

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7343

EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE CERRO COLORADO

Departamento Arequipa
Provincia Arequipa
Distrito Cerro Colorado



DICIEMBRE
2022

EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE CERRO COLORADO

(Distrito de Cerro Colorado, provincia Arequipa, departamento Arequipa)

Elaborado por la
Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo
Geológico del
INGEMMET

Equipo de investigación:

Nélida Manrique Llerena

David Arteaga Utani

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022) - *Evaluación de peligro geológico por lahares (huaycos) en el distrito de Cerro Colorado, provincia Arequipa, departamento Arequipa*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7343, 57 p.

INDICE

RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Objetivos	9
Antecedentes y trabajo anteriores	10
2. DEFINICIONES	15
2.1. Erupción volcánica	15
2.2. Complejo Volcánico Chachani	15
2.3. Lahares	16
2.4. Corriente de densidad piroclástica (PDC)	18
3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO	18
3.1. Pendiente del terreno	18
3.2. Unidades geomorfológicas	19
4. CONTEXTO GEOLÓGICO	22
4.1. Unidades Litoestratigráficas	23
5. PELIGROS GEOLÓGICOS	25
5.1. Peligros geológicos por flujo de detritos (lahares)	25
5.2. Factores condicionantes	35
5.3. Factores desencadenantes	35
6. SIMULACIONES DE FLUJOS POR LAHARES	36
6.1. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares	36
6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)	39
6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Cerro Colorado	40
7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR LAHARES	40
7.1. Simulación en la quebrada Azufral	43
7.2. Simulación en la quebrada El Azufral	45
7.3. Simulación en la quebrada Estanquillo	46
7.4. Simulación en la quebrada Ñashuayco	47
7.5. Simulación en la quebrada Río Seco	49
7.7. Simulación en la quebrada Municipal	50
7.8. Simulación en la quebrada Apipa	51
7.9. Simulación en la quebrada José Bustamante y Rivero	52
7.10. Simulación en la quebrada Escalerilla 3	53
8. CONCLUSIONES	55
9. RECOMENDACIONES	56

BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXO: MAPAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del distrito de Cerro Colorado, provincia y región Arequipa, según el Instituto Geográfico Nacional - IGN.	11
Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).	15
Figura 3. Erupción volcánica del volcán Sabancaya.	15
Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani.	16
Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L, que describen la extensión de la zona de peligro proximal. A y B, describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).	17
Figura 6. Lahares primarios generados en el volcán Ampato. Fuente: Google Earth. ...	17
Figura 7. Lahares secundarios en el flanco oeste del volcán Ubinas. Fuente: Google Earth.	17
Figura 8. Estratovolcán Glaciado, edificio Chachani.	19
Figura 9. Domo La Horqueta y domos-colada Potrero.	20
Figura 10. Domos-colada Potreros, ubicados al suroeste del Complejo Volcánico Chachani.	21
Figura 11. Planicie ignimbrítica surcada por quebradas.	21
Figura 12. El Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón y las viviendas del distrito Cerro Colorado sobre la planicie aluvial.	22
Figura 13. Depósitos de ignimbrita Aeropuerto de Arequipa.	23
Figura 14. Depósitos de flujos de lava Potrero, las que preservan bordes de encauzamiento (levées) y cordones o cuerdas de flujo.	24
Figura 15. Morrenas neoglaciares del estratovolcán Estribo.	25
Figura 16. Mapa de ubicación de las secciones transversales y columna estratigráfica de las quebradas en el distrito de Cerro Colorado.	26
Figura 17. Quebrada Azufral, confluencia de Lari Lari y Tucos con Gamarra (Coordenadas UTM WGS84 227266 E, 8192430 N).	27
Figura 18. Quebrada Azufral, observándose los depósitos de PDC de bloques y ceniza intercalados con depósitos pómez retrabajado, con pendientes muy escarpadas (Coordenadas UTM WGS84 226924 E, 8191431 N).	27
Figura 19. Sección transversal de la quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) (Coordenadas UTM WGS84 227948 E, 8195021 N).	28
Figura 20. Perfil transversal de la quebrada El Botadero en dirección O-E (Coordenadas UTM WGS84 227532 E, 8196678 N).	28
Figura 21. Quebrada El Azufral, se observa las laderas con pendiente fuerte (Coordenadas UTM WGS84 224598 E, 8192709 N).	29
Figura 22. Perfil transversal de la quebrada El Azufral en dirección NE-SE (Coordenadas UTM WGS84 225903 E, 8193879 N).	29
Figura 23. Perfil transversal de la quebrada Estanquillo en confluencia con la quebrada El Azufral (Coordenadas UTM WGS84 223540 E, 8191813 N).	30
Figura 24. Columna estratigráfica en la quebrada Estanquillo, cercano a la confluencia con la quebrada El Azufral (Coordenadas UTM WGS84 223540 E, 8191813 N).	30
Figura 25. Perfil transversal de la quebrada Añashuayco (Coordenadas UTM WGS84 221479 E, 8189469 N).	31

Figura 26. Ladera al margen izquierdo de la quebrada Añashuayco, observándose la IAA (unidad blanca y rosada) y los depósitos de lahares antiguos en la parte superior (Coordenadas UTM WGS84 220838 E, 8189103 N).....	31
Figura 27. Quebrada Rio Seco, aflorando en las laderas la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa (Coordenadas UTM WGS84 221644 E, 8186795 N).	32
Figura 28. Quebrada La Paccha, afloramiento de la IAA, con depósitos de lahares en la parte superior (Coordenadas UTM WGS84 221813 E, 8191025 N).....	32
Figura 29. Quebrada Municipal cerca al campo deportivo (Coordenadas UTM WGS84 222788 E, 8194220 N).....	33
Figura 30. Quebrada Apipa, observándose en el margen derecho muros, además la quebrada presenta pendientes fuertes a muy fuertes (~50 m) (Coordenadas UTM WGS84 222502 E, 8193528 N).	34
Figura 31. Quebrada José Bustamante y Rivero, laderas parcialmente cubiertas por material de desmonte y basura (Coordenadas UTM WGS84 222124 E, 8193626 N). .	34
Figura 32. Quebrada Escalerilla 3 (parte alta), observándose laderas con pendientes muy fuertes con depósitos de bloques y ceniza (Coordenadas UTM WGS84 219998 E, 8192994 N).	35
Figura 33. Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y lahares secundarios. (tomado de Soncco., Y. et al 2021. Libro de resúmenes extendidos XX Congreso Peruano de Geología, (2021)).	38
Figura 34. Mapa de lahares del distrito de Cerro Colorado.	40
Figura 35. Mapa de puntos críticos en las quebradas del distrito de Cerro Colorado...	43
Figura 36. Simulación de lahares (peligros bajo, moderado y alto) en la quebrada Azufral.	44
Figura 37. Cruce afirmado en el sector alto de la quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 227498 E, 8193323 N).	44
Figura 38. Puente (Punto crítico), construido sobre depósitos de desmonte, quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 226994 E, 8191713 N).....	45
Figura 39. Campo deportivo (Punto crítico) cercano al margen izquierdo de la quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 227026 E, 8191806 N).	45
Figura 40. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada El Azufral.	46
Figura 41. Cruce afirmado (punto crítico) en la quebrada El Azufral, alcantarillas o pontones parcialmente cubiertos por basura (Coordenadas UTM WGS84 225080 E, 8193159 N).	46
Figura 42. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Estanquillo.	47
Figura 43. Cruce afirmado, observándose cerca al cauce viviendas prefabricadas y material de desmonte, quebrada Estanquillo (Coordenadas UTM WGS84 223655 E, 8193226 N).	47
Figura 44. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Añashuayco.	48
Figura 45. Puente Añashuayco (Punto crítico) con depósito de desmonte y basura en las laderas y lahares recientes en el cauce (Coordenadas UTM WGS84 223480 E, 8191634 N).	48
Figura 46. Cruce (punto crítico) en la Quebrada Añashuayco (Coordenadas UTM WGS84 221731 E, 8189604 N).	48
Figura 47. Cauce de la quebrada Añashuayco en el sitio recreacional-turístico (Coordenadas UTM WGS84 221337 E, 8189495 N).....	49

Figura 48. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Río seco.....	49
Figura 49. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada La Paccha.	50
Figura 50. Punto crítico: Cruce afirmado construido sobre material de desmonte y relleno (Coordenadas UTM WGS84 222628 E, 8191407 N).	50
Figura 51. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Municipal.....	51
<i>Figura 52. Campo deportivo (punto crítico) construido sobre una de las bifurcaciones de la quebrada Municipal, se encuentra con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 222821 E, 8194247 N).....</i>	<i>51</i>
Figura 53. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Apipa.	52
Figura 54. Cruce afirmado (punto crítico), se observa relleno por depósitos antrópicos (desmonte y basura) (Coordenadas UTM WGS84 222521 E, 8193501 N).	52
Figura 55. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada José Bustamante y Rivero.....	52
Figura 56. Punto crítico: Cruce afirmado en la quebrada José Bustamante y Rivero con muros que llegan hasta el cauce de la quebrada (Coordenadas UTM WGS84 222124 E, 8193626 N).	53
Figura 57. Simulación de lahares en la quebrada Escalerilla 3.	53
Figura 58. Estación de grifo, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad alto (Coordenadas UTM WGS84 220859 E, 8195052 N).	54
Figura 59. I.E. San Maximiliano María Kolbe, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 220981 E, 8194921 N).	54
Figura 60. I.E. San Miguel Arcángel, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 220921 E, 8194778 N).....	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenada de la plaza Las Américas, del distrito de Cerro Colorado, provincia y región de Arequipa.....	11
Cuadro 2. Rutas y accesos al distrito de Cerro Colorado, provincia y departamento de Arequipa.	11
Cuadro 3. Población urbana y rural, según distritos, 2017. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.	12
Cuadro 4. Viviendas particulares, según área urbana, rural y tipo de vivienda del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.	12
Cuadro 5. Material de construcción en las paredes de las viviendas del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.	13
Cuadro 6. Material de construcción en los techos de las viviendas del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.	13
Cuadro 7. PEA de 14 a más años de edad, por grupos de edad y ocupación principal. Fuente INEI - Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda.	14

Cuadro 8. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Cerro Colorado, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta).....	39
Cuadro 9. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan áreas urbanas en el distrito de Cerro Colorado.....	42

RESUMEN

El presente informe es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por lahares en las 11 quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani realizado en el distrito de Cerro Colorado, provincia y departamento de Arequipa. Con este trabajo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Ingemmet, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica en peligros geológicos, para los tres niveles de gobierno (local, regional y nacional).

La población de Cerro Colorado se encuentra asentado sobre geoformas de carácter volcánico entre ellas se tienen estratovolcán, estratovolcán glaciado, planicie piroclástica y volcanoclástica, planicie ignimbrítica, ladera piroclástica y volcanoclástica, flujo de lava en bloques del pleistoceno tardío y domo; geoformas de carácter fluvial y deposicional como abanico de deshielo, abanico aluvial y planicie aluvial; geoformas de carácter glacial como morrena anterior al máximo avance glacial y morrena Neoglacial.

Los depósitos condicionantes para la ocurrencia de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Cerro Colorado, son depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza correspondiente a la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa conformada por dos unidades, la primera (color blanco) se encuentra bien consolidado con moderada erosión, la segunda (color salmón) menos compacto y altamente erosionable, también se tienen depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza correspondientes al edificio Potrero y Cabrerías, con bloques angulosos, fracturados, de tamaños decimétricos de moderada erosión ubicándose en las cabeceras de las cuencas y depósitos aluviales con clastos subredondeados de origen lávico y heterométricos envueltos en matriz arenosa gruesa a fina, permeables, con contenidos de limos y arcillas.

Los trabajos de campo en el distrito de Cerro Colorado se realizaron en coordinación con la municipalidad distrital de Cerro Colorado, identificándose 11 quebradas. Se realizó la evaluación técnica de 10 quebradas que recorren el distrito de Cerro Colorado.

En el distrito de Cerro Colorado, se presentan 43 puntos críticos dentro de las cuales se encuentran 9 instituciones educativas (inicial, primario y secundario), 6 campos deportivos, 1 sitio recreacional (cantera de Añashuayco), 1 puente, 1 Estación de grifo y 25 cruces afirmados, representando peligro de nivel bajo, moderado y alto; en caso ocurriera un peligro de este tipo, dañaría de forma directa e indirectamente estas infraestructuras y a la población del distrito.

Finalmente, se brinda algunas recomendaciones a fin de que las autoridades competentes pongan en práctica, tales como: evitar la construcción de infraestructuras o viviendas en zonas de alto peligro no mitigable; implementar medidas estructurales para el control de flujo de detritos y proponer la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT).

1. INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVCA), es uno de los trece volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú (de Silva y Francis, 1991). La subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana ha generado la existencia de un arco volcánico calco-alcalino desde el Jurásico al reciente, situado sobre la cordillera occidental de los Andes.

La historia geológica del Complejo Volcánico Chachani evidencia que su actividad ha sido explosiva y efusiva, generando depósitos de tefra, flujos de lava, flujos de domo, corrientes de densidad piroclástica y lahares. Aunque el Chachani es considerado un volcán potencialmente activo no se descarta una posible erupción que podría generar muchos daños a la población de la ciudad de Arequipa, ya que los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado y Yura se encuentran asentados en los alrededores de este complejo.

Aún, cuando los volcanes Misti y Chachani no se encuentran en proceso eruptivo, las quebradas que descienden del Chachani, se encuentran susceptibles a activarse y canalizar lahares que ponen en peligro alrededor de 25% de toda la población de la ciudad y dañar infraestructuras de los distritos antes mencionados. Además, se tiene conocimiento que en febrero y marzo del 2020, las intensas lluvias generaron flujos de detritos (lahares), produciendo el colapso y daño de 70 viviendas, colegios, carreteras y la cantera de Añashuayco (sitio turístico), que dejó 32 familias afectadas (Fuente: El Comercio).

El distrito de Cerro Colorado se encuentra asentado sobre depósitos volcánicos de los volcanes Misti y Chachani que conforman el Complejo Volcánico Chachani (CVC), por donde descienden quebradas que atraviesan el área urbana del distrito. La mayor parte del año las quebradas están secas debido al clima árido de Arequipa, sin embargo, durante los periodos de lluvias está quebradas se reactivan generando lahares que afectan infraestructura y viviendas de la población que están asentadas en el cauce o alrededores de las quebradas.

El presente estudio “Evaluación de peligro geológico por lahares (huaico) en el distrito de Cerro Colorado”, referido al complejo volcánico Chachani forma parte del proyecto de investigación GA-17F: “Estudiar y evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri” efectuado por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico del INGEMMET a través del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET. En él, se busca estudiar y evaluar los peligros por lahares en las quebradas que descienden del CVC e identificar puntos críticos en el distrito de Cerro Colorado.

1.1. Objetivos

- a) Realizar la identificación y tipificación de los peligros geológicos en las quebradas que se encuentran en el distrito de Cerro Colorado.
- b) Realizar la simulación de flujos en las quebradas que recorren el área urbana del distrito de Cerro Colorado: Azufra, El Botadero, El Azufra, Estanquillo, Añashuayco, Río Seco, La Paccha, Municipal, Apipa, José Bustamante y Rivero, Escalerilla y Escalerilla 3.

- c) Realizar la identificación de los puntos críticos (infraestructura) en las quebradas simuladas del distrito de Cerro Colorado.

