coastal Cordillera of southern Peru. *Geological Society of America Bulletin*,88(2), p. 241-246.

Congreso de la Republica. (11 de febrero de 2011). *Ley N° 29664: Ley que crea el Sistema Nacional de Gestion del Riesgo de Desastres (SINAGERD)*. Lima, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Congreso de la Republica. (29 de mayo de 2012). *Ley N° 29869: Ley de Reasentamiento Poblacional para Zonas de Muy Alto Riesgo No Mitigable*. Lima, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Çorumluoğlu Ö., Vural, A. & Asri, İ. (2013). *PCA of landsat band ratio images for capturing Kula basalts in Turkey*. In: Proceedings of the Second International Conference on Water, Energy and the Environment. Kusadası, Turkey, September 21-24, p. 651.

DesInventar. (2013). *Perú - Inventario histórico de desastres*. [Archivo de datos]. Recuperado de: https://online.desinventar.org/desinventar/#PER-1250695241-peru_inventario_historico_de_desastres

Douglas, M. (1986) *How institutions think*. New York: Syracuse University Press

Felicísimo, A. (1992): *Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales*. (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo, España.

Fernández, D. & Lutz, M. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán province, Argentina, using GIS and multicriteria decisión análisis. *Engineering Geology*, 111, 90-98. doi: 10.1016/j.enggeo.2009.12.006

García, W. (1968). *Geología de los cuadrángulos de Mollendo y La Joya: Hojas 34r, 34s*. (Servicio de Geología y Minería, Boletín N °19). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/137

Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo C. (2002). *Ingeniería geológica.* Madrid, España: Prentice Hall

Google Earth Pro (7.3.3) [Software]. (2020). Recuperado de https://www.google.com/intl/es/earth/versions/

Guha-Sapir, D., Hoyois, Ph., Below, R. (2014). *Annual disaster statistical review 2013: The numbers and trends*. Brussels: CRED.

Hoempler, A. (1962). Valle de los volcanes de Andahua, Arequipa. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 37,59-69. doi: 10.2343/geochemj.18.233

Hunt, R. (2007). *Geologic Hazards: A field guide for geotechnical engineers.* Londres, Inglaterra: Taylor & Francis.

Jacay, J. (2005). Análisis de los depósitos de corrientes de alta densidad de la Formación Puente (cuenca de Arequipa), Sur del Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 8(16), 51-56.

Jenks, W. (1948). *Geología de la hoja de Arequipa al 200,000. Geology of the Arequipa Quadrangle of the Carta Nacional del Perú.* Lima, Perú.

Kaklamaros, J., Baise, L. y Boore D. (2011). Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGAGround-Motion Prediction Equations in Engineering Practice. Earthquake Spectra 27(4), p. 1219–1235. DOI: 10.1193/1.3650372.

Kaneoka, I. & Guevara, C. (1984). K-Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru. *Geochemical Journal*, 18(5), 233-239.

Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4): 406-421.

Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Barriga, R., Lauría, E., Souto, L. (2003). The Nazca-South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 125-131. doi: doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00028-2

Lockridge, P. (1985). *Tsunamis in Perú-Chile.* Boulder, Colorado: World Data Center A for Solid Earth Geophysics.

Loewy, S., Connelly, J., Dalziel, I. (2004). An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. *Geological Society of America Bulletin*, 116(1-2), 171-187. doi: 10.1130/B25226.1

Luzi, L, Puglia, R., Pacor, F., Gallipoli, M., Bindi, D. & Mucciarelli, M. (2011). Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to Vs30. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6): p. 1877-1898. doi: 10.1007/s10518-011-9274-2.

Mamani, M., Navarro, J., Carlotto, V., Acosta, H., Rodríguez, J., Jaimes, F., … Cereceda C. (2010). Arcos magmáticos meso-cenozoicos del Perú. En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, 2010. *Resúmenes extendidos,* p. 563-566. Lima: Sociedad Geológica del Perú.

Marocco, R., Delfaud, J. (1986). L'évolution du secteur de Cuzco-Arequipa (Pérou) expliquée à la lumière du modèle de rift intracontinental. Dans: *Réunion Annuelle des Sciences de la Terre*, 11, p. 121.

Ministerio de Economía y Finanzas. (5 de julio de 2012). *Resolucion Directorial N° 005-2012-EF/63.01: Aprueban Lineamientos para la Formulación de Proyectos de Inversión Pública de Apoyo al Desarrollo Productivo y de Prevención de Desastres*. Lima, Peru: Diario Oficial el Peruano.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Red Vial Departamental* [Archivo de datos]. Recuperado de:https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (24 de enero de 2016*). Decreto Supremo Nº 003-2016: Decreto supremo que modifica la norma técnica E.030 "Diseño sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones, aprobada por el Decreto Supremo Nº 011-2006*. Lima, Peru: Diario Oficial el Peruano.

Montz, B., Tobin, G., y Hagelman, R. (2017). *Natural Hazards: Explanation and Integration.* (2nd ed.) New York: The Guilford Press.

Narciso, J., Vilanova, S., Lopes, I., Oliveira, C., Carvalho, J., Carlos, P., … & Borges, J. (2012). Developing a site-conditions map for seismic hazard assessment in Portugal. En: World Conference on Earthquake Engineering, 15, Lisbon, Portugal, 2012.

Newell, N. (1949) Geology of the lake Titicaca region, Peru and Bolivia. *Geological Society of America Memoirs*, 36. doi: doi.org/10.1130/MEM36

Olarte, J. & López D. (2001). *Sismicidad y peligrosidad sísmica en la región sur-occidental del Perú*. (Informe del Programa Científico PC - CISMID 1999-2000).

Presidencia del Consejo de Ministros – Secretaria de Gestión del Riesgo de Desastres (2014). *Plan nacional de gestión del riesgo de desastres: PLANAGERD 2014-2024.* Recuperado de http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2018/01/ PLANAGERD.pdf

Presidencia del Consejo de Ministros. (13 de mayo de 2014). *Decreto Supremo N° 034-2014-PCM: Decreto Supremo que aprueba el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres PLANAGERD 2014-2021*. Lima, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (2 de noviembre de 2012). *Decreto Supremo N° 111-2012-PCM : Decreto Supremo que incorpora la Politica Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres como Política Nacional de obligatorio Cumplimiento para las entidades del Gobierno Nacional* . Lima, Peru: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (22 de agosto de 2013). *Resolucion Ministerial N° 334-2013-PCM : Aprueban Lineamientos Técnicos del Proceso de Prevención del Riesgo de Desastres*. Lima, Peru: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (23 de agosto de 2013). *Resolución Ministerial N°220-2013-PCM: Aprueba los Lineamientos Técnicos para el Proceso de Reducción del Riesgo de Desastres*. Lima, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (24 de octubre de 2013). *Decreto Supremo N° 115-2013-PCM : Reglamento de Ley N° 29869, Ley de Reasentamiento Problacional para Zonas de Muy Alto Riesgo no Mitigable*. LIma, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (26 de mayo de 2011). *Decreto Supremo N° 048-2011-PCM: Reglamento de Ley Nº 29664, del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*. Lima, Peru: Diario Oficial el Peruano.