Antecedentes y trabajo anteriores

- Luque, G.; Pari, W. & Dueñas, K. (2021) - Peligro geológico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 81, 300 p., 9 mapas. En este boletín se realiza un estudio integral de los peligros volcánicos en la región de Arequipa, mediante la revisión de publicaciones científicas, la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, y mapas de cartografía de peligros geológicos de estudios preliminares. De este modo, han podido realizar un análisis espacial con el fin de interpretar la evolución de los paisajes geomorfológicos, detectar los procesos que pueden causar desastres y proponer medidas para su prevención y mitigación.
- Vílchez, M. & Sosa, N. (2021) - Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 85, 236 p., 5 mapas. En este boletín se identificó y caracterizó los tipos de peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos ocurridos en la ciudad de Arequipa (incluido el distrito de Cerro Colorado); se realizó un inventario de peligros en detalle; determinación de zonas críticas; zonificar el territorio según rangos de susceptibilidad y peligro a los movimientos en masa.

➤ Ubicación

La zona de estudio se ubica en el distrito de Cerro Colorado, provincia y región de Arequipa (Fig. 1), a 18,6 km al oeste del volcán Misti y a 20,3 km al sureste del Complejo Volcánico Chachani. Las coordenadas UTM y geográficas de la zona de estudio son (Cuadro 1):

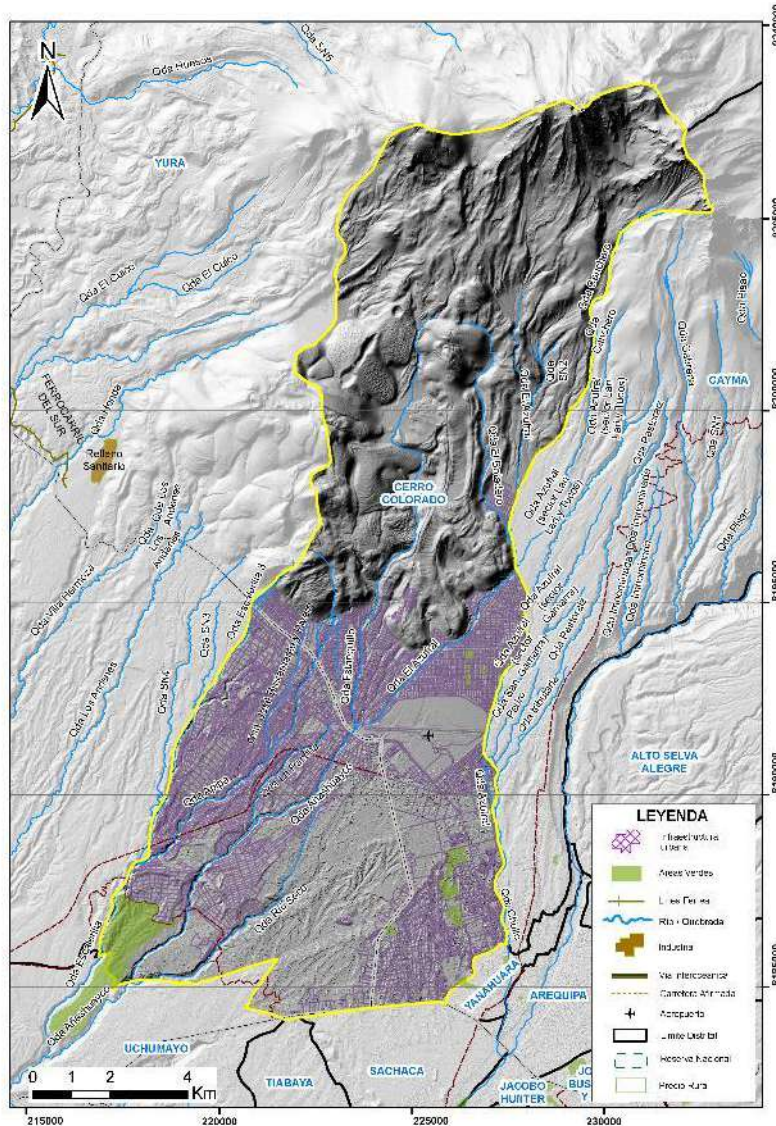


Figura 1. Mapa de ubicación del distrito de Cerro Colorado, provincia y región Arequipa, según el Instituto Geográfico Nacional - IGN.

Cuadro 1. Coordenada de la plaza Las Américas, del distrito de Cerro Colorado, provincia y región de Arequipa

UTM – WGS84 – ZONA 19S		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
226504.93 m	8187658.66 m	16°22'36.56"S	71°33'37.34"O

➤ **Accesibilidad**

El acceso vía terrestre al distrito de Cerro Colorado (Plaza las Américas), desde el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI), sigue la siguiente ruta (Cuadro 2):

Cuadro 2. Rutas y accesos al distrito de Cerro Colorado, provincia y departamento de Arequipa.

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo estimado
OVI – Av. José Abelardo Quiñones	Asfaltada	0.130	5 mín.

Av. José Abelardo Quiñones – Mariano Melgar (Plaza las Américas)	Asfaltada	0.40	16 mín.
--	-----------	------	---------

➤ **Aspectos socioeconómicos**

Indicadores de la población

De acuerdo con el XII Censo Nacional de población y VII de vivienda (CPV, 2017), en el distrito de Cerro Colorado, el 51,44 % (101819) son mujeres y el 48,56 % (96135) hombres. Siendo una de las provincias más pobladas que concentra el mayor número de habitantes.

La densidad poblacional del distrito de Cerro Colorado es de 1131.81 hab./km² (Cuadro 3). El 99,9 % de sus habitantes vive en áreas urbanas y el 0,1% en áreas rurales. En cuanto a la composición de la población por edades, el 93,8 menor a 65 años y 6,2 es mayor de 65 años.

Cuadro 3. Población urbana y rural, según distritos, 2017. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.

Distrito	Población total	Área (km ²)	Densidad poblacional (hab./km ²)	Urbana		Rural	
				Pob. censada	%	Pob. censada	%
Cerro Colorado	197954	174,9	1131,81	197731	99,9	223	0,1

Indicadores de vivienda

De acuerdo con el censo de población y vivienda del año 2017, existen 80385 viviendas particulares en el distrito de Cerro Colorado. La mayoría con 92,1% (65276) son casas independientes, seguido de departamentos en edificio 4,8% (3415), las viviendas improvisadas con 1,8% (1271), 0,7% (498) la vivienda en quinta, 0,5% (377) vivienda en casa de vecindad, 0,1% (89) local no destinado para habilitación urbana y otro tipo el 0% (1), son ocupadas 88,2% (70927) y el 11,8% (9458) al área rural (Cuadro 4).

Cuadro 4. Viviendas particulares, según área urbana, rural y tipo de vivienda del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.

Tipo de vivienda	Total	Urbana		Rural	
		Viviendas	%	Viviendas	%
Total	80385	70927	100	9458	100
Casa independiente	72990	65276	92,1	7714	81,6
Departamento en edificio	3709	3415	4,8	294	3,1
Vivienda en quinta	506	498	0,7	8	0,1
Vivienda en casa de vecindad	384	377	0,5	7	0,1
Vivienda improvisada	2706	1271	1,8	1435	15,1
Local no destinado para habilitación humana	89	89	0,1	0	0
Otro tipo	1	1	0	0	0

Las paredes de las viviendas predominantes en el distrito de Cerro Colorado, son de ladrillo o bloque de cemento con un 85,10 %, el 7,8 % son de piedra o sillar con cal o cemento y el 5,5 % viviendas de adobe y 1% Madera, el porcentaje restante corresponde a otros materiales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Material de construcción en las paredes de las viviendas del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.

Material de construcción predominante en las paredes	N° de viviendas	%
Ladrillo o bloque de cemento	215617	85,10
Piedra o sillar con cal o cemento	19632	7,70
Adobe	13834	5,50
Tapia	16	0,01
Quincha (Caña con barro)	46	0,02
Piedra con barro	423	0,17
Madera (pona, tornillo, etc.)	2329	0,92
Triplay	1460	0,58
Otro	2	0
Total	253359	100

El material de construcción en predominante en los techos de las viviendas en el distrito de Cerro Colorado es: 64 % de concreto armado, 35 % de tejas, 0,5 % de madera, el material restante es de otros materiales (Cuadro 6).

Cuadro 6. Material de construcción en los techos de las viviendas del distrito de Cerro Colorado. Fuente INEI – Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas

Material de construcción predominante en los techos	N° de viviendas	%
Concreto armado	161179	64,0
Madera	1204	0,5
Tejas	88574	35,0
Planchas de calamina, fibra de cemento o similares	839	0,3
Caña o esfera con torta de barro o cemento	484	0,2
Triplay/estera /carrizo	71	0
Paja, hoja de palmera y similares	2	0
Total	253359	100

Población económicamente activa

En base al Censo Nacional del 2017, en el distrito de Cerro Colorado la mayor cantidad de la población tienen como ocupación principal a los (19332 habitantes) trabajadores de servicios y vendedores de comercios y mercado, seguido de trabajadores no calificados, servicios, peón ambulante y afines a las ocupaciones elementales (17904

habitantes), trabajadores de construcción productores artesanales, eléctricos y telecomunicaciones (14668 habitantes), (11116 habitantes) operadores de maquina industrial, ensambladores y conductores de transporte, profesionales científicos e intelectuales (9816 habitantes), (7560 habitantes) profesionales técnicos, (6144 habitantes) desempleados, jefes y empleados administrativos (5341 habitantes), agricultores y trabajadores calificados, agropecuario, forestales y pesqueros (1815 habitantes), militares y policías (572 habitantes) y miembros del poder ejecutivo, legislativo, judicial y personal directores de la administración pública y privada (479 habitantes) (Cuadro 7).

Cuadro 7. PEA de 14 a más años de edad, por grupos de edad y ocupación principal. Fuente INEI - Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda.

Ocupación principal	Total	Grupos de edad			
		14-29 años	30-44 años	45-64 años	65 y más años
Miembros del poder ejecutivo, legislativo, judicial y personal directores de la administración pública y privada	479	45	196	209	29
Profesionales científicos e intelectuales	9816	1992	4525	3017	282
Profesionales técnicos	7560	2810	3105	1518	127
Jefes y empleados administrativos	5341	2329	1883	1027	102
Trabajadores de servicios y vendedores de comercios y mercado.	19332	6819	6600	5097	816
Agricultores y trabajadores calificados, agropecuario, forestales y pesqueros.	1915	242	607	811	255
Trabajadores de la construcción edificaciones, productores artesanales, eléctricos y las telecomunicaciones.	14668	4554	5896	3691	527
Operadores de maquina industrial, ensambladores, y conductores de transporte.	11116	2566	5090	3120	340
Trabajadores no calificados servicios, peón, vendedores ambulantes y afines ocupaciones elementales.	17904	4980	6808	5282	834
Ocupaciones militares y policiales	572	174	179	219	-
Desocupado	6144	2882	1893	1164	205
Total	94847	29393	36782	25155	3517

➤ Precipitación pluvial

En el distrito de Cerro Colorado el periodo de precipitaciones ocurre entre los meses de diciembre a marzo (época húmeda) y durante los meses de abril a noviembre hay ausencia de las mismas (época seca). Según la información disponible del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en la estación La Pampilla entre los años 1931 al 2020 (Fig. 2), para el distrito de Cerro Colorado se ha registrado una precipitación máxima de 125 mm, precipitación intermedia de 50 mm y mínima de 25 mm.

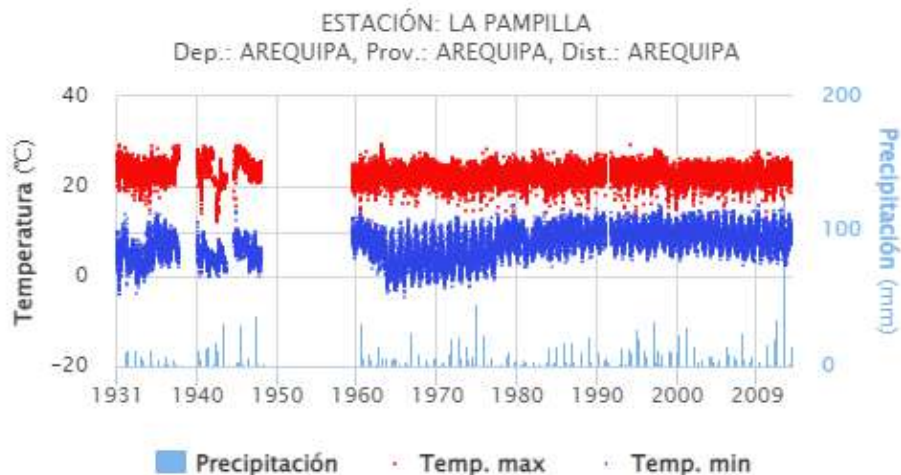


Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).

2. DEFINICIONES

2.1. Erupción volcánica

Son los procesos durante los cuales el magma y sus gases asociados (Figura 3) ascienden hacia la corteza y son emitidos hacia la superficie de la Tierra y la atmósfera. Las erupciones volcánicas varían ampliamente, tanto en magnitud como en duración y muestran un amplio espectro de estilos eruptivos y procesos. Los vulcanólogos describen tradicionalmente las erupciones en términos derivados de los tipos de actividad característicos de volcanes particulares o regiones volcánicas (Siebert et al, 2015).



Figura 3. Erupción volcánica del volcán Sabancaya.

2.2. Complejo Volcánico Chachani

Es un aparato volcánico que se encuentra formado por al menos 12 edificios volcánicos, divididos por edificios antiguos y recientes (Fig. 4), entre ellos cinco conos compuestos, cuatro cúmulo-domos y un voluminoso conjunto de domos-colada, además, un extenso

campo de lavas hacia el oeste, sur y suroeste. El Complejo Volcánico Chachani es considerado como un sistema de larga duración, cuya actividad habría durado al menos 1.2 Ma de edad.



Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani.

2.3. Lahares

Los lahares se producen durante una erupción o tranquilidad volcánica (Tilling, 1993). Ocurren cuando grandes masas de agua mezclados con sedimentos volcánicos se desplazan quebrada abajo, que comúnmente incorporan agua y sedimentos adicionales (Fig. 5). Los fragmentos de roca contenidos en los lahares los hacen especialmente destructivos; el abundante líquido contenido en estos les permite fluir sobre pendientes suaves e inundar áreas lejanas a su origen. Pueden comprender uno o más tipos de flujos, los que incluyen ‘flujos de detritos’ y ‘flujos hiperconcentrados’ o ‘transicionales’. Las transiciones entre los tipos de flujos son definidos en base a la fracción de sólidos que poseen; sin embargo, estas transiciones son gradacionales y dependen de otros factores, como el tamaño de los sedimentos, mineralogía de arcillas, agitación de las partículas y la energía del flujo (Vallance & Iverson, 2015).

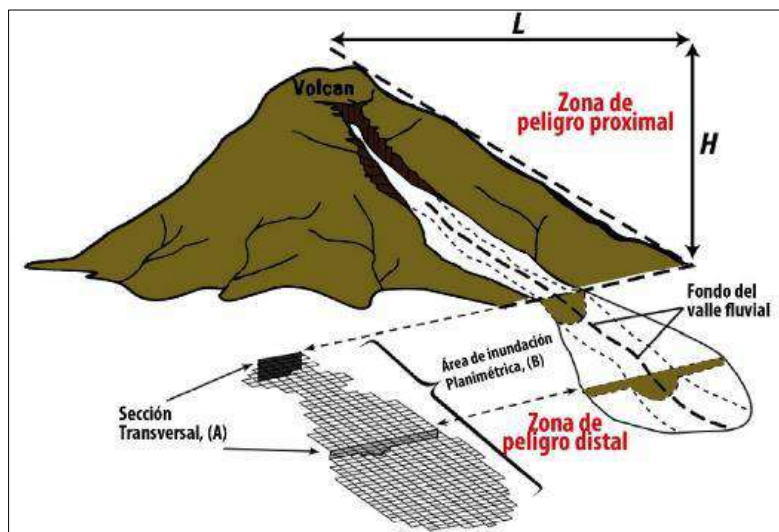


Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L , que describen la extensión de la zona de peligro proximal. A y B, describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).