Presidencia del Consejo de Ministros. (28 de diciembre de 2012). *Resolucion Ministerial N° 334-2012-PCM: Aprueban Lineamientos Técnicos del Proceso de Estimación del Riesgo de Desastres*. Lima, Perú: Diario Oficial el Peruano.

Quispesivana, L. & Navarro, P. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32-p), Chuquibamba (32-q), Chivay (32-s), Cailloma (31-s), Velille (30-s), Livitaca (29-s) y Pacapausa (30-p): Escala 1/100 000* (INGEMMET, Dirección de Geología Regional). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/2052

Ramos, V. (2008) The basement of the Central Andes: The Arequipa and related terrane. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 289-324. doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124304

Ramos, V. (2010). The Grenville-age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 77-91.doi: doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.004
Recuperado de: https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf

Renn, O. (2003). *The social amplification of risk*, Cambridge. United Kingdom: Cambridge University Press

Romero, D. & Ticona, P. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huambo (32-r): Escala 1/50 000* (INGEMMET, Dirección de Geología Regional). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/2056

Sébrier, M., Mercier, J.L., Mégard, F., Laubacher, G. & Carey- Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and state of stress in the Central Andes of South Perú. *Tectonics*, 4(7), p. 739-780.

Sempere, T., Carlier, G., Carlotto, V., Jacay, J., Jiménez, N., Rosas, S., … Boudesseul, N. (1999). Late Permian-Early Mesozoic rifts in Peru and Bolivia, and their bearing on Andean-age tectonics. In: *International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*, 4, 680-685.

Sempere, T., Noury, M., García, F. & Bernet, M. (2014). *Elementos para una actualización de la estratigrafía del Grupo Moquegua, sur del Perú*. En: Congreso Peruano de Geología, 17, Lima, 2014. Lima: Sociedad Geológica del Perú.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI (2002). *Mapa de clasificación climática*. Recuperado de https://debconsulting.weebly.com/peruacute-clasif-climat-senamhi---wt.html

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2018). Datos hidrometeorológicos [Archivo de datos] Recuperado de https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos

Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú: 1513-1974* (Instituto de Geología y Minería – Boletín N ° 3 Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/251

Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (2020). Falla Neótectonica [Archivo de datos] Recuperado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

Somerville, P. & Pitarka, A. (2006). Differences in earthquake source and ground motion characteristics between surface and buried crustal earthquakes. *Bulletin Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, 81(3-4), p.259-266.

Stewart, I.S. & Hancock, P.L. (1994). Neotectonics. In: Hancock, P. L., ed. *Continental deformation*, p. 370-409. New York: Pergamon Press.

Swanson, E. (1998). *Geology of the Orcopampa 30 minute quadrangle, southern Peru, with special focus on the evolution of the Chichón and Huayta Calderas (*Tesis Doctoral). University of Nevada, United States.

Tavera H. (2020). *Mapa Sísmico del Perú: Periodo 1960-2019* (Instituto Geofísico del Perú – Ministerio del Ambiente). Recuperado de http://scts.igp.gob.pe/unidad-sismologia/mapa-sismico

Tavera, H. & Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la Tierra*, 10, 187-219. Recuperado de http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/822

Tavera, H., Agüero, C., Fernández, E. & Rodríguez, S. (2001). *Catalogo sísmico del Perú: 1471-1982* (Instituto Geofísico del Perú - Dirección de Sismología). Recuperado de https://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/789

Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A. & Ishizawa, O. (2014). *Evaluación del Peligro Sísmico en Perú* (Instituto Geofísico del Perú - Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida). Lima: Perú.

Tavera, H., Martinez, J., Fernandez, E., Arredondo, L., Flores, C., & José, M. (2013). *Sismo de Huambo - Cabanaconde (Arequipa) del 17 de Julio, 2013 (5.7ML):Aspectos sismológicos* (Instituto Geofísico del Perú - Informe Tecnico N°:02-2013). Recuperado de http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/1088

Tavera, H., Millones, J., Fernandez, E., & Guardia, P. (2015). *Aspectos Sismológicos del Sismo de Cabanaconde (Arequipa) del 28 de febrero, 2015 (4.5ML): Aspectos sismológicos* (Instituto Geofísico del Perú - Informe Técnico Nº 01-2015) Recuperado de http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/1059

Thompson, E. & Silva, W.J. (2013). *Empirical assessment of site amplification and development of NEHRP factors for CEUS: c0ollaborative research with Pacific Engineering and Tufts University* (USGS, Final Technical Report, Earthquake Hazards Programs).

United Nation International Strategy of Disaster Reduction (2004). *Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives.*, Ginebra: EIRD.

USGS. (2019). Imagen Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 ID: LC08_L1TP_004071_ 20190815_ 20190820 _01_T1. Recuperado de https://earthexplorer.usgs.gov/

Vega, M. (2002). *La cuenca de antearco del sur del Perú: dinámica de la sedimentación y contexto geodinámico de la Formación Camaná y sus equivalentes off-shore*. (Tesis de Bachiller, Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco, Perú).

Vicente, J. (1990). Early Late Cretaceous overthrusting in the Western Cordillera of southern Peru. In: Ericksen, G.E., Cañas-Pinochet, M.T. & Reinemund, J.A., eds. *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources,* 11, p. 91-117. Houston, Texas: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series.

Vicente, J., Beaudoin, B., Chávez, A. & León, I. (1982). La cuenca de Arequipa (Sur Perú) durante el Jurásico- Cretácico inferior. *Actas del 5° Congreso Latinoamericano de Geología*, v. 1,121-153.

Walling, M., Silva, W., and Abrahamson, N. (2008). Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models, *Earthquake Spectra* 24(1), p. 243–255.

Wells, D. & Coppersmith, K. (1994). Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, ruptura area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), p. 974-1002.

Weng. Q. (2010). *Remote sensing and GIS integration: Theories, methods and applications.* New York: McGraw-Hill

Wills, C.J. & Clahan, K.B. (2006). Developing a map of geologically defined site-condition categories for California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), p. 1483-1501.

Yauri C., S., & Hilares M., J. (2015). *Estimación del Escenario de Riesgo por Sismos del Distrito de Cabanaconde y el anexo Pinchollo para implementar medidas de preparación en la Gestión de Riesgos de Desastres.* Instituto Nacional de Defensa Civil .

Zabala B., Vilchez M., Rosado M., Pari W. & Peña F. (2014). *Estudio geoamiental en la cuenca del Río Colca* (INGEMMET, Boletin Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 57). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/293

Zavala C., B., Vilchez M., M., & Rosado S., M. (2008). *Zonas Críticas por Peligros Geologicos en la cuenca del Rio Camaná-Majes-Colca.* Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Zavala, B., Churata, D. & Varela, F. (2019). *Geodiversidad y patrimonio geológico en el Valle del Colca* (INGEMMET, Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo N° 9). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12544/2114

ANEXOS

ANEXO 01

Proceso de Análisis Jerárquico

El Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) es un modelo matemático diseñado a fin de resolver problemas complejos de criterios múltiples, mediante la construcción de un modelo jerárquico, que permite a los investigadores estructural el problema de manera visual, fue desarrollado por Thomas L. Saaty en el año 1980. El objetivo central del PAJ es el proceso de asignar valores ponderados a los parámetros y descriptores relacionados con una decisión y la calificación final de las diferentes alternativas respecto de los criterios seleccionados. Saaty L. (1980) propuso una escala que relaciona los parámetros cualitativos y se les asigna una escala cuantitativa.

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACION
9	Absolutamente o muchísimo más importante que …	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que …	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante o preferido que el segundo.
5	Mas importante o preferido que…	Al comparar un elemento con otro el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que …	Al comparar un elemento con otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual o diferente a …	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que …	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que …	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que …	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

La ponderación de criterios y sub criterios cualitativos (programas de capacitación, aplicación de la normatividad, etc.) y cuantitativos (infraestructura expuesta, pérdidas humanas, económicas, etc.) que son considerados en la Gestión de Riesgo de Desastres, son analizados

por medio del PAJ a fin definir cuantitativamente la importancia de cada criterio en el análisis del riesgo. El proceso de ponderación se basa en la relación de los criterios de análisis utilizando la Matriz de Saaty, matemáticamente se puede expresar como una matriz cuadrada, la notación matemática de esta relación es la siguiente:

$$\boldsymbol{A=A_{ij}}$$

Metodología del cálculo de la ponderación

a. La matriz se construye a partir de comparaciones pareadas de los criterios de análisis por medio de la Matriz de Saaty, permitiendo determinar la importancia que tiene un criterio respecto al otro de manera cuantitativa.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

b. Se suman verticalmente los valores de los elementos de cada columna. Así se obtienen los valores:

$$\upsilon 1, \upsilon 2, \dots \upsilon n = \sum_{i=1}^{n} a_i$$

c. Se construye la matriz de comparaciones normalizada. La cual se obtiene al dividir cada elemento de la matriz entre la suma obtenida:

$$A = \begin{pmatrix} 1/v1 & a_{12}/v2 & \dots & a_{1n}/vn \\ a_{21}/v1 & 1/v2 & \dots & a_{2n}/vn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}/v1 & a_{n2}/v2 & \dots & 1/vn \end{pmatrix}$$

d. A continuación, se obtiene el vector prioridad, el cual nos mostrara los pesos ponderados de cada criterio a partir de la matriz normalizada, para esto se calcula el vector columna:

$$p = \begin{pmatrix} \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a_{1j} \\ \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a_{2j} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a_{nj} \end{pmatrix}$$

e. Y se obtiene el vector de prioridades de los criterios:

$$p = \begin{pmatrix} P_{C11} \\ P_{C12} \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ Pc_{1n} \end{pmatrix}$$

f. La suma de los elementos del vector principal debe ser igual a 1.

$$\sum_{i=1}^{n} p_{c1i} = p_{c11} + p_{c12} + \cdots + p_{c1n} = 1$$

Relación de Consistencia

La relación de consistencia indica la existencia de consistencia entre los juicios expresados. El coeficiente debe ser menor al 10% (RC< 0.1), lo que indica que los criterios utilizados para la comparación de pares es la más adecuada.

Para el cálculo de la relación de consistencia se multiplica cada valor de la primera columna de la matriz de comparación pareada por la prioridad relativa del primer elemento que se considera y asi sucesivamente. Se deben sumar los valores sobre las filas para obtener un vector de valores, denominado Vector Suma Ponderada (VSP):

$$\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} P_{C11} \\ P_{C12} \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ Pc_{1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VSP_{11} \\ VSP_{12} \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ VSP_{1n} \end{pmatrix}$$

Se divide los elementos del vector de suma ponderada entre el correspondiente valor de prioridad para cada uno de los criterios:

$$VSP_{11} / p_{c11} = \lambda_1$$
$$VSP_{12} / p_{c12} = \lambda_2$$
$$\cdots\cdots$$
$$\cdots\cdots$$
$$\cdots\cdots$$
$$VSP_{1n} / p_{c1n} = \lambda_n$$

Posteriormente se obtiene la lambda máxima λ_{max}

$$\lambda_{max} = (\lambda_1 + \lambda_{12} + \cdots + \lambda_n) / n$$

Para el cálculo del Índice de Consistencia (IC):

$$\boldsymbol{IC} = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

Para el cálculo de la relación de consistencia:

$$\boldsymbol{RC = IC/IA}$$

Donde:
IC = Índice de consistencia
IA = Índice Aleatorio para los diferentes "n"
El IA se obtiene a partir de la simulación estadística de 100,000 matrices realizada por Aguaron y Moreno Jiménez, (2001) son:

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484

Para matrices de tres parámetros la RC debe ser menor a 0.04, para matrices de cuatro parámetros la RC debe ser menor a 0.08 y para matrices mayores a cuatro deben ser menores a 0.1. CENEPRED (2014) ejemplifica el proceso de análisis jerárquico con el análisis de parámetros de peligrosidad sísmica en el anexo 06 de su manual. Toscano G. (2005) señala algunas de las ventajas del PAJ frente a otros métodos de decisión multicriterio:

a. Presenta un sustento matemático.
b. Permite desglosar y analizar un problema por partes.
c. Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
d. Incluir la participación de equipos multidisciplinarios y generar un consenso.
e. Permite verificar el índice de consistencia (IC) y hacer las correcciones, si fuere el caso.
f. Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
g. Ser de fácil uso y permitir que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