2.3.1. Lahares primarios

Los lahares primarios se originan durante erupciones de volcanes nevados (Fig. 6), son el resultado de la combinación de mecanismos físicos relacionados con el fenómeno eruptivo como la expulsión de ceniza, material piroclástico y flujos de lava incandescente que provocan el derretimiento súbito de una porción del glaciar (Vera et al, 2019).



Figura 6. Lahares primarios generados en el volcán Ampato. Fuente: Google Earth.

2.3.2. Lahares secundarios

Los lahares secundarios son mezclas de fragmentos volcánicos (ceniza, lapilli y bloques) transportados por el agua (precipitación), fluyen rápidamente (10 - 20 m/s) por los flancos, quebradas y valles que descienden de un volcán (Fig. 7) Pueden destruir todo a su paso y alcanzar grandes distancias.



Figura 7. Lahares secundarios en el flanco oeste del volcán Ubinas. Fuente: Google Earth.

2.4. Corriente de densidad piroclástica (PDC)

Son corrientes extremadamente calientes, llegan a tener temperaturas entre 300 y 700°C, conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas y gases. Descienden por los flancos del volcán a grandes velocidades, se construye por una parte inferior densa y otra menos densa conocida como oleada piroclástica, compuesta por una nube de gases y ceniza destruyendo, calcinando y enterrando todo lo que se encuentra a su paso.

3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

3.1. Pendiente del terreno

Este es un dato importante es uno de los principales factores dinámicos y particularmente de los flujos de detritos (lahares), ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable (Sánchez et al, 2002).

Para la elaboración del mapa de pendientes del distrito de Cerro Colorado se utilizó un mapa topográfico y el modelo de elevación digital (DEM), obtenido por medio de imágenes satelitales SPOT 10 m, utilizando el software ArcGIS 10.5.

El nivel de jerarquización del mapa de pendientes (Anexo: Mapa 1) fue siguiendo a (Martín-Serrano et al., 2004), adaptado en ficha de inventarios de peligros geológicos y geohidrológicos en el Perú, clasificando en 6 rangos o grados de pendiente: Llano, suavemente inclinado, moderado, fuerte, muy fuerte y muy escarpado; estos se describen a continuación.

➤ Llano (<1°)

Son terrenos planos, se presentan en pequeños sectores del distrito de Cerro Colorado, identificándose en zonas puntuales dentro de la zona urbana del distrito.

➤ Suavemente inclinado (1°-5°)

Los terrenos con ligera inclinación, se distribuyen a lo largo del abanico aluvial y las laderas piroclásticas volcanoclasticas. Ocupando una mayor extensión en el Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón.

➤ Moderado (5° -15°)

Los terrenos con moderada pendiente, se ubican en las planicies aluviales, planicies ignimbríticas y sectores del abanico aluvial. Condiciona en muchos casos la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y erosión de laderas.

➤ Fuerte (15° -25°)

Estas pendientes se distribuyen indistintamente sobre los domos-colada Potrero, flujos de lava en bloques del Pleistoceno tardío y morrenas Neoglaciares. Estos terrenos con pendiente fuerte son susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos y movimientos complejos.

➤ Muy fuerte (25° -45°)

Presentan mayor extensión sobre los depósitos del Complejo Volcánico Chachani, principalmente en los flujos de lava, partes altas de las morrenas Neoglaciares, superficies de roca aborregada, domos de lava y estratovolcanes glaciados.

➤ **Muy escarpado (>45°)**

Los terrenos donde se encuentran estas pendientes son los flancos del edificio Chachani, los estratovolcanes glaciados y algunas laderas de las quebradas.

3.2. Unidades geomorfológicas

Para la caracterización y determinación de unidades geomorfológicas (Anexo: Mapa 2), se ha empleado las especificaciones técnicas DGAR-ET-002 V-2 para clasificar y caracterizar las unidades geomorfológicas elaboradas por el INGEMMET a escala 1:25,000.

3.2.1. Geoformas de carácter volcánico

➤ **Estratovolcán glaciado (EV-gI)**

Representan a estratovolcanes que han sido afectados por la actividad glaciaria por encima de los 5550 m (Edificio Chachani) y 5230 m s.n.m. (Edificio Estribo), estos edificios presentan formas irregulares, poseen pendientes muy fuertes (25° a 45°) a muy escarpadas (>45°) (Fig. 8).



Figura 8. Estratovolcán Glaciado, edificio Chachani.

➤ **Estratovolcán (EV)**

Esta geoforma representa a los edificios Estribo (5795 m s.n.m.), Chachani (6057 m s.n.m.) y La Horqueta (5489 m s.n.m.), formadas por sucesiones de flujos de lava, flujos piroclásticos y depósitos de caída de tefra. Presenta pendientes fuertes (15° a 25°) a muy fuertes (25° a 45°).

➤ **Ladera piroclástica y volcanoclástica (LA-pv)**

Es un área relativamente plana. Está conformada por depósitos de corrientes de densidad piroclástica (PDC) de bloques y ceniza, caída de tefra, depósitos de lahares (depósitos volcanoclásticos). La zona posee pendientes moderadas (5°-15°) y fuertes (15°-25°). Se encuentra material de moderada a baja consolidación.

➤ **Planicie piroclástica y volcanoclástica (PL-pv)**

Esta geoforma presenta pendientes suavemente inclinadas (1°-5°), identificándose depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza asociados a los domos-colada Potrero y depósitos de lahares, ocupa 5.8 km² en el área de estudio.

➤ **Domo de lava (DO-la)**

Al norte del distrito de Cerro Colorado se ubica los domos Potrero y La Horqueta (Fig. 9) a una altitud de 3860 y 5400 m s.n.m. poseen pendientes fuertes (15°-25°) a muy

fuertes (25° - 45°) respectivamente. Los domos Potrero ocupan un área de 20 km^2 y el domo la Horqueta 2.3 km^2 .



Figura 99. Domo La Horqueta y domos-colada Potrero.

➤ **Flujo de lava en bloques del pleistoceno tardío (FL-bpt)**

Los flujos de lava en bloques en la zona de estudio corresponden a los edificios Estribo, Chachani y La Horqueta, presenta pendientes fuertes (15° - 25°). Se encuentran formando los flancos del sur del Complejo Volcánico Chachani. Uno de los flujos de lava alcanza una distancia máxima de 8.1 km desde la fuente de origen con un espesor promedio de 250 m (frente de lava). Algunos flujos aún preservan sus estructuras de formación (levées y cuerdas de flujo).

➤ **Domo-colada (DO-col)**

En el distrito de Yura se puede distinguir 2 zonas con este tipo de geformas. El domo-colada El Colorado se ubica en el sector NNO del Complejo Volcánico Chachani, ocupando un área aproximada de 10.2 km^2 . La cumbre de la misma se ubica a 4480 m s.n.m. Los domos de Potrero (Fig. 10), se ubican en el flanco suroeste del Complejo Volcánico Chachani, presentan una superficie suave y ondulada. La cima de estos domos está a 3830 m s.n.m. y cubren un área de 19.4 km^2 . Poseen pendientes de moderadas (5° - 15°) y las laderas pendientes fuertes (15° - 25°) a muy fuertes (25° - 45°).



Figura 1010. Domos-colada Potreros, ubicados al suroeste del Complejo Volcánico Chachani.

➤ **Planicie ignimbrítica (PL-ig)**

La planicie ignimbrítica es la geoforma que ocupa la mayor extensión (59 km²) en el distrito de Cerro Colorado, presenta altitudes entre > 2400 m s.n.m. posee pendientes suavemente inclinadas (1°-5°). Está conformada por depósitos de composición riolítica, surcada por quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani (Fig. 11).



Figura 11. Planicie ignimbrítica surcada por quebradas.

3.2.2. Geoformas de carácter fluvial y deposicional

➤ **Abanico aluvial (A-a)**

Es una geoforma deposicional se encuentra limitando con la planicie ignimbrítica y la ladera piroclástica y volcanoclástica, presenta pendientes suavemente inclinados (1°-5°) presenta un drenaje dendrítico-radial.

➤ **Abanico de deshielo (A-d)**

Corresponde a depósitos fluvioglaciares, producto del deshielo de los glaciares, en el distrito de Cerro Colorado se ubica en la parte alta del edificio Estribo a 4950 m s.n.m. Este depósito se caracteriza por presentar drenaje dendrítico con quebradas de poca profundidad entre 1 y 5 m.

➤ **Planicie aluvial (PL-a)**

Se encuentra al extremo este del distrito de Cerro Colorado, esta geoforma presenta superficies planas con pendientes suavemente inclinadas (1° - 5°) (Fig. 12), formado por gravas de origen lávico de formas subredondeadas, inmersos en matriz arenosa y arcillosa. Los afloramientos expuestos llegan a alcanzar espesores de hasta 20 m.



Figura 12. El Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón y las viviendas del distrito Cerro Colorado sobre la planicie aluvial.

3.2.3. Geoformas de carácter glacial

➤ **Morrena anterior al máximo avance glacial (MO-a-mag)**

Estas morrenas se ubican a 4 km al suroeste de la cumbre del edificio Estribo, alcanzan hasta 1,78 km de distancia y se encuentran a 3880 m s.n.m. de altitud. Presentan superficies ovaladas con espesores de 300 m, ancho de 400 m aproximadamente y pendientes fuertes (15° - 25°) a muy fuertes (25° - 45°).

➤ **Morrena neoglacial (MO-n)**

Estas geoformas se originaron durante los últimos 12 mil años, con formas alargadas y sinuosas, con 4600 m s.n.m. de altitud, varias llegando a preservar los frentes centrales, este tipo de morrenas corresponden a la segunda generación después de MO-a-mag.

3.2.4. Geoformas de carácter denudacional

➤ **Colina en roca sedimentaria (C-rs)**

Esta geoforma alcanza una altura máxima de 100 metros con respecto al nivel de base (cauce de quebrada), se encuentra disectada por laderas de las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani. Estas geoformas presentan moderada susceptibilidad a ser afectados por movimientos en masa y se asocian a la ocurrencia de derrumbes y deslizamientos.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

Para el análisis geológico se hizo uso de Cartas Geológicas del cuadrángulo de Arequipa (33-s-1 y 33-s-2). elaboradas por INGEMMET a escala 1: 50 000. Posteriormente en el proyecto GA17D “Estudio de peligros del Complejo Volcánico Chachani” (2018, 2019, 2020 y 2021) y el proyecto GA17F “: Estudiar y Evaluar los peligros de los volcanes Chachani y Casiri”, desarrollado a escala 1: 25 000 (Anexo: Mapa 3) se localizan las siguientes formaciones y/o secuencias.

4.1. Unidades Litoestratigráficas

4.1.1. Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (Qp-IAA)

Esta ignimbrita posee una composición riolítica cuyos afloramientos se encuentran al sur y suroeste del Complejo Volcánico Chachani y la unidad de mayor extensión aflorante en el distrito de Cerro Colorado. Esta ignimbrita consta de dos unidades con edades medias ponderadas de 1.65 Ma para la unidad blanca inferior, y 1.63 Ma para la unidad rosa superior (Paquereau-Lebti et al., 2006) (Fig. 13).



Figura 13. Depósitos de ignimbrita Aeropuerto de Arequipa.

4.1.2. Estratovolcán Estribo (Qp-Es 4, 5 y 6)

Se ubica hacia el lado más oriental del distrito de Cerro Colorado. Presenta seis unidades volcánicas Estribo 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Sin embargo en el distrito solo se encuentran las 3 últimas unidades. Estribo medio (Qp-Es4) consiste de flujos de lava andesítica, flujos de escoria y depósitos piroclásticos. Una discordancia angular ubicada a aproximadamente a 4,800 m s.n.m. permite distinguir la unidad inferior de la media. Por otro lado, los flujos de lava andesítica del Estribo superior (Qp-Es5, 6) se extendieron a 10.4 km al noreste del cráter. Algunas unidades de flujos de lava han sido datadas entre 694.1 ± 74.9 ka y 808.5 ± 62.7 ka (Aguilar et al., 2022).

4.1.3. Estratovolcán El Ángel (Qp-Ang)

Este estratovolcán se emplaza al extremo oriental del Complejo Volcánico Chachani y noreste del distrito de Cerro Colorado. El volcán muestra una escarpa en forma de herradura hacia el oeste que es atribuida a la erosión. El Ángel se compone de una sucesión de al menos cuatro flujos de lava de composición andesítica que miden entre 40 a 200 m de espesor.

4.1.4. Estratovolcán La Horqueta (Qp-Ho)

Este edificio se compone por flujos de lava y domo; uno de esos flujos de lavas se extiende hasta 2,7 km (depósito más antiguo) de composición andesítica, emplazándose al sureste los flujos más recientes a aproximadamente 7 km de la cima. El domo del volcán posee aproximadamente 2 km de diámetro.

4.1.5. Domos-colada Potrero (Qp-Dp)

Consiste de un grupo de domos, domos-colada y flujos de lava extensos construidos al sur del Complejo Volcánico Chachani, en el extremo norte de la depresión de Arequipa.

Los domos-colada Potrero son de composición andesítica y dacítica. Las rocas muestran una textura porfírica. Poseen entre 600 y 800 m de altura, representan un volumen entre 8-10 km³. El colapso de algunos de estos domos originó el emplazamiento de flujos piroclásticos de bloques y cenizas visibles en el sector oeste del distrito de Cerro Colorado. Mientras que los flujos de lava aún presentan sus estructuras como levées y cuerdas de flujo (Fig. 14).



Figura 14. Depósitos de flujos de lava Potrero, las que preservan bordes de encauzamiento (levées) y cordones o cuerdas de flujo.

4.1.6. Estratovolcán Chachani (Qp-Ch)

Este estratovolcán es uno de los edificios más reciente y más altos de todo el Complejo Volcánico Chachani, con una altura de 6057 m s.n.m. sobre el complejo volcánico Chachani. Consta de tres unidades que se construyeron en la parte central del Chachani.

4.1.7. Domos-colada Cabrerías (Qp-Cab)

Al este del distrito de Cerro Colorado se encuentra aflorando un depósito piroclástico de bloques y ceniza, producto del colapso de un domo, formado por bloques densos porfíricos, de composición dacítica, con hasta 1.5 m de diámetro. Este depósito es de matriz soportada con aproximadamente 60% de matriz y 40% de bloques en promedio.

4.1.8. Formación Cuico (Qp-Cu)

En la zona de estudio se ubica al sur y sureste, conformado litológicamente por lutitas y areniscas gris oscura, por sectores en la parte inferior se encuentra conglomerados fluviales a la base y una interstratificación de bancos de arenas gravosas y arenas con intercalaciones de capas de cenizas volcánicas y la parte superior, de naturaleza lodolítica.

4.1.9. Depósitos de morrenas (H-mo)

Estas morrenas se ubican al norte del distrito, cercanas a las cumbres del Complejo Volcánico Chachani (Fig. 15), poseen formas alargadas. Presenta una mezcla heterogénea de bloques de rocas esencialmente volcánicas, incluidos dentro de una matriz areno-limosa suelta.