ANEXO 02
Matriz de peligrosidad

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
PELIGRO MUY ALTO	Relieve abrupto y escarpado, rocoso; cubierto en grandes sectores por nieve y glaciares. Tipo de suelo de rellenos sanitarios. Falta de cobertura vegetal 70 - 100 %. Uso actual de suelo Áreas urbanas, intercomunicadas mediante sistemas de redes que sirve para su normal funcionamiento. Tsunami: Grado = 4, magnitud del sismo mayor a 7, Intensidad desastroso. Vulcanismo: piroclastos mayores o igual a 1 000 000 000 m3, alcance mayor a 1000m, IEV mayor a 4. Descenso de Temperatura: Menor a -6°C, altitud 4800 - 6746msnm, nubosidad N = 0. El cielo estará despejado. Inundación: precipitaciones anómalas positivas mayor a 300%, cercanía a la fuente de agua Menor a 20m, intensidad media en una hora (mm/h) Torrenciales: mayor a 60. Sequia: severa, precipitaciones anómalas negativas mayor a 300%. Sismo: Mayor a 8.0: Grandes terremotos, intensidad XI y XII. Pendiente 30° a 45°, Zonas muy inestables. Laderas con zonas de falla, masas de rocas intensamente meteorizadas y/o alteradas; saturadas y muy fracturadas y depósitos superficiales inconsolidados y zonas con intensa erosión (cárcavas).	0.260≤R<0.503
PELIGRO ALTO	El relieve de esta región es diverso conformado en su mayor parte por mesetas andinas y abundantes lagunas, alimentadas con los deshielos, en cuya amplitud se localizan numerosos lagos y lagunas. Tipo de suelo arena Eólica y/o limo (con y sin agua). Falta de cobertura vegetal 40 - 70 %. Uso actual de suelo. Terrenos cultivados permanentes como frutales, cultivos diversos como productos alimenticios, industriales, de exportación, etc. Zonas cultivables que se encuentran en descanso como los barbechos que se encuentran improductivas por periodos determinados. Tsunami: Grado = 3, magnitud del sismo 7, Intensidad muy grande. Vulcanismo: piroclastos 100 000 000 m3, alcance entre 500 a 1000m, IEV igual a 3. Descenso de Temperatura: - 6 y -3°C, altitud 4000 - 4800msnm, nubosidad N es mayor o igual que 1/8 y menor o igual que 3/8, el cielo estará poco nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas 100% a 300%, cercanía a la fuente de agua Entre 20 y 100m, intensidad media en una hora (mm/h) Muy fuertes: Mayor a 30 y Menor o igual a 60. Sequia: moderada, precipitaciones anómalas negativas 100% a 300%. Sismo: 6.0 a 7.9: sismo mayor, intensidad IX y X. Pendiente 25° a 45°. Zonas inestables, macizos rocosos con meteorización y/o alteración intensa a moderada, muy fracturadas; depósitos superficiales inconsolidados, materiales parcialmente a muy saturados, zonas de intensa erosión.	0.134≤R<0.260
PELIGRO MEDIO	Relieve rocoso, escarpado y empinado. El ámbito geográfico se identifica sobre ambos flancos andinos. Tipo de suelo granulares finos y suelos arcillosos sobre grava aluvial o coluvial. Falta de cobertura vegetal 20 - 40 %. Uso actual de suelo Plantaciones forestales, establecimientos de árboles que conforman una masa boscosa, para cumplir objetivos como plantaciones productivas, fuente energética, protección de espejos de agua, corrección de problemas de erosión, etc. Tsunami: Grado = 2, magnitud del sismo 6.5, Intensidad grandes. Vulcanismo: piroclastos 10 000 000 m3, alcance entre 100 a 500m, IEV igual a 2. Descenso de Temperatura: -3°C a 0°C, altitud 500 - 4000msnm, nubosidad N es mayor o igual que 4/8 y menor o igual que 5/8, el cielo estará nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas 50% a 100%, cercanía a la fuente de agua Entre 100 y 500m, intensidad media en una hora (mm/h) Fuertes: Mayor a 15 y Menor o igual a 30. Sequia: ligera, precipitaciones anómalas negativas 50% a 100%. Sismo: 4.5 a 5.9: Puede causar daños menores en la localidad, intensidad VI, VII y VIII. Pendiente 20° a 30°, Zonas de estabilidad marginal, laderas con erosión intensa o materiales parcialmente saturados, moderadamente meteorizados.	0.068≤R<0.134
PELIGRO BAJO	Generalmente plano y ondulado, con partes montañosas en la parte sur. Presenta pampas, dunas, tablazos, valles; zona eminentemente árida y desértica. Tipo de suelo afloramientos rocosos y estratos de grava. Falta de cobertura vegetal 0 - 20 %. Uso actual de suelo Pastos naturales, extensiones muy amplias que cubren laderas de los cerros, áreas utilizables para cierto tipo de ganado, su vigorosidad es dependiente del periodo del año y asociada a la presencia de lluvias y/o Sin uso / improductivos, no pueden ser aprovechadas para ningún tipo de actividad. Tsunami: Grado = 0 o 1, magnitud del sismo menor a 6.5, Intensidad algo grandes y/o ligeras. Vulcanismo: piroclastos 1 000 000 m3, alcance menor a 100m, IEV menor a 1. Descenso de Temperatura: 0°C a 6°C, altitud menor a 3500msnm, nubosidad N es mayor o igual a 6/8 y menor o igual que 7/8, el cielo estará muy nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas menor a 50%, cercanía a la fuente de agua mayor a 1000m, intensidad media en una hora (mm/h) Moderadas: menor a 15. Sequia: incipiente, precipitaciones anómalas negativas menor a 50%. Sismo: menor a 4.4: Sentido por mucha gente, intensidad menor a V. Pendiente menor a 20°, Laderas con materiales poco fracturados, moderada a poca meteorización, parcialmente erosionadas, no saturados.	0.035≤R<0.068

ANEXO 03
Matriz de vulnerabilidad

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
VULNERABILIDAD MUY ALTA	Grupo etario: de 0 a 5 años y mayor a 65 años. Servicios educativos expuestos: mayor a 75% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: mayor a 60% del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: estera/cartón. Estado de conservación de la edificación: Muy malo. Topografía del terreno: 50% ≤P≤80%. Configuración de elevación de la edificación: 5 pisos. Incumplimiento de procedimientos constructivos de acuerdo a normatividad vigente: mayor a 80%. Localización de la edificación: Muy cerca 0 a 0.20km. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: mayor a 75%. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: mayor a 75%. Servicio de empresas de transporte expuesto: mayor a 75%. Área agrícola: mayor a 75%. Servicios de telecomunicación: mayor a 75%. Antigüedad de construcción: de 40 a 50 años. PEA desocupada: escaso acceso y la no permanencia a un puesto de trabajo. Organización y capacitación institucional: presentan poca efectividad en su gestión, desprestigio y aprobación popular. Deforestación: áreas sin vegetación, terrenos eriazos. Flora y fauna: 76 a 100% expuesta. Perdida de suelo: erosión provocada por lluvias. Perdida de agua: demanda agrícola y pérdida por contaminación.	0.260≤R<0.503
VULNERABILDIAD ALTA	Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios educativos expuestos: menor o igual a 75% y mayor a 50% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 60% y mayor a 35% del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: madera. Estado de conservación de la edificación: Malo. Topografía del terreno: 30% ≤P≤50%. Configuración de elevación de la edificación: 4. Actitud frente al riesgo: escasamente provisoria de la mayoría de la población. Localización de la edificación: cercana 0.20 a 1km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 75% y mayor a 50% del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: menor a 75% y mayor a 50%. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: menor o igual 75% y mayor a 50%. Servicio de empresas de transporte expuesto: menor o igual 75% y mayor a 50%. Servicios de telecomunicación: menor o igual 75% y mayor a 50%. Área agrícola: menor o igual 75% y mayor a 50%.	0.134≤R<0.260
VULNERABILIDAD MEDIA	Grupo etario: de 12 a 15 años y de 50 a 60 años. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios educativos expuestos: menor o igual a 50% y mayor a 25% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 35% y mayor a 20% del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: quincha (caña con barro). Estado de conservación de la edificación: Regular. Topografía del terreno: 20% ≤P≤30%. Actitud frente al riesgo: parcialmente provisoria de la mayoría de la población, asumiendo el riesgo sin implementación de medidas para prevenir. Localización de la edificación: medianamente cerca 1 a 3km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 50% y mayor a 25% del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75% del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: menor o igual a 25% y mayor a 10%. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: menor o igual a 50% y mayor a 25%.	0.068≤R<0.134
VULNERABILIDAD BAJA	Grupo etario: de 15 a 50 años. Grupo etario: de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios educativos expuestos: menor o igual a 25% del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 20% del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: ladrillo o bloque de cemento. Estado de conservación de la edificación: Bueno a muy bueno. Topografía del terreno: P ≤10%. Configuración de elevación de la edificación: menos de 2 pisos. Incumplimiento de procedimientos constructivos de acuerdo a normatividad vigente: menor a 40%. Actitud frente al riesgo: parcial y/o provisoria de la mayoría o totalidad de la población, implementando medidas para prevenir el riesgo. Localización de la edificación: alejada a muy alejada mayor a 3km.	0.035≤R<0.068

ANEXO 04
Matriz de riesgo

NIVEL	DESCRIPCION	RANGO
RIESGO MUY ALTO NO MITIGABLE	Indica que las medidas de reducción del riesgo son de muy alto costo o el proceso del fenómeno es indetenible, el cual debe ser sustentado en informes técnicos en donde se determine el nivel de peligrosidad elaborado por las instituciones técnicas científica respectiva. Población en extrema pobreza. Muy alto porcentaje de deserción escolar. Geología del suelo: zona muy fracturada, falla, etc. Organización poblacional nula. Zonas muy inestables. Laderas con zonas de falla, masas de rocas intensamente meteorizadas y/o alteradas; saturadas y muy fracturadas y depósitos superficiales inconsolidados y zonas con intensa erosión (cárcavas). No hay difusión en diversos medios de comunicación sobre Gestión del Riesgo.	
RIESGO MUY ALTO	Grupo Etario: De 0 a 5 años y mayor a 65 años (hombres y mujeres). Escaso acceso y no permanencia a un puesto de trabajo. Organización poblacional nula. Ingreso familiar promedio mensual menor a 149 soles. Población en extrema pobreza. Muy alto porcentaje de deserción escolar. No hay difusión en diversos medios de comunicación sobre Gestión del Riesgo. Edificaciones en muy mal estado. Estructura de quincha, caña y otros de menor resistencia, en/ estado precario. Edificaciones con más de 31 años. Viviendas sin abastecimiento de agua ni desagüe. Sistema de producción basada en actividad primaria extractiva sin tecnificación. Ambiental: terrenos sin vegetación. Erosión provocada por lluvias con pendientes pronunciadas. Demanda agrícola y perdida por contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Geología del suelo: zona muy fracturada, falla, etc. Localización de centros poblados muy cercana de 0 a 0.20km. Actitud fatalista y conformista de la población. No existen instrumentos legales locales que apoyen la reducción del riesgo. Relieve abrupto y escarpado, rocoso; cubierto en grandes sectores por nieve y glaciares. Tipo de suelo de rellenos sanitarios. Falta de cobertura vegetal 70 - 100 %. Uso actual de suelo Áreas urbanas, intercomunicadas mediante sistemas de redes que sirve para su normal funcionamiento. Tsunami: Grado = 4, magnitud del sismo mayor a 7, Intensidad desastroso. Vulcanismo: piroclastos mayores o igual a 1 000 000 000 m3, alcance mayor a 1000m, IEV mayor a 4. Descenso de Temperatura: Menor a -6°C, altitud 4800 - 6746msnm, nubosidad N = 0. El cielo estará despejado. Inundación: precipitaciones anómalas positivas mayor a 300%, cercanía a la fuente de agua Menor a 20m, intensidad media en una hora (mm/h) Torrenciales: mayor a 60. Sequia: severa, precipitaciones anómalas negativas mayor a 300%. Sismo: Mayor a 8.0: Grandes terremotos, intensidad XI y XII. Pendiente 30° a 45°, Zonas muy inestables. Laderas con zonas de falla, masas de rocas intensamente meteorizadas y/o alteradas; saturadas y muy fracturadas y depósitos superficiales inconsolidados y zonas con intensa erosión (cárcavas).	0.068≤R<0.253
RIESGO ALTO	Grupo Etario: De 5 a 12 años y de 60 a 65 años (hombres y mujeres). Bajo acceso y poca permanencia a un puesto de trabajo. Organización poblacional efímera. Ingreso familiar promedio mensual mayor a 149 y menor a 264 soles. Población en condición de pobreza. Alto porcentaje de deserción educativa. Escasa difusión en diversos medios de comunicación sobre temas de Gestión de Riesgo. Edificaciones en mal estado. Estructuras de madera, sin refuerzos estructurales. Edificaciones de 21 a 30 años. Viviendas con abastecimiento solo de desagüe. Sistema de producción bajo con muy pocas posibilidades de insertarse a un mercado competitivo. Ambiental: áreas de cultivo. Deforestación agravada, uso indiscriminado de suelos. Prácticas de consumo poblacional uso indiscriminado de riesgo. Geología del suelo: zona medianamente fracturada, suelos con baja capacidad portante. Localización de centros poblados cercana de 0.20 a 1km. Actitud escasamente previsora de la mayoría de la población. Existe poco interés en el desarrollo planificado del territorio del área en estudio que se presenta en casi todo el territorio. El relieve de esta región es diverso conformado en su mayor parte por mesetas andinas y abundantes lagunas, alimentadas con los deshielos, en cuya amplitud se localizan numerosos lagos y lagunas. Tipo de suelo arena Eólica y/o limo (con y sin agua). Falta de cobertura vegetal 40 - 70 %. Uso actual de suelo. Terrenos cultivados permanentes como frutales, cultivos diversos como productos alimenticios, industriales, de exportación, etc. Zonas cultivables que se encuentran en descanso como los barbechos que se encuentran improductivas por periodos determinados. Tsunami: Grado = 3, magnitud del sismo 7, Intensidad muy grande. Vulcanismo: piroclastos 100 000 000 m3, alcance entre 500 a 1000m, IEV igual a 3. Descenso de Temperatura: - 6 y -3°C, altitud 4000 - 4800msnm, nubosidad N es mayor o igual que 1/8 y menor o igual que 3/8, el cielo estará poco nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas 100% a 300%, cercanía a la fuente de agua Entre 20 y 100m, intensidad media en una hora (mm/h) Muy fuertes: Mayor a 30 y Menor o igual a 60. Sequia: moderada, precipitaciones anómalas negativas 100% a 300%. Sismo :6.0 a 7.9: sismo mayor, intensidad IX y X. Pendiente 25° a 45°. Zonas inestables, macizos rocosos con meteorización y/o alteración intensa a moderada, muy fracturadas; depósitos superficiales inconsolidados, materiales parcialmente a muy saturados, zonas de intensa erosión.	0.018≤R<0.068