Figura 15. Morrenas neoglaciales del estratovolcán Estribo.

4.1.10. Depósitos fluvioglaciares (H-Flg)

En la zona de estudio estos depósitos se encuentran en los flancos del edificio Estribo de pendientes muy fuertes (25° - 45°). Se caracteriza por presentar grava y arena cercana al frente del glaciar del edificio volcánico y surcos glaciares.

4.1.11. Depósitos coluviales (H-co)

Los depósitos coluviales se encuentran en el frente de los domos-colada Potrero, poseen fuerte pendiente (15° - 25°). Se caracterizan por presentar clastos angulosos, heterométricos (centimétricos y decimétricos). Algunos de estos depósitos poseen una intercalación con depósitos de lahares.

4.1.12. Depósitos aluviales (H-al)

Estos depósitos se encuentran principalmente en el cauce de las quebradas. Su composición litológica es resultado de la acumulación de fragmentos de roca de origen volcánico del Complejo Volcánico Chachani de diferente granulometría (bloques, gravas y cantos con matriz de arenas y limos).

5. PELIGROS GEOLÓGICOS

5.1. Peligros geológicos por flujo de detritos (lahares)

El principal peligro geológico identificado corresponde a un movimiento en masa, tipo flujos de detritos (lahares), cuyo factor desencadenante son las precipitaciones pluviales (lluvias), que contribuyen a la desestabilización de las laderas o taludes. Identificándose lahares antiguos del Pleistoceno y del Holoceno, así como depósitos de lahares recientes que se encuentran en el cauce de las quebradas.

Para el Complejo Volcánico Chachani, se ha elaborado el mapa de peligros volcánicos por lahares (Anexo: Mapa 4), considerándose 11 quebradas: Azufral, El Botadero, El Azufral, Estanquillo, Añashuayco, Río Seco, La Paccha, Municipal, Apipa, José Bustamante y Rivero y Escalerilla 3, realizándose una evaluación de puntos críticos en 10 de las 11 quebradas que atraviesan áreas urbanas: Azufral, El Azufral, Estanquillo, Añashuayco, Río Seco, La Paccha, Municipal, Apipa, José Bustamante y Rivero y Escalerilla 3, elaborando perfiles y secciones transversales (Fig. 16).

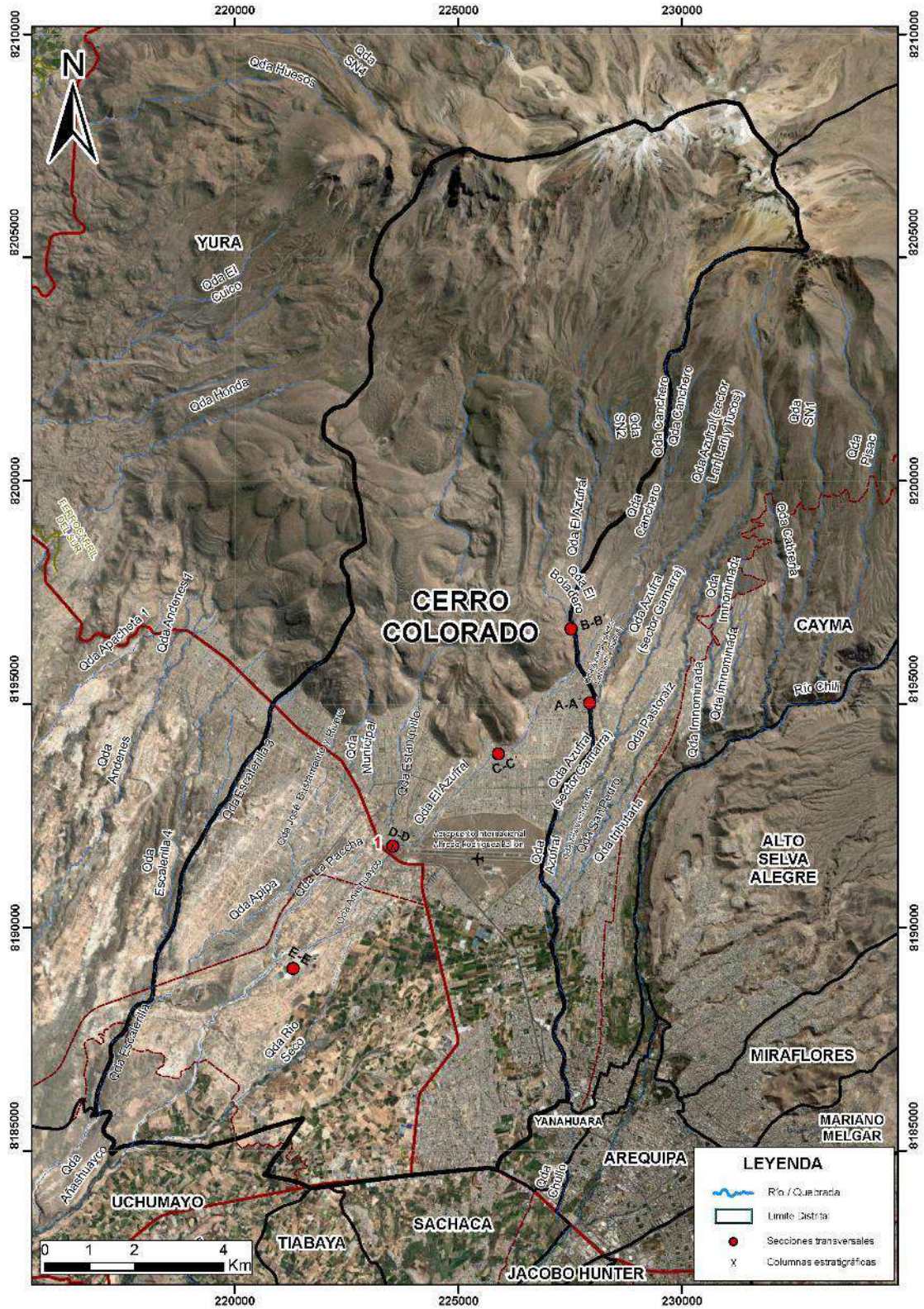


Figura 16. Mapa de ubicación de las secciones transversales y columna estratigráfica de las quebradas en el distrito de Cerro Colorado.

5.1.1. Quebrada Azufral

La quebrada Azufral se encuentra al límite del distrito de Cerro Colorado y Cayma, atravesando por sectores territorio de ambos distritos. Para el distrito de Cerro Colorado, se realizó la evaluación de esta quebrada la cual posee en total una extensión de 11.1

km y resulta de la confluencia de Lari Lari y Tucos con Gamarra (Fig. 17), observándose en ambas márgenes de las laderas depósitos de corrientes de densidad piroclástica (PDC) de bloques y ceniza (Fig. 18), caída de pómez retrabajada y adosados depósitos de lahares antiguos.



Figura 17. Quebrada Azufral, confluencia de Lari Lari y Tucos con Gamarra (Coordenadas UTM WGS84 227266 E, 8192430 N).



Figura 18. Quebrada Azufral, observándose los depósitos de PDC de bloques y ceniza intercalados con depósitos pómez retrabajado, con pendientes muy escarpadas (Coordenadas UTM WGS84 226924 E, 8191431 N).

En este perfil elaborado en campo A-A' (Fig. 19), se observa los depósitos del PDC Cabrerías, intercalado con niveles decimétricos de depósitos de lahares en el cauce de la quebrada (Fig. 18), adosados por sectores con material antrópico.

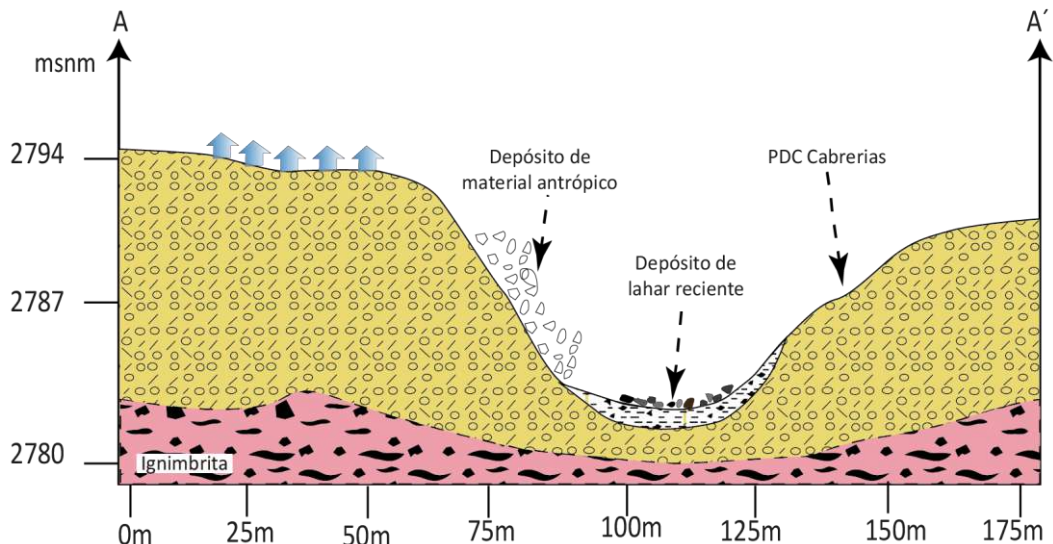


Figura 19. Sección transversal de la quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) (Coordenadas UTM WGS84 227948 E, 8195021 N).

5.1.2. Quebrada El Botadero

La quebrada El Botadero nace en uno de los flancos de los domos-colada Potrero, posee una extensión de 6,7 km, inicia a una altitud de 3400 m y desemboca a 2890 m en confluencia con la quebrada El Azufral. Posee aproximadamente 40 m de ancho de cauce máximo, las laderas presentan pendientes fuertes (15°-25°). En el perfil transversal B-B' (Fig. 20) presenta depósitos de bloques y cenizas de los domos-colada Potrero (Fig. 14). En la parte media de la quebrada atraviesa por la asociación de vivienda Granjeros Sumac Llaqta.

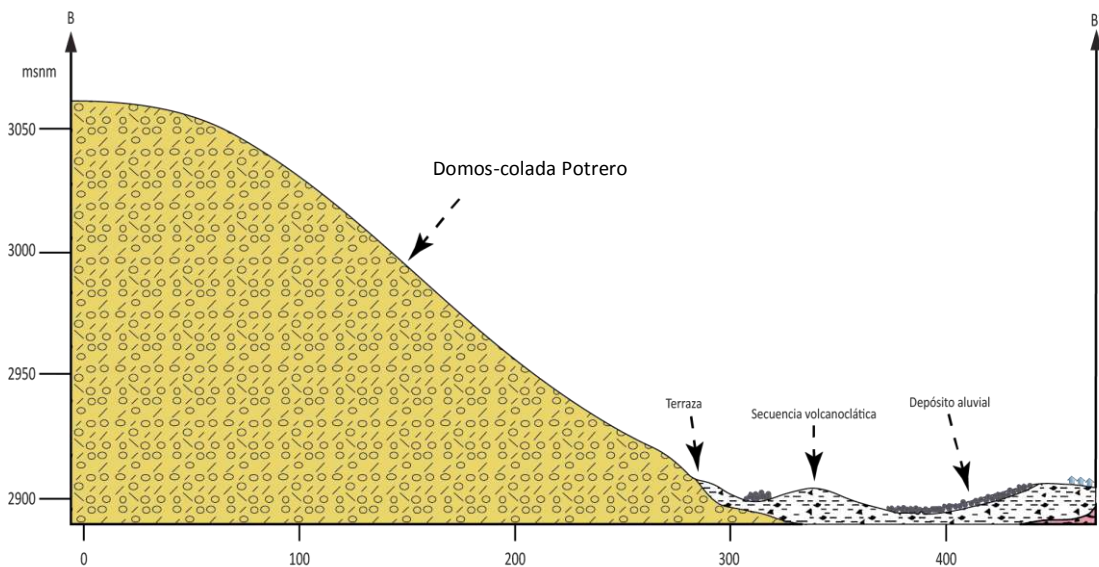


Figura 20. Perfil transversal de la quebrada El Botadero en dirección O-E (Coordenadas UTM WGS84 227532 E, 8196678 N).

5.1.3. Quebrada El Azufral

La quebrada El Azufral nace en la parte alta del distrito a una altitud de 3829m y confluye a 2500 m con la quebrada Estanquillo, es decir alcanza un desnivel de 1329 m, posee un recorrido de 13 km, presenta en promedio pendientes fuertes (15°-25°) (Fig. 21), el ancho promedio de toda la quebrada es de 35 m y alcanza una profundidad de 20 m.

Esta quebrada recorre cerca de la Asociación de vivienda (A.V.) Oliva, A.V. Taller Los Ángeles del Sur Zona A, A.V. Sin nombre 69, A.V. Artesanos Pirotécnicos Villa Florida Zona B, Villa Perú I, Asentamiento Humano (A.H.) Asociación de vivienda y talleres de interés social Andrés Avelino Cáceres, A.V. Villa Magisterial Zona 4, habilitación urbana (H.U.) Sin nombre 031 y el pueblo joven (P.J.) Villa San Juan Sector I.



Figura 211. Quebrada El Azufral, se observa las laderas con pendiente fuerte (Coordenadas UTM WGS84 224598 E, 8192709 N).

El perfil C-C' (Fig. 22) elaborado en la quebrada El Azufral presenta hacia la base depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, seguido por secuencias volcanoclásticas (depósitos de lahares consolidados y no consolidados) y material residual. En el cauce de la quebrada presenta material aluvial formado por gravas y bloques decimétricos inmersos en matriz arenosa y limosa.

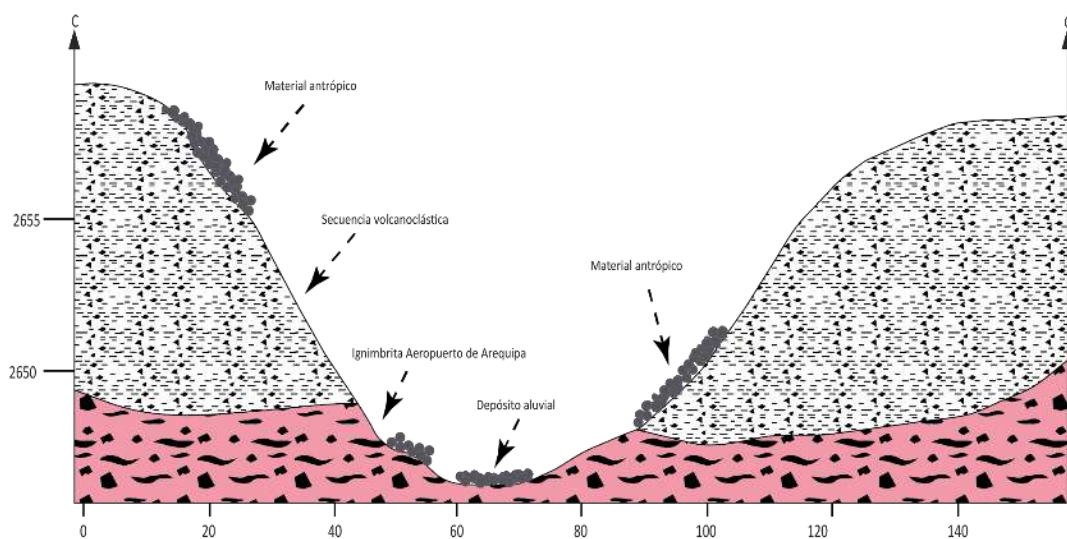


Figura 222. Perfil transversal de la quebrada El Azufral en dirección NE-SE (Coordenadas UTM WGS84 225903 E, 8193879 N).

5.1.4. Quebrada Estanquillo

La quebrada Estanquillo inicia a una altitud de 2890 m s.n.m. y confluye con la quebrada El Azufral a 2500 m s.n.m. Posee una extensión de 4.8 km, las laderas presentan pendientes fuertes (15°-25°). Litológicamente, está compuesto por depósitos

de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, depósitos de lahares antiguos, material aluvial y residual.

Durante el recorrido de esta quebrada atraviesa la A.V. Sor Ana de los Ángeles Monteagudo sector VI-III-II, A.V. Los quechuas, A.H. Agrupación Ampliación zona IX, San Pedro y P.J. Villa San Juan sector I.

En el perfil transversal D-D' (Fig. 23), se observa el corte transversal de la quebrada Estanquillo y la quebrada El Azufra. Hacia la base se observan los depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, superpuestas por depósitos de tefra y depósitos de lahares antiguos, cerca al cauce se encuentran terrazas aluviales de gravas o bloques heterométricos inmersos en matriz arenosa. De igual forma se ha elaborado una columna estratigráfica (Fig. 24) en la quebrada Estanquillo mostrando los mismos depósitos observados en el perfil transversal.

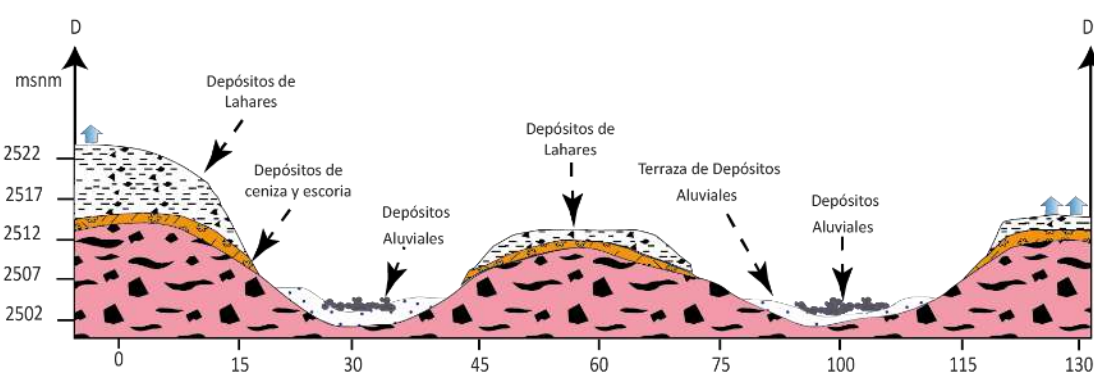


Figura 23. Perfil transversal de la quebrada Estanquillo en confluencia con la quebrada El Azufra (Coordenadas UTM WGS84 223540 E, 8191813 N).

ESPESOR (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION
1.1		- Depósito de flujo de lahares con una matriz soportada del 60% y el 40% de clastos subangulosos, los clastos son porfiríticos con Ø de unos 3cm
0.8		- Depósito de flujo de lahares hiperconcentrado no consolidado de un color gris con los clastos subangulosos de tamaños milimétricos a centimétricos.
1.0		- Depósito de flujo de lahares con una matriz soportada del 60% y el 40% de clastos subangulosos, los clastos son porfiríticos con Ø de 5cm a 10cm.
1.7		- Depósito de flujo de lahares hiperconcentrado con 3 niveles de ceniza consolidada bien sorteado con una matriz soportada del 60% y el 40% de bloques subredondeados. En la base se encontró un nivel de ceniza de unos 3cm de espesor.
1.5		- Depósito de flujo de lahares mal sorteado no consolidado en una matriz soportada con clastos subangulosos a subredondeados con presencia de bloques subangulosos
1.3		- Depósito de cenizas y escoria, tiene una matriz soportada y hay presencia de escoria subredondeadas de unos 2.5cm de Ø las cuales son granodécimas.
2.0		- Depósito de Ignimbrita

Figura 24. Columna estratigráfica en la quebrada Estanquillo, cercano a la confluencia con la quebrada El Azufra (Coordenadas UTM WGS84 223540 E, 8191813 N).

5.1.5. Quebrada Añashuayco

Esta quebrada nace por confluencia entre las quebradas Estanquillo y El Azufra a una altitud de 2500 m s.n.m. Recorriendo en el distrito de Cerro Colorado una distancia de

9,6 km. Las laderas poseen pendientes muy fuertes (25° - 45°) a muy escarpadas ($>45^{\circ}$). Durante el trayecto presentan depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, depósitos de lahares antiguos, recientes y material residual.

La quebrada Añashuayco atraviesa la A.V. Villa San Juan sector I, A.V. Peruano Argentino Boliviano (PERUARBO) sector Bolivia zona III, sector Perú zona III y un sitio recreacional-turístico.

El perfil transversal a la quebrada Añashuayco E-E' (Fig. 25), presenta pendientes muy escarpadas ($>45^{\circ}$). Llegándose a identificar por sectores las 2 unidades características de Ignimbrita Aeropuerto Arequipa: La unidad de color blanquecino bien solidificado, formando paredes verticales, y la ignimbrita de color rosado (salmón) menos compacto que se encuentra sobre la primera unidad, cubiertas por depósitos de lahares (Fig. 26).

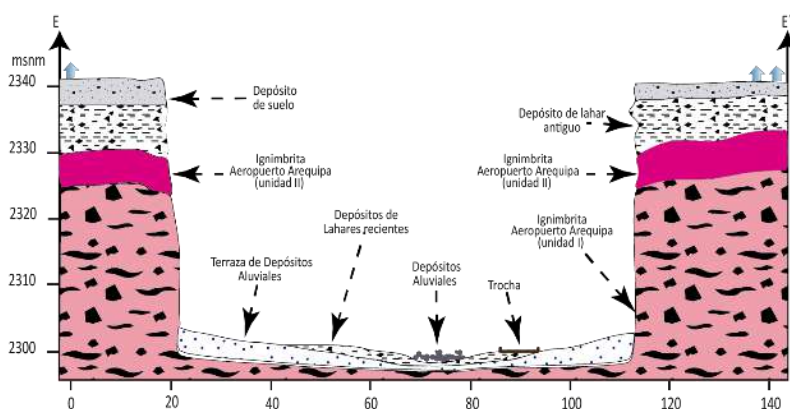


Figura 25. Perfil transversal de la quebrada Añashuayco (Coordenadas UTM WGS84 221479 E, 8189469 N).

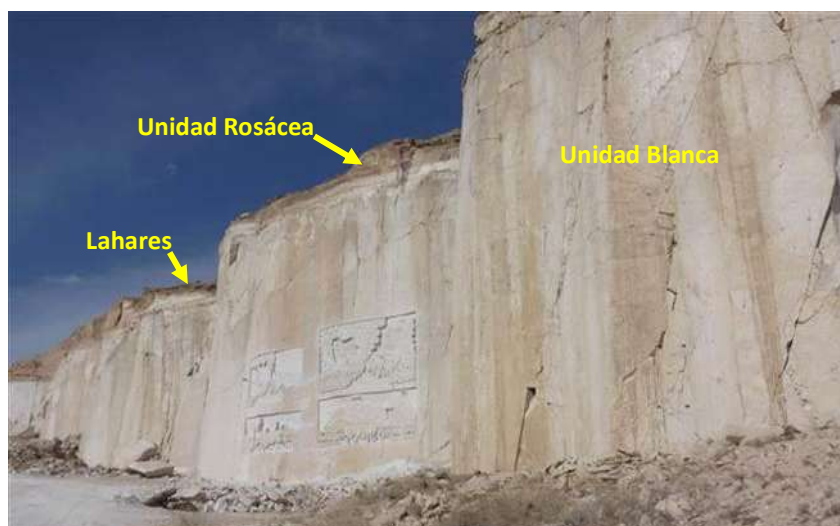


Figura 26. Ladera al margen izquierdo de la quebrada Añashuayco, observándose la IAA (unidad blanca y rosada) y los depósitos de lahares antiguos en la parte superior (Coordenadas UTM WGS84 220838 E, 8189103 N).

5.1.6. Quebrada Río Seco

Se ubica de forma paralela a la quebrada Añashuayco, se origina una altitud de 2430 m s.n.m. y confluye con la quebrada Añashuayco a 2110 m s.n.m. por ende presenta un desnivel de 320 m, recorre una extensión de 7,6 km. Las laderas poseen pendientes fuertes (15° - 25°) a muy fuertes (25° - 45°), con un ancho de cauce promedio de 25 metros y una profundidad de 43 metros. Litológicamente, en la quebrada aflora la Ignimbrita

Aeropuerto Arequipa (Fig. 27), superpuestas por secuencias volcanoclásticas (depósitos de lahares), se observa material aluvial en el cauce.

El trayecto de la quebrada surca la A.V. Talleres de artesanía en sillar Virgen de Copacabana y muy cerca del sector de La Cantarilla.



Figura 27. Quebrada Río Seco, aflorando en las laderas la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa (Coordenadas UTM WGS84 221644 E, 8186795 N).

5.1.7. Quebrada La Paccha

Se encuentra nace a una altitud de 2500 m s.n.m. y confluye con la quebrada Añashuayco a 2346 m s.n.m. Presenta pendientes fuertes (15° - 25°) a muy fuertes (25° - 45°), recorre 3,6 km, con un ancho de cauce máximo de 50 metros y una profundidad promedio de 45 metros. Litológicamente esta quebrada está compuesta por depósitos de Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, depósitos de lahares antiguos y recientes (Fig. 28), material residual o desmonte en el cauce o cercanos a la misma.

Durante el recorrido de la quebrada se encuentra la A.V. José Bustamante y Rivero sector III, H.U. Sin Nombre 021, A.V. Peruano Argentino Boliviano (PERUARBO) sector Bolivia zona I y II, sector Perú zona I, sector Argentina zona II.



Figura 28. Quebrada La Paccha, afloramiento de la IAA, con depósitos de lahares en la parte superior (Coordenadas UTM WGS84 221813 E, 8191025 N).

5.1.8. Quebrada Municipal

La quebrada Municipal se origina a 2980 m s.n.m. extendiéndose hasta 2550 m s.n.m. con un recorrido de 2,5 km, las laderas presentan pendientes fuertes (15° - 25°), con un cauce promedio de 20 m, alcanzando una profundidad de 40 metros en la parte más septentrional (norte). Litológicamente las laderas se encuentran depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, mientras que en el cauce clastos decimétricos envueltos por arena y limos (Fig. 29).

Durante el trayecto de la quebrada Municipal atraviesa la A.V. Taller artesanía Jorge Basadre II, Asociación Pro Vivienda (A.P.V.) Guardia Republicana del Perú, A.V. Ciudad Municipal III, IV, V, VI.



Figura 29. Quebrada Municipal cerca al campo deportivo (Coordenadas UTM WGS84 222788 E, 8194220 N).

5.1.9. Quebrada Apipa

La quebrada Apipa, posee una extensión de 9,5 km, nace a 2900 m s.n.m. presenta un desnivel de 660 m, posee pendientes muy escarpadas ($>45^{\circ}$), muy fuertes (25° - 45°) y fuertes (15° - 25°) sobre las cuales se han construido terrazas para el aprovechamiento agrícola. La quebrada presenta un ancho promedio de 50 m y una profundidad máxima de 55 m (Fig. 30). Litológicamente se encuentran compuestas por depósitos de Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, además depósitos de lahares recientes, material antrópico (basura).

Durante el trayecto de la quebrada Apipa atraviesa A.V. José Luis Bustamante y Rivero sector II, IV, X y la asociación de talleres y granjas Horeb.



Figura 3030. Quebrada Apipa, observándose en el margen derecho muros, además la quebrada presenta pendientes fuertes a muy fuertes (~50 m) (Coordenadas UTM WGS84 222502 E, 8193528 N).

5.1.10. Quebrada José Bustamante y Rivero

La quebrada José Bustamante y Rivero nace en uno de los flancos de los domos-colada Potrero a 2611 m s.n.m y confluye con la quebrada Apipa a los 2430 m s.n.m. es decir posee un desnivel 181 metros, recorre una distancia de 3,6 km, las laderas presentan pendientes fuertes (15°-25°) mientras que el cauce es moderado (5°-15°), con un ancho promedio de 35 m y una profundidad máxima de 45 m, por sectores se encuentra cubierta por basura y material de desmote (Fig. 31).

Esta quebrada atraviesa el A.H. El Triunfo, A.V. Virgen del Socorro, A.V. Taller Héroes de la Breña, A.V. El Porvenir sector II, José Luis Bustamante y Rivero sector I, IV, V, VII.



Figura 31. Quebrada José Bustamante y Rivero, laderas parcialmente cubiertas por material de desmote y basura (Coordenadas UTM WGS84 222124 E, 8193626 N).

5.1.11. Quebrada Escalerilla 3

La quebrada Escalerilla 3 inicia a 2877 m s.n.m. recorriendo una distancia de 8.8 km, se ubica cercano al límite del distrito de Yura y Cerro Colorado, las pendientes son moderadas (5°-15°), con cauces entre 17 - 107 m de ancho, se encuentra a una profundidad de hasta 40 m, la quebrada en la parte intermedia y baja confluye con la quebrada Escalerilla 4 (Fig. 32).

En el sector alto las laderas de la quebrada Escalerilla 3 presenta depósitos de bloques y ceniza asociado a los domos-colada Potrero, depósitos de lahares antiguos y depósitos aluviales en el cauce de la quebrada con clastos heterométricos, en sector

medio-inferior de las laderas se observan depósitos de la Ignimbrita Aeropuerto Arequipa en muchos sectores cubiertos por depósitos de lahares.

La quebrada se encuentra cerca la A.V. Ángeles de Apipa y A.V. El porvenir sector I, VI.



Figura 322. Quebrada Escalerilla 3 (parte alta), observándose laderas con pendientes muy fuertes con depósitos de bloques y ceniza (Coordenadas UTM WGS84 219998 E, 8192994 N).

5.2. Factores condicionantes

Factor geomorfológico y de relieve

- La infraestructura en el distrito de Cerro Colorado se ubica principalmente en la geoforma de planicie ignimbrítica, donde las laderas de las quebradas poseen pendientes variables, que va desde fuertes (15° - 25°) a muy fuertes (25° - 45°) y de forma puntual muy escarpado ($>45^{\circ}$).

Factor litológico

- Presencia de corrientes de densidad piroclástica de bloques y ceniza, con un bajo grado de consolidación, meteorización leve y muy fragmentada. Se tiene también corrientes de densidad piroclástica de pómez y ceniza de moderada a alta consolidación, meteorización leve, correspondiente a los edificios del CVC que se ubican al sur y sureste.

Factor antrópico

- Algunas de las infraestructuras y viviendas se encuentran construidas sobre laderas de pendiente muy fuerte (25° - 45°), quedando expuestas a los flujos de detritos (lahares).

5.3. Factores desencadenantes

Dentro de los factores desencadenantes que puede generar flujo de detritos (lahares) se tiene:

- Precipitaciones pluviales intensas, estacionales y/o excepcionales, características del sector. Según los registros históricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), mediante la estación La Pampilla señala que las precipitaciones máximas pueden llegar a 125 mm, precipitación intermedia de 50 mm y la precipitación mínima de 25 mm según los registros entre 1931 al 2020 (Fig. 2).