RIESGO MEDIO	Grupo Etario: De 12 a 15 años y de 50 a 60 años (hombres y mujeres). Regular acceso y permanencia a un puesto de trabajo. Organización social limitada. Ingreso familiar promedio mensual entre 264 y 1200 soles. Población de clase media baja. Mediano porcentaje de deserción educativa. Difusión masiva y poco frecuente en diversos medios de comunicación sobre temas de Gestión del Riesgo. Edificaciones en regular estado. Estructura de adobe y piedra, sin refuerzos estructurales. Edificaciones de 16 a 20 años. Vivienda con solo abastecimiento de agua. Sistema de producción con algunos puntos que presentan competitividad. Ambiental: tierras dedicadas al cultivo de pastos. Protección inadecuada en los márgenes de corrientes de agua. Consumo industrial y minero, perdidas de evaporación y otros. Geología del suelo: zona ligeramente fracturada, suelos de mediana capacidad portante. Localización de centros poblados medianamente cercana de 1 a 3km. Actitud parcialmente provisoria de la mayoría de la población. Existe un interés tenue en el desarrollo planificado del territorio. Relieve rocoso, escarpado y empinado. El ámbito geográfico se identifica sobre ambos flancos andinos. Tipo de suelo granulares finos y suelos arcillosos sobre grava aluvial o coluvial. Falta de cobertura vegetal 20 - 40 %. Uso actual de suelo Plantaciones forestales, establecimientos de árboles que conforman una masa boscosa, para cumplir objetivos como plantaciones productivas, fuente energética, protección de espejos de agua, corrección de problemas de erosión, etc. Tsunami: Grado = 2, magnitud del sismo 6.5, Intensidad grandes. Vulcanismo: piroclastos 10 000 000 m3, alcance entre 100 a 500m, IEV igual a 2. Descenso de Temperatura: -3°C a 0°C, altitud 500 - 4000msnm, nubosidad N es mayor o igual que 4/8 y menor o igual que 5/8, el cielo estará nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas 50% a 100%, cercanía a la fuente de agua Entre 100 y 500m, intensidad media en una hora (mm/h) Fuertes: Mayor a 15 y Menor o igual a 30. Sequia: ligera, precipitaciones anómalas negativas 50% a 100%. Sismo: 4.5 a 5.9: Puede causar daños menores en la localidad, intensidad VI, VII y VIII. Pendiente 20° a 30°, Zonas de estabilidad marginal, laderas con erosión intensa o materiales parcialmente saturados, moderadamente meteorizados	0.005≤R<0.018
RIESGO BAJO	Generalmente plano y ondulado, con partes montañosas en la parte sur. Presenta pampas, dunas, tablazos, valles; zona eminentemente árida y desértica. Tipo de suelo afloramientos rocosos y estratos de grava. Falta de cobertura vegetal 0 - 20 %. Uso actual de suelo Pastos naturales, extensiones muy amplias que cubren laderas de los cerros, áreas utilizables para cierto tipo de ganado, su vigorosidad es dependiente del periodo del año y asociada a la presencia de lluvias y/o Sin uso / improductivos, no pueden ser aprovechadas para ningún tipo de actividad. Tsunami: Grado = 0 o 1, magnitud del sismo menor a 6.5, Intensidad algo grandes y/o ligeras. Vulcanismo: piroclastos 1 000 000 m3, alcance menor a 100m, IEV menor a 1. Descenso de Temperatura: 0°C a 6°C, altitud menor a 3500msnm, nubosidad N es mayor o igual a 6/8 y menor o igual que 7/8, el cielo estará muy nuboso. Inundación: precipitaciones anómalas positivas menor a 50%, cercanía a la fuente de agua mayor a 1000m, intensidad media en una hora (mm/h) Moderadas: menor a 15. Sequia: incipiente, precipitaciones anómalas negativas menor a 50%. Sismo: menor a 4.4: Sentido por mucha gente, intensidad menor a V. Pendiente menor a 20°, Laderas con materiales poco fracturados, moderada a poca meteorización, parcialmente erosionadas, no saturados. Grupo Etario: De 15 a 50 años (hombres y mujeres). Alto acceso y permanencia a un puesto de trabajo. Organización social activa. Ingreso familiar promedio mensual mayor a 1200 soles. Población económicamente sostenible. Escaso porcentaje de deserción educativa. Difusión masiva y frecuente en medios de comunicación en temas de Gestión del Riesgo. Edificaciones en buen estado. Estructura de concreto armado y acero, con adecuadas técnicas de construcción. Edificaciones menores a 15 años. Viviendas con abastecimiento de agua y desagüe. Sistema de producción del área en estudio presenta importante inserción a la competitividad. Ambiental: áreas de bosques. Factor cultivo y contenido en sales ocasiona pérdidas por desertificación. Geología del suelo: zona sin fallas ni fracturas, suelos con buenas características geotécnicas. Localización de centros poblados muy alejada mayor a 5km. Actitud previsora de toda la población, implementando diversas medidas para prevenir el riesgo. El desarrollo planificado del territorio, es un eje estratégico de desarrollo.	0.001≤R<0.005