6. SIMULACIONES DE FLUJOS POR LAHARES

La simulación de lahares para el distrito de Cerro Colorado (Anexo: Mapa 4), se realizó en el código VolcFlow (Kelfoun & Druit, 2005), es un modelo que fue desarrollado para la simulación de flujos volcánicos en el Laboratorio de magmas y volcanes, de la universidad Blaise Pascal, en Clermont-Ferrand (Francia), por el Dr. Karim Kelfoun y colaboradores, para delimitar objetivamente las zonas de amenaza de lahares.

La simulación con el VolcFlow permite simular la trayectoria de flujos densos, flujos diluidos a partir de los flujos densos y la sedimentación de los flujos diluidos, basado en el promedio vertical de las ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 1) y la cantidad de movimiento (Ecuaciones 2 y 3) (INGEMMET, 2022). Los parámetros utilizados para el modelado de los diferentes flujos se describen a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2} \text{ Kactpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2} \text{ Kactpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_y}{\rho} \quad (3)$$

Donde:

- h: Es el espesor del flujo
- u: = (u, v) es la velocidad del flujo
- α : Pendiente del terreno
- ρ : Densidad aparente
- T: Retardo de esfuerzo - "Savage y Hunter (1989)" Kaccpass: Coeficiente de presión terrestre - "Inversión y Denlinger (2001)"

6.1. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares

6.1.1. Determinación de volumen de lahar

La precipitación en la zona generará los flujos de detritos (lahares secundarios), en el distrito de Cerro Colorado. En base a esto para determinar el volumen adecuado para las simulaciones de lahares secundarios es necesario tener depósitos de otros fenómenos volcánicos como depósitos de bloques y ceniza, que pueden ser removilizados con la presencia de lluvias. El volumen de esta será por la mezcla de material depositado no consolidado propenso a removilización y de la precipitación pluvial en cada drenaje en los alrededores del distrito de Cerro Colorado, debido a esto es necesario determinar estos 2 volúmenes.

Según algunos autores el porcentaje varía desde 40 % de sedimentos y 60 % de agua (Vásconez et al, 2009); 50 % de agua y 50 % de sedimentos (Vallance J. W., 2001); 70 % de agua y 30 % de sedimentos (Córdoba et al, 2015).

6.1.2. Determinación de quebradas y volúmenes para lahares secundarios

Para la determinación de las zonas susceptibles a lahares se realizó un análisis de las quebradas provenientes del Complejo Volcánico Chachani, que contemplan la jurisdicción del distrito de Cerro Colorado, poniendo énfasis en aquellas quebradas que pueden afectar a zonas pobladas urbanas ubicadas aguas debajo de las mismas.

En consecuencia, se ha determinado un total de drenajes por donde podrían ocurrir este tipo de peligros. Las quebradas como Azufral, El Botadero, El Azufral,

Estanquillo, Añashuayco, Río Seco, La Paccha, Municipal, Apipa, José Bustamante y Rivero y Escalerilla 3, quienes están directamente relacionadas con zonas pobladas del distrito de Cerro Colorado (Fig. 16).

En cuanto a la definición de volúmenes para simulaciones numéricas, primero se ha calculado el volumen de agua entrante en cada cuenca hidrográfica, considerando la precipitación máxima diaria comprendida en la estación La pampilla desde 1931 a 2020 (SENAMHI, 2020), el área de las líneas divisorias que trazan la separación entre dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes. Producto de esto se obtendrá la cantidad o volumen de máxima escurrida y disponible en superficie.

Posteriormente se ha calculado el volumen de material disponible en cada cuenca hidrográfica adoptando espesores aproximados de los depósitos en cada cuenca, producto de este cálculo se obtiene volúmenes máximos de material disponible para ser mezclado con agua y generar lahares.

Finalmente, en función de la ubicación de cada cuenca hidrográfica y del tipo de material volcánico que cada una de estas puedan llegar a tener en las quebradas del CVC se ha utilizado el 60 % volumen de agua y 40 % de volumen de escombros, el cual representa el 100 % del volumen total de lahar producido.

$$\begin{aligned} V_t (\text{lahar}) &= V_{\text{Agua}} + V_{\text{sedimentos}} \\ 100 \% &= 60 \% + 40 \% \end{aligned}$$

Sin embargo, el cálculo de volumen de H₂O es igual a la precipitación por el área de la zona de generación de lahares.

$$V_{H_2O} = Pr * A_{(\text{Lahares})}$$

Donde:

V_{H_2O} = Volumen de H₂O

Pr = Precipitación

$A_{(\text{Lahares})}$ = Área de generación de lahares (Fig. 33).

6.1.3.3. Ingreso de datos en VolcFlow

Para realizar simulaciones con el código VolcFlow, se necesita de un script adicional de fuente que debe ser desarrollado particularmente, en el cual se especifican archivos de entrada como un Modelo Digital de Elevación (DEM), el área de la fuente que se va a simular y se especifican los archivos de salida, que pueden ser una serie de datos a exportar o simplemente un video de la simulación realizada; teniendo la opción de al final de cada simulación poder manipular los resultados, existen opciones en MatLab para exportar archivos .tif .img .jpg de los depósitos de cada simulación o incluso realizar representaciones en 3D.

Aquí se especifica el DEM del área en la cual realizaremos la simulación en formato (.grd), el área de la fuente del material en formato .tiff, las dimensiones en pixeles del área de la simulación (tamaño en pixeles de nuestro DEM), el tiempo activo de alimentación del material, el volumen del material (Cuadro 8), tiempo máximo de la simulación y el valor de la gravedad.

6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)

Quebrada/Río	Área de generación de lahares	Precipitación			Volumen		
		Baja	Moderada	Alta	Alto peligro	Moderado peligro	Bajo peligro
Qda. Azufral	2737280	0.025	0.05	0.125	114053.3	228106.7	570266.7
Qda. El Botadero	4250743	0.025	0.05	0.125	177114.3	354228.6	885571.5
Qda. El Azufral	3931915	0.025	0.05	0.125	163829.8	327659.6	819149.0
Qda. Estanquillo	9064049	0.025	0.05	0.125	377668.7	755337.4	1888343.5
Qda. Añashuayco	32019125	0.025	0.05	0.125	1334130.2	2668260.4	6670651.0
Qda. Río Seco	5387409	0.025	0.05	0.125	179580.0	448950.0	1122375.0
Qda. La Paccha	977239	0.025	0.05	0.125	32574.6	81.436.6	203.591.3
Qda. Municipal	681380	0.025	0.05	0.125	28390.8	56781.7	141954.2
Qda. Apipa	2483540	0.025	0.05	0.125	103480.8	206961.7	517404.2
Qda. José Bustamante y Rivero	195287	0.025	0.05	0.125	6509.6	16273.9	40684.8
Qda. Escalerilla 3	538349	0.025	0.05	0.125	22431.2	44862.4	112156.0

Cuadro 8. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Cerro Colorado, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta).

6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Cerro Colorado.

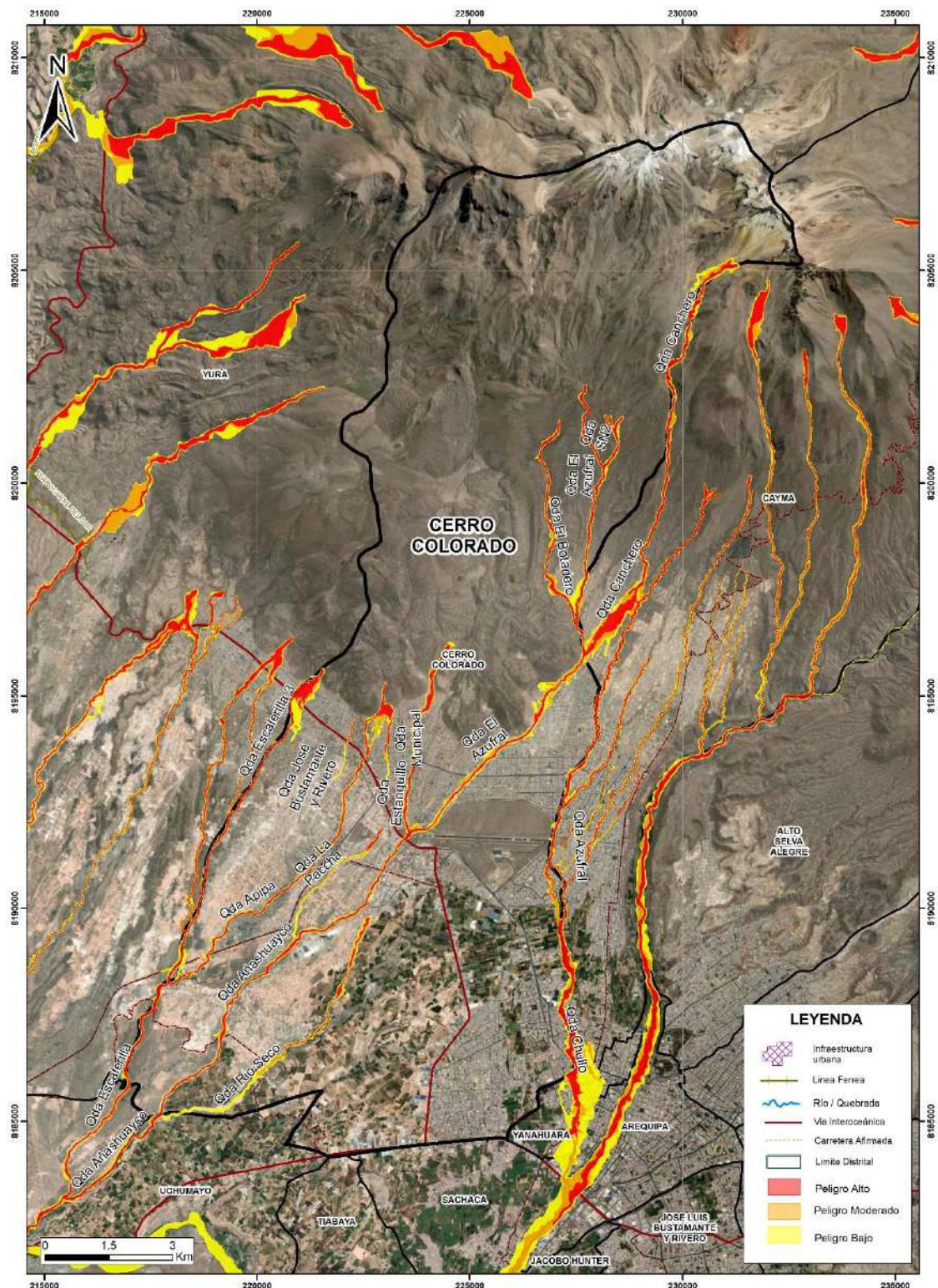


Figura 34. Mapa de lahares del distrito de Cerro Colorado.

7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR LAHARES

Se ha considerado como infraestructura a los cruces afirmados, instituciones educativas (inicial, primaria y secundaria), puentes, sitio recreacional, campos deportivos y estación de grifo; sin embargo, en algunas quebradas también se ven expuestas las viviendas para lo cual se requiere un estudio más detallado en esos sectores. Estas

infraestructuras o zonas con posible afectación se encuentran en 10 de las 11 quebradas simuladas del distrito de Cerro Colorado (Fig. 34) como se muestra en el (cuadro 9).

Nombre de quebrada	Numeración	Punto crítico	Este	Norte	Nivel de peligrosidad
Azufral	1	I.E. Pasitos de Jesús	227129.9	8192053.4	Bajo
	2	Campo deportivo	227026.9	8191806.6	Bajo
	3	Puente	226994.6	8191713.2	Alto
	4	Cruce afirmado	226946.2	8191442.3	Alto
	5	Cruce afirmado	226911.7	8191214.4	Alto
	6	Cruce afirmado	227498.6	8193323.1	Alto
El Azufral	7	I.E. Francisco de Sales	225776.5	8193857.1	Moderado
	8	I.E. Niños Villa Perú	225528.3	8193684.8	Moderado
	9	Cruce afirmado	225025.6	8193111.9	Alto
	10	Cruce afirmado	224577.8	8192591.4	Alto
	11	Cruce afirmado	224836.5	8192933.3	Alto
Estanquillo	12	Cruce afirmado	223655.4	8193226.5	Alto
	13	Cruce afirmado	223504.6	8192638.9	Alto
Añashuayco	14	Puente	223480.7	8191634.5	Alto
	15	Cruce afirmado	222929.5	8190852.2	Alto
	16	Cruce afirmado	221731.9	8189604.6	Alto
	17	Sitio recreacional-turístico	221337.7	8189495.7	Alto
Río Seco	18	Cruce afirmado	219959.4	8186065.4	Alto
La Paccha	19	Cruce afirmado	222842.1	8191764.5	Alto
	20	Cruce afirmado	222628.8	8191407.7	Alto
	21	Cruce afirmado	221733.2	8190845.7	Alto
Municipal	22	I.E. Nueva vida	222788.0	8194140.9	Bajo
	23	I.E. La Villa	222788.7	8194146.7	Bajo
	24	Campo deportivo	223046.5	8193583.7	Moderado
	25	Campo deportivo	222821.1	8194247.1	Moderado
	26	Campo deportivo	222876.7	8194137.8	Bajo
	27	Campo deportivo	222731.3	8193998.9	Moderado
Apipa	28	Cruce afirmado	222521.8	8193501.5	Alto
	29	Cruce afirmado	222442.4	8193434.5	Alto
	30	Cruce afirmado	222412.3	8193256.7	Alto
	31	Cruce afirmado	222041.3	8192546.1	Alto
	32	Cruce afirmado	222019.1	8192071.4	Alto
	33	Campo deportivo	221366.3	8191116.3	Alto
	34	Cruce afirmado	221275.6	8190944.8	Alto
	35	Cruce afirmado	219255.2	8189431.7	Alto
	36	Cruce afirmado	218831.9	8188894.9	Alto
José Bustamante y Rivero	37	Cruce afirmado	222124.6	8193626.1	Moderado
	38	Cruce afirmado	222061.4	8193558.9	Bajo
	39	Estación de grifo	220859.1	8195052.0	Alto

Escalerilla 3	40	I.E. Caminitos de Jesús	221332.0	8194961.6	Bajo
	41	I.E. San Maximiliano María Kolbe	220981.0	8194921.6	Moderado
	42	I.E. San Miguel Arcángel	220921.1	8194778.2	Bajo
	43	I.E. Prite Yura	220906.3	8194552.7	Bajo

Cuadro 9. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan áreas urbanas en el distrito de Cerro Colorado.

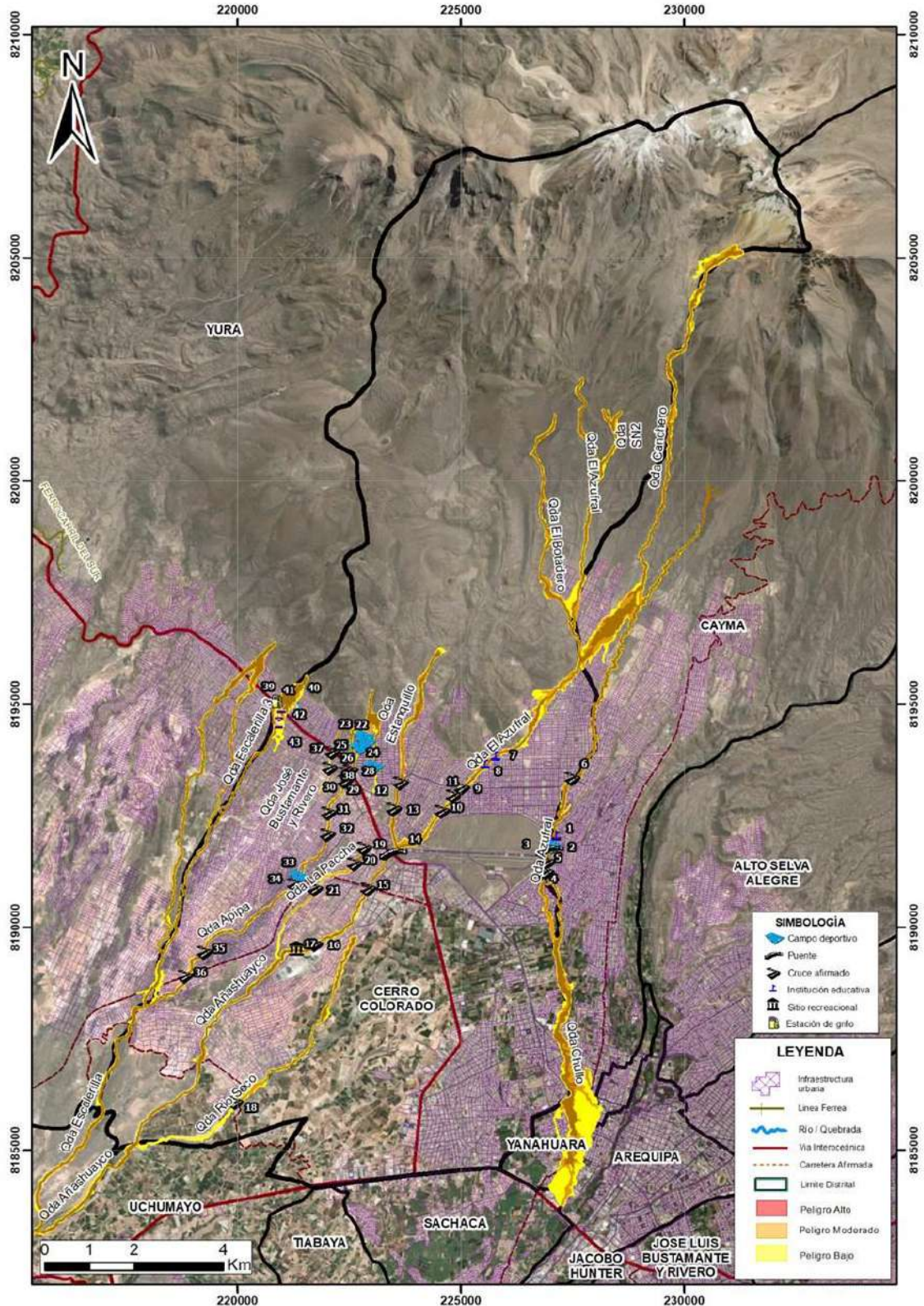


Figura 35. Mapa de puntos críticos en las quebradas del distrito de Cerro Colorado.

7.1. Simulación en la quebrada Azufral

Mediante la simulación de la quebrada Azufral (Fig. 36) presenta 6 puntos críticos: 3 cruces afirmados (Fig. 37) donde se encuentra material aluvial de fácil transporte, 1 puente (Fig. 38), todos con un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25

mm, 1 I.E. Pasitos de Jesús y 1 campo deportivo (Fig. 39) con un nivel de peligrosidad bajo con precipitaciones de hasta 125 mm.

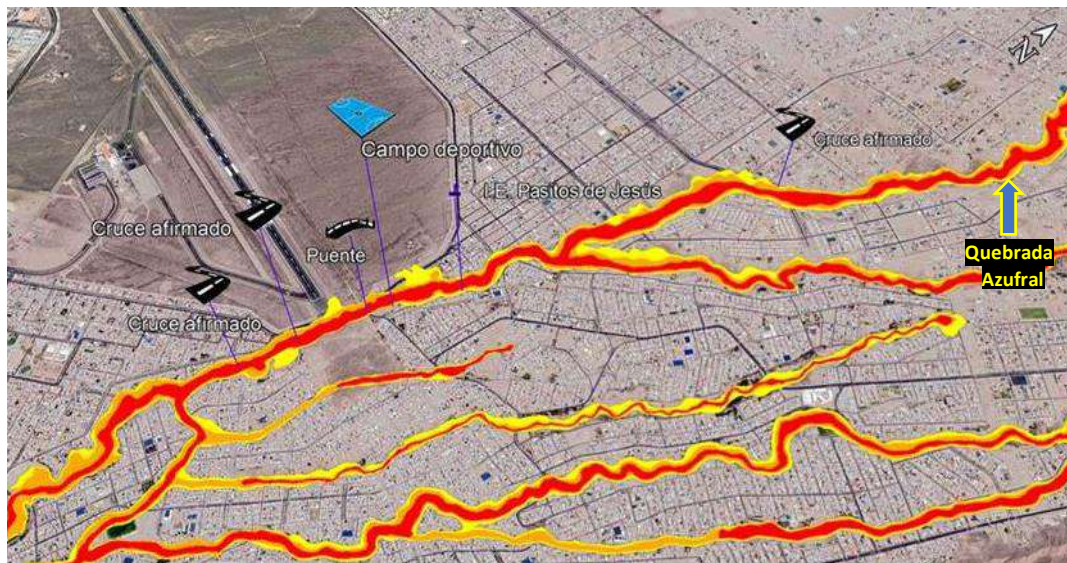


Figura 36. Simulación de lahares (peligros bajo, moderado y alto) en la quebrada Azufral.



Figura 37. Cruce afirmado en el sector alto de la quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 227498 E, 8193323 N).



Figura 38. Puente (Punto crítico), construido sobre depósitos de desmonte, quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 226994 E, 8191713 N).



Figura 39. Campo deportivo (Punto crítico) cercano al margen izquierdo de la quebrada Azufral (Coordenadas UTM WGS84 227026 E, 8191806 N).

7.2. Simulación en la quebrada El Azufral

La simulación de la quebrada El Azufral (Fig. 40) se encuentran 5 puntos críticos, 2 (I.E. Francisco de Sales y I.E. Niños Villa Perú) con un nivel de peligrosidad moderado con precipitaciones de hasta 50 mm y 3 cruces afirmados (Fig. 41) con un nivel de peligrosidad alto generados por precipitaciones 25 mm.

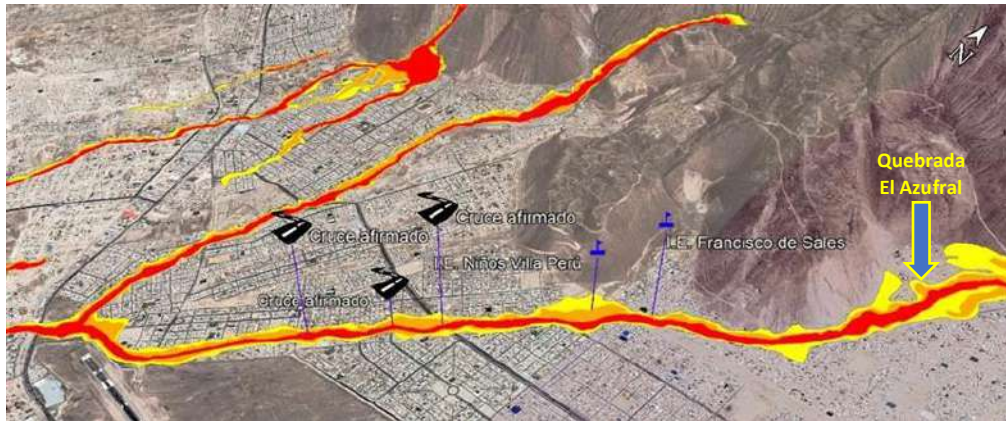


Figura 400. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada El Azufra.



Figura 41. Cruce afirmado (punto crítico) en la quebrada El Azufra, alcantarillas o pontones parcialmente cubiertos por basura (Coordenadas UTM WGS84 225080 E, 8193159 N).

7.3. Simulación en la quebrada Estanquillo

En la quebrada Estanquillo (Fig. 42), entre los puntos críticos identificados se encuentran 2 cruces afirmados una de ellas se ubica en la av. 54 (Fig. 43) y más al sur av. sin nombre cercano al cementerio de Cerro Colorado, que podrían verse afectados con un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25 mm.



Figura 42. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Estanquillo.



Figura 43. Cruce afirmado, observándose cerca al cauce viviendas prefabricadas y material de desmonte, quebrada Estanquillo (Coordenadas UTM WGS84 223655 E, 8193226 N).

7.4. Simulación en la quebrada Añashuayco

En la quebrada Añashuayco se han identificado 4 puntos críticos (Fig. 44) que podrían verse afectadas por un eventual flujo de detritos (lahares): 1 puente (Fig. 45), 2 cruces afirmados ubicados en la av. Industrial y en el sector medio-inferior de la quebrada (Fig. 46) y 1 sitio recreacional-turístico (Fig. 47), todos presentan un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25 mm.

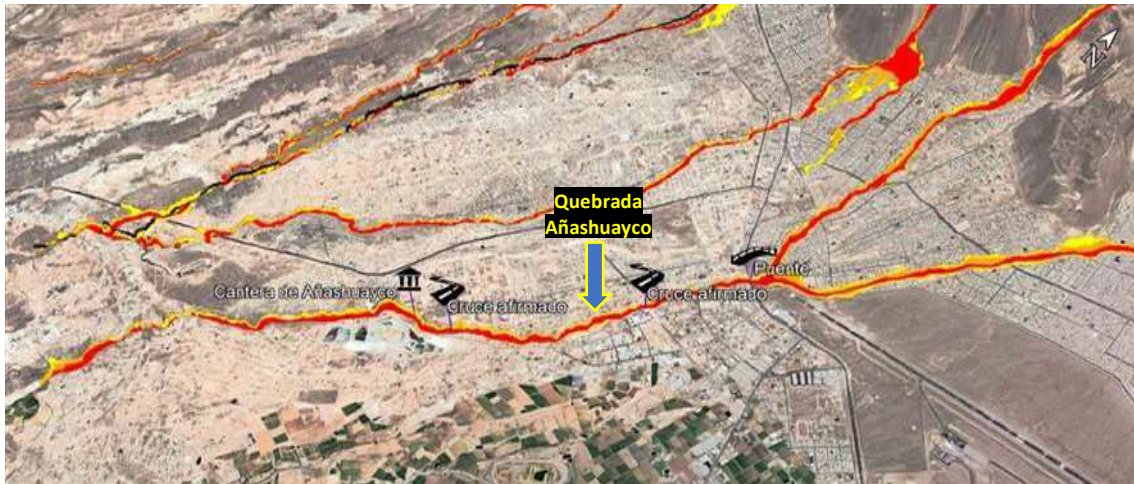


Figura 44. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Añashuayco.



Figura 45. Puente Añashuayco (Punto crítico) con depósito de desmonte y basura en las laderas y lahares recientes en el cauce (Coordenadas UTM WGS84 223480 E, 8191634 N).



Figura 46. Cruce (punto crítico) en la Quebrada Añashuayco (Coordenadas UTM WGS84 221731 E, 8189604 N).



Figura 47. Cauce de la quebrada Añashuayco en el sitio recreacional-turístico (Coordenadas UTM WGS84 221337 E, 8189495 N).

7.5. Simulación en la quebrada Río Seco

En esta quebrada solo se ha ubicado 1 punto crítico (Fig. 48), el cual corresponde a un cruce afirmado, con un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25 mm, ubicado en el sector bajo de la quebrada por donde hay viviendas y población cercana.



Figura 48. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Río seco.

7.6. Simulación en la quebrada La Paccha

En la quebrada La Paccha se han encontrado 3 puntos críticos (Fig. 49), correspondientes a 3 cruces afirmados que atraviesan de forma tangencial, todos representando un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25 mm. Además, uno de ellos se encuentra sobre depósitos de desmonte (Fig. 50).



Figura 49. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada La Paccha.



Figura 500. Punto crítico: Cruce afirmado construido sobre material de desmonte y relleno (Coordenadas UTM WGS84 222628 E, 8191407 N).

7.7. Simulación en la quebrada Municipal

En la quebrada Municipal se encuentran 6 puntos críticos (Fig. 51), 2 de son instituciones educativas (I.E. Nueva vida y I.E. La villa) y 1 campo deportivo que presentan un nivel de peligrosidad bajo con precipitaciones de hasta 125 mm y 3 campo deportivo con un nivel de peligrosidad moderado con precipitaciones de hasta 50 mm (Fig. 52).

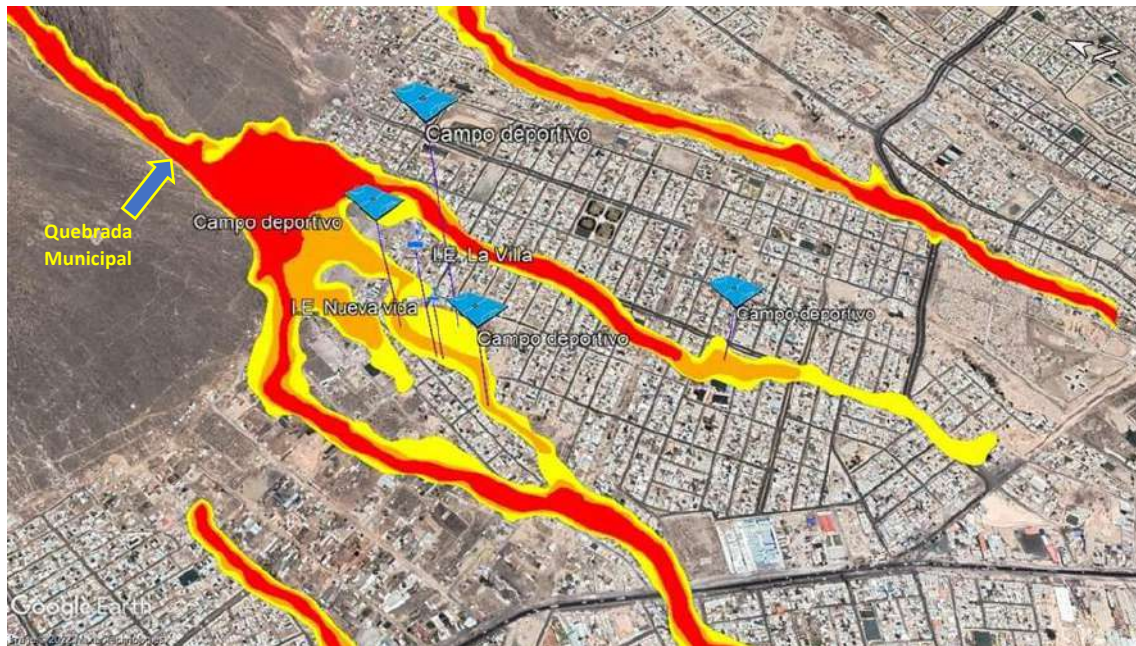


Figura 51. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Municipal.



Figura 52. Campo deportivo (punto crítico) construido sobre una de las bifurcaciones de la quebrada Municipal, se encuentra con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 222821 E, 8194247 N).

7.8. Simulación en la quebrada Apipa

En la quebrada Apipa se encuentran 9 puntos críticos (Fig. 53): 8 cruces afirmados surcados de forma tangencial por la quebrada Apipa (Fig. 54) y 1 campo deportivo construido muy cerca a ladera izquierda quebrada abajo, todos con un nivel de peligrosidad alto con precipitaciones de hasta 25 mm.