ANEXO 05

DEFINICIONES DEL MODELO DE ATENUACION DE ABRAHAMSON Y SILVA (2007)

ECUACION PARA EL MOVIMIENTO MEDIO DEL SUELO:

$$\text{Ln Sa(g)} = f_1(\text{M}, \text{R}_{rup}) + a_{12}\text{F}_{\text{RV}} + a_{13}F_{NM} + a_{15}F_{AS} + f_5(\text{PGA}_{1100}, \text{VS}_{30})$$

$$+ \text{F}_{\text{HW}}\, f_4(\text{R}_{\text{jb}}, \text{R}_{\text{rup}}, \text{R}_{\text{x}}, \text{W}, \delta, \text{Z}_{\text{TOR}}, \text{M}) + f_6(\text{Z}_{\text{TOR}}) + f_8(\text{R}_{\text{rup}}, \text{M}) + f_{10}(\text{Z}_{1.0}, \text{V}_{\text{S30}})$$

Las funciones representadas por *f1, f4, f5, f6, f7, f8, f10 y Rrup, Rjb, Rx* se definen de la siguiente forma:

MODELO BASE (f_1)

Es la formulación base que relaciona la magnitud y distancia epicentral y se presenta como:

$$f_1(M, R_{rup}) = \begin{cases} a_1 + a_4(M - c_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - c_1)]\ln(R) & for\ M \leq c_1 \\ a_1 + a_5(M - c_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - c_1)]\ln(R) & for\ M > c_1 \end{cases}$$

donde:

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_4^2}.$$

MODELO DE RESPUESTA DEL SITIO (f_5)

Este modelo representa los valores de atenuación del suelo en función del tipo de roca y suelo, y su comportamiento frente a un movimiento sísmico:

$$f_5(P\hat{G}A_{1100}, V_{S30}^{*}) = \begin{cases} a_{10}\ln\left(\dfrac{V_{S30}^{*}}{V_{LIN}}\right) - b\ln(P\hat{G}A_{1100} + c) & \\ \quad + b\ln\left(P\hat{G}A_{1100} + c\left(\dfrac{V_{S30}^{*}}{V_{lin}}\right)^{n}\right) & for\ V_{S30} < V_{LIN} \\ (a_{10} + bn)\ln\left(\dfrac{V_{S30}^{*}}{V_{LIN}}\right) & for\ V_{S30} \geq V_{LIN} \end{cases}$$

donde:

$$V_{S30}^{*} = \begin{cases} V_{S30} & for\ V_{S30} < V_1 \\ V_1 & for\ V_{S30} \geq V_1 \end{cases}$$

y:

$$V_1 = \begin{cases} 1500\ \text{m/s} & for\ T \leq 0.50\ \text{sec} \\ \exp[8.0 - 0.795\ln(T/0.21)] & for\ 0.50\ \text{sec} < T \leq 1\ \text{sec} \\ \exp[6.76 - 0.297\ln(T)] & for\ 1\ \text{sec} < T < 2\ \text{sec} \\ 700\ \text{m/s} & for\ T \geq 2\ \text{sec} \\ 862\ \text{m/s} & for\ PGV \end{cases}$$

Los términos b,c,n,V_{LIN} fueron obtenidos en base a los resultados del modelo de respuesta analítica 1-D usando el modelo "Peninsula Range Soil Model" elaborado por Walling et al. (2008), el termino a_{10} fue estimado en el análisis de regresión.

MODELO DE LA PARED COLGANTE(f_4)

El modelo representa la influencia de la ubicación del punto de interés con respecto a la proyección de la falla en superficie, el cual tiene un efecto mayor en el lado de la proyección del plano de falla:

$$f_4(R_{jb},R_{rup},\delta,Z_{TOR},M,W) = a_{14}T_1(R_{jb})T_2(R_x,W,\delta)T_3(R_x,Z_{TOR})T_4(M)T_5(\delta)$$

.

donde:

$$T_1(R_{jb}) = \begin{cases} 1-\dfrac{R_{jb}}{30} & for\ R_{jb} < 30\ \text{km} \\ 0 & for\ R_{jb} \geqslant 30\ \text{km} \end{cases}$$

$$T_2(R_x,W,\delta) = \begin{cases} 0.5+\dfrac{R_x}{2W\cos(\delta)} & for\ R_x \leqslant W\cos(\delta) \\ 1 & for\ R_x > W\cos(\delta), or\ \delta = 90 \end{cases}$$

$$T_3(R_x,Z_{TOR}) = \begin{cases} 1 & for\ R_x \geqslant Z_{TOR} \\ \dfrac{R_x}{Z_{TOR}} & for\ R_x < Z_{TOR} \end{cases}$$

$$T_4(M) = \begin{cases} 0 & for\ M \leqslant 6 \\ M-6 & for\ 6 < M < 7 \\ 1 & for\ M \geqslant 7 \end{cases}$$

$$T_5(\delta) = \begin{cases} 1-\dfrac{\delta-70}{20} & for\ \delta \geqslant 70 \\ 1 & for\ \delta < 70 \end{cases}$$

Los términos T_1, T_2, T_3 fueron obtenidos en base a simulaciones de roca 1-D obtenidas de data previa, los términos T_4 y T_5 fueron obtenidos en base a eventos bien registrados de efectos de pared colgante. El termino a14 fue estimado en el análisis de regresión.

MODELO DE PROFUNDIDAD DEL TOPE DEL PLANO DE RUPTURA (f_6)

Diferencias sustanciales de los efectos de movimientos del suelo por el efecto de la profundidad con referencia al tope de falla fueron propuestos por Somerville & Pitarka (2006). Para la incorporación de estos efectos en el modelo se obtuvo una correlación entre la magnitud y la profundidad del tope del plano de ruptura, terremotos de gran magnitud tienen a generar rupturas en la superficie mientras que terremotos de baja magnitud generan rupturas en profundidad. En base a esta correlación se aplica el siguiente modelo.

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} \dfrac{a_{16} Z_{TOR}}{10} & for\ Z_{TOR} < 10\ \text{km} \\ a_{16} & for\ Z_{TOR} \geqslant 10\ \text{km} \end{cases}$$

MODELO PARA LAS DISTANCIAS LARGAS(f_8)

Se incluye una variable que modela el efecto del movimiento del suelo para distancias largas (>100 km) donde los catálogos sísmicos están incompletos, sobre todo para registros de sismos de magnitudes bajas (M= 4-5). La variable a partir de la cual se realiza el modelamiento es *Rrup* que se define como la distancia al plano de ruptura.

$$f_8(R_{rup}, M) = \begin{cases} 0 & for\ R_{rup} < 100\ \text{km} \\ a_{18}(R_{rup} - 100) T_6(M) & for\ R_{rup} \geqslant 100\ \text{km} \end{cases}$$

donde:

$$T_6(M) = \begin{cases} 1 & for\ M < 5.5 \\ 0.5(6.5 - M) + 0.5 & for\ 5.5 \leqslant M \leqslant 6.5 \\ 0.5 & for\ M > 6.5 \end{cases}$$

MODELO PARA LA PROFUNDIDAD DEL SUELO (*f10*)

Para modelar el efecto que producen los diferentes espesores de cada suelo se incluye la variable *Z1.0* que significa la profundidad a la cual se encuentra un suelo más consistente con una velocidad de las ondas de corte de 1.0 km/s.

$$f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) = a_{21} \ln\left(\frac{Z_{1.0} + c_2}{\hat{Z}_{1.0}(V_{S30}) + c_2}\right) + \begin{cases} a_{22} \ln\left(\dfrac{Z_{1.0}}{200}\right) & for\ Z_{1.0} \geqslant 200 \\ 0 & for\ Z_{1.0} < 200 \end{cases}$$

Donde $Z_{1.0}(V_{S30})$ es la mediana de Z1.0 (en metros) dada por:

$$\ln(\hat{Z}_{1.0}(V_{S30})) = \begin{cases} 6.745 & for\ V_{S30} < 180\ \text{m/s} \\ 6.745 - 1.35 \ln\left(\dfrac{V_{S30}}{180}\right) & for\ 180 \leqslant V_{S30} \leqslant 500\ \text{m/s} \\ 5.394 - 4.48 \ln\left(\dfrac{V_{S30}}{500}\right) & for\ V_{S30} > 500\ \text{m/s} \end{cases}$$

$$a_{21} = \begin{cases} 0 & for\ V_{S30} \geq 1000 \\ \dfrac{-(a_{10}+bn)\ln\left(\dfrac{V^*_{S30}}{\min(V_1,1000)}\right)}{\ln\left(\dfrac{Z_{1.0}+c_2}{\hat{Z}_{1.0}+c_2}\right)} & for\ (a_{10}+bn)\ln\left(\dfrac{V^*_{S30}}{\min(V_1,1000)}\right) \\ & \quad + e_2 \ln\left(\dfrac{Z_{1.0}+c_2}{\hat{Z}_{1.0}+c_2}\right) < 0 \\ e_2 & otherwise \end{cases}$$

$$e_2 = \begin{cases} 0 & for\ T < 0.35\ \text{sec}\ or\ V_{S30} > 1000 \\ -0.25\ln\left(\dfrac{V_{S30}}{1000}\right)\ln\left(\dfrac{T}{0.35}\right) & for\ 0.35 \leq T \leq 2\ \text{sec} \\ -0.25\ln\left(\dfrac{V_{S30}}{1000}\right)\ln\left(\dfrac{2}{0.35}\right) & for\ T > 2\ \text{sec} \end{cases}$$

y:

$$a_{22} = \begin{cases} 0 & for\ T < 2\ \text{sec} \\ 0.0625(T-2) & for\ T \geq 2\ \text{sec} \end{cases}$$

La descripción detallada de los parámetros usados en este modelo se encuentra en las tablas 3,4, 5a y 5b de Abrahamson y Silva (2008), una metodología del cálculo de los parámetros necesarios basado en relaciones empíricas son propuestas por Kaklamaros, J., Baise, L. y Boore D. (2011).
Finalmente, para la estimación de la velocidad de ondas de corte (Vs30), tomamos en cuenta la recopilación hecha por Benavente et al. (2017) obtenida de trabajos realizados por Thompson & Silva (20013), Wills & Clahan (2006), Narciso et al. (2012) y Luzi et al. (2011).

Vs30	Descripción
180.00	Depósitos de suelos medianamente sueltos a no cohesivos (con o sin algunas capas cohesivas suaves) o suelo ligeramente cohesivo.
209.00	Depósitos aluviales del Cuaternario (Holoceno). Considerando aluvión mayor de 30 m.
236.00	Aluviones en zonas de finos del Cuaternario (Holoceno).
244.50	Aluviones, lodo, arenas, arcilla, limo y las dunas de arena (Holoceno).
302.00	Depósitos de arena del Cuaternario (Pleistoceno).
309.00	Sedimentos eólicos. Sedimentos calcáreos biológicos. Sedimentos en zonas costeras de grano fino a medio. Sedimentos eólicos, en su mayoría de loess. Material orgánico rico en lodo y turba. Materiales residuales desarrolladas en aluvial. Sedimentos de playa. Sedimentos lacustres.
387.00	Depósitos aluviales del Cuaternario (Pleistoceno).
390.00	Unidades de lutitas y limolitas de Neógeno (Mioceno y Plioceno).
455.00	Depósitos aluviales del Neógeno al Cuaternario (Plioceno-Pleistoceno).
515.00	Materiales residuales desarrollados en rocas ígneas y metamórficas. Materiales residuales desarrollados en rocas sedimentarias, estratificación discontinua. Materiales residuales desarrollados en rocas sedimentarias de grano fino. Sedimentos coluviales, sedimentos coluviales discontinuos, potencia delgada. Sedimentos coluviales y aluviales, sedimentos coluviales y loess. Sedimentos coluviales y el material residual. Materiales residuales desarrollados en rocas sedimentarias, potencia delgada. Materiales residuales desarrollados en rocas carbonatadas, estratificación discontinua. Materiales residuales desarrollados en lecho de roca, con sedimentos aluviales, estratificación discontinua. Materiales residuales desarrollados en lecho de roca, con sedimentos aluviales, potencia delgada. Unidades de arenisca del Paleógeno y Neógeno (Eoceno, Oligoceno y Mioceno).
524.44	Areniscas, gravas, arenas y arcillas del Plioceno
545.46	Arena, areniscas, arcillas y conglomerados del Mioceno
566.00	Areniscas del Cretáceo.
609.00	Unidades volcánicas del Paleógeno y Neógeno.
748.00	Rocas ígneas del Cretáceo.
782.00	Pizarras, rocas volcánicas y areniscas ligeramente metamorfizadas.
812.50	Rocas ígneas y metamórficas.
1425.00	Calizas, calizas margosas, dolomitas, conglomerados y areniscas del Mesozoico y Paleógeno.
2000.00	Rocas volcánicas basálticas y andesíticas. Rocas volcánicas riolíticas.
Clasificación de acuerdo a las condiciones litológicas de sitio según la velocidad de las ondas de corte (Vs30). Tomado y modificado de Thompson & Silva (2013), Wills & Clahan (2006), Narciso *et al*. (2012) y Luzi *et al*. (2011)	