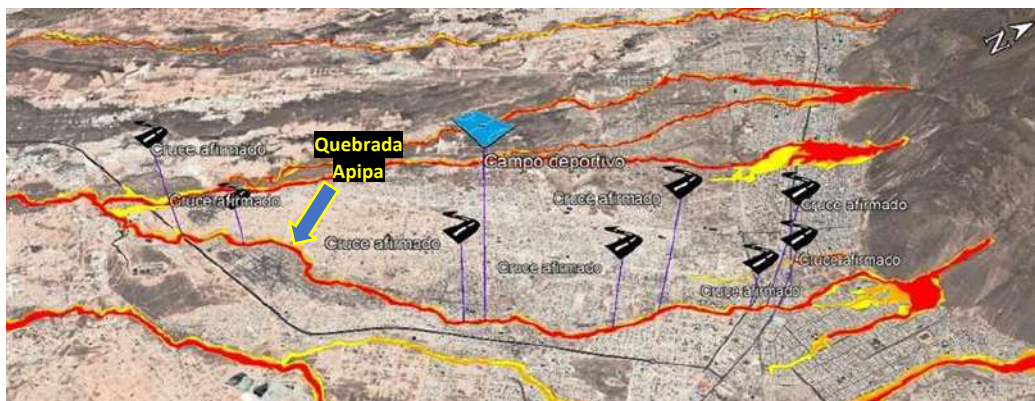


Figura 53. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada Apipa.



Figura 54. Cruce afirmado (punto crítico), se observa relleno por depósitos antrópicos (desmonte y basura) (Coordenadas UTM WGS84 222521 E, 8193501 N).

7.9. Simulación en la quebrada José Bustamante y Rivero

En la quebrada José Bustamante y Rivero se ha identificado 2 puntos críticos (Fig. 55), que corresponden a 2 cruces afirmados, una de ellas corresponde a la carretera a Yura posee un nivel de peligrosidad moderado (Fig. 56) con precipitaciones de hasta 50 mm y la segunda se encuentra con un nivel de peligrosidad bajo para precipitaciones de hasta 125 mm.



Figura 55. Simulación de lahares (peligro, bajo, moderado y alto) en la quebrada José Bustamante y Rivero.



Figura 56. Punto crítico: Cruce afirmado en la quebrada José Bustamante y Rivero con muros que llegan hasta el cauce de la quebrada (Coordenadas UTM WGS84 222124 E, 8193626 N).

7.10. Simulación en la quebrada Escalerilla 3

De acuerdo con los resultados de simulación para flujos de detritos (lahares) en la quebrada Escalerilla 3 se ha identificado 5 puntos críticos (Fig. 57), se observa 1 estación de grifo (Fig. 58) que podrían verse afectados con un nivel de peligrosidad alto, para un escenario de precipitación de 25 mm, con precipitaciones de 50 mm la I.E. San Maximiliano María Kolbe (Fig. 59) podría verse afectado con un nivel de peligrosidad moderado y para un nivel de peligrosidad bajo se verían afectadas 3 I.E: Caminitos de Jesús, San Miguel Arcángel (Fig. 60) y Prite Yura con precipitaciones de hasta 125 mm.

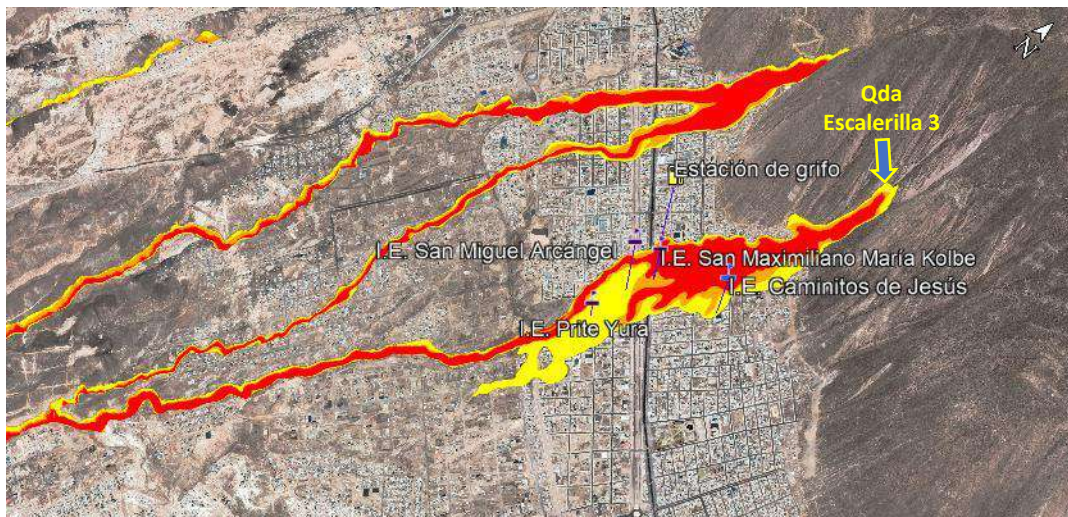


Figura 57. Simulación de lahares en la quebrada Escalerilla 3.



Figura 58. Estación de grifo, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad alto (Coordenadas UTM WGS84 220859 E, 8195052 N).



Figura 59. I.E. San Maximiliano María Kolbe, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 220981 E, 8194921 N).



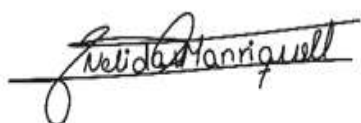
Figura 600. I.E. San Miguel Arcángel, según la simulación se vería afectado por lahares con un nivel de peligrosidad moderado (Coordenadas UTM WGS84 220921 E, 8194778 N).

8. CONCLUSIONES

1. El distrito de Cerro Colorado (Parte urbana), se encuentra asentada principalmente sobre el depósito de corriente de densidad piroclástica denominada Ignimbrita Aeropuerto Arequipa, la cual se encuentra disectada por quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani por donde se han emplazado depósitos de lahares del Pleistoceno (consolidados) y del Holoceno (poco consolidados y no consolidados).
2. Se identificaron un total de 11 quebradas por donde se pueden generar flujos de detritos (lahares) y se hizo el análisis de puntos críticos en 10 quebradas que atraviesan la parte urbana: Azufral, El Azufral, Estanquillo, Añashuayco, Río Seco, La Paccha, Municipal, Apipa, José Bustamante y Rivero y Escalerilla 3.
3. Se identificó 43 puntos críticos en el distrito de Cerro Colorado. Distribuidos de la siguiente manera:
 - a) 06 en la quebrada Azufral, entre ellas: 1 Institución educativa, 1 campo deportivo, 1 puente y 7 cruces afirmados, con niveles de **peligrosidad alto y bajo**.
 - b) 05 en la quebrada El Azufral, entre ellas: 3 cruces afirmados, 2 instituciones educativas, con niveles de **peligrosidad alto y moderado**.
 - c) 02 en la quebrada Estanquillo, entre ellas: 2 cruces afirmados; con niveles de **peligrosidad alto**.
 - d) 04 en la quebrada Añashuayco entre ellas: 2 cruces afirmados, 1 puente y 1 sitio recreacional-turístico, con niveles de **peligrosidad alto**.
 - e) 01 en la quebrada Río Seco, entre ellas: 1 cruce afirmado, con un nivel de **peligrosidad alto**.
 - f) 03 en la quebrada La Paccha, entre ellas: 3 cruces afirmados, con niveles de **peligrosidad alto**.
 - g) 06 en la quebrada Municipal, entre ellas: 4 campos deportivos y 2 instituciones educativas, con niveles de **peligrosidad moderado y bajo**.
 - h) 09 en la quebrada Apipa, entre ellas: 8 cruces afirmados y 1 campo deportivo, con niveles de **peligrosidad alto**.
 - i) 02 en la quebrada José Bustamante y Rivero, entre ellas: 2 cruces afirmados, con niveles de **peligrosidad moderado y bajo**.
 - j) 05 en la quebrada Escalerilla 3, entre ellas: 4 instituciones educativas y 1 estación de grifo, con niveles de **peligrosidad alto, moderado y bajo**.

9. RECOMENDACIONES

1. Utilizar los resultados de simulación elaborado en el presente informe, para elaborar planes de contingencia en las zonas afectadas por lahares.
2. Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) para los lahares sobre todo en las quebradas que atraviesan áreas urbanas del distrito de Cerro Colorado.
3. Se deben ampliar y no reducir los cauces de las quebradas, se debe respetar su cauce natural. Realizar la limpieza periódica
4. Se sugiere construir muros de contención o disipadores de energía, para ello se debe realizar un estudio completo en tramos de quebradas identificados como puntos críticos.
5. La autoridad local pertinente debe emitir ordenanzas que restrinjan la construcción de viviendas en zonas de alto peligro por lahares, cauces de las quebradas, en fajas marginales o límite natural de un río o quebrada.
6. Sensibilizar a la población a través de talleres y charlas con el objetivo de concientizar en gestión de riesgos para evitar construcción de viviendas o infraestructura área susceptibles a la ocurrencia de lahares.
7. Utilizar los resultados de simulación elaborado en el presente informe, para elaborar planes de contingencia en las zonas afectadas por lahares.



Nérida Victoria Manrique Llerena



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL
Director
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

BIBLIOGRAFÍA

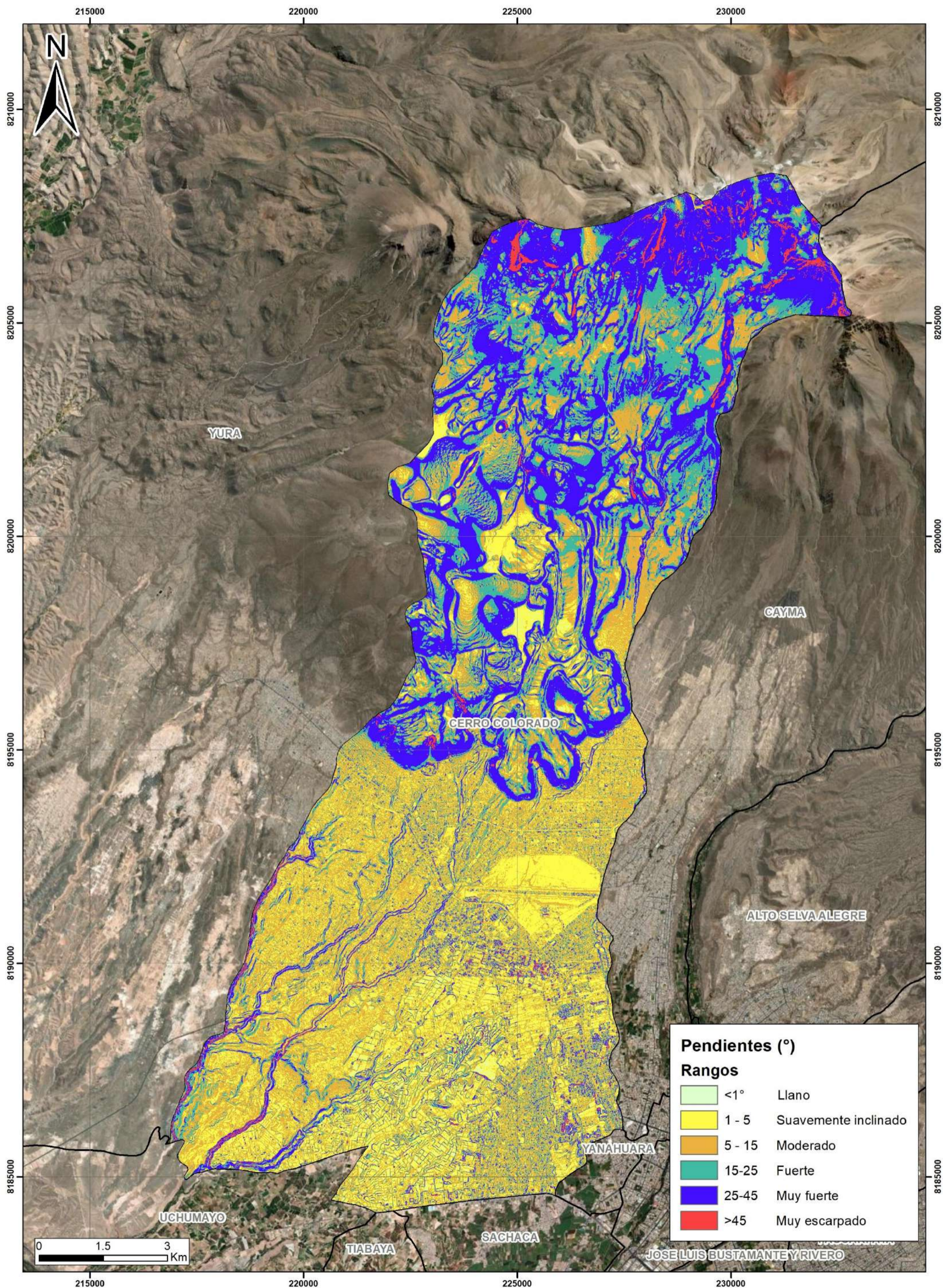
- Córdoba, G., G, V., F, S. M., G, V. J., D, B., & G., S. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. European Geosciences union, 9p.
- Fuentes, D;. (2015). Lahares secundarios: análisis de parámetros físicos en depósitos pirolásticos y su relación con los mecanismos generadores. Tesis Pregrado: Universidad de Chile.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Resultados definitivos sobre la Población Económicamente Activa del departamento de Arequipa de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INGEMMET. (Extraído el 03 de febrero del 2022). Observatorio vulcanológico del Ingemmet (OVI). Obtenido de Tipos de erupciones: , desde http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=102#:~:text=Las%20erupciones%20volc%C3%A1nicas%20son%20el,roca%20fundida%2C%20gases%20y%20cristales.&text=Si%20los%20gases%20del%20magma,a%20la%20superficie%20sin%20explotar.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico. (2022). Evaluación de peligros geológicos por flujo de detritos (lahares) en el centro poblado Yalaque y en la quebrada El Volcán. Distritos La Capilla y Quinistaquillas, Provincia de General Sánchez Cerro, Departamento Moquegua. 54p: ngemmet, Informe Técnico N° A7212.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. Geological Society of America Bulletin, v. 110, N°8, 12p.
- Kelfoun, K., & Druit, t. T. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. J. Geophys. Res., B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 13p.
- Lugo, J. (1988). Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J., & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti. INGEMMET. Lima: Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Martín-Serrano, Á., Salazar, Á., Nozal, F., & Suárez, Á. (2004). Mapa geomorfológico de España a escala 1:50 000. Madrid, 1-128 p.: Guía para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España, .
- Sánchez, R., Mayorga, R., & Urrego, L. &. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, 1, Bucaramanga, 8p.
- Siebert, L., Cottrell, E., E, V., & AndrewsA. (2015). The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition). U.S. National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, Washington, DC, USA.

- Tilling, R. (1993). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 2-3 julio 1989. [s.l.], 125p.
- Vallance, J. W. (2001). Lahars. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, Encyclopedia of Volcanoes. Londres: Academic Press.
- Vallance, J., & Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. Encyclopedia of volcanoes, 26p.
- Vásconez, R., Hall, M., & Mothes, P. (2009). Devastadores flujos de lodo disparados en el volcán Carihuairazo por el terremoto del 20 de Junio de 1698. Revista Politécnica. Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 20p.
- Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación Numérica y Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán Cotopaxi. Revista Politécnica, 11p.

ANEXO: MAPAS

- 1:** Mapa de pendientes del terreno del distrito de Cerro Colorado. Fuente: Elaboración Propia.
- 2:** Mapa geomorfológico del distrito de Cerro Colorado a partir de la clasificación de unidades geomorfológicas de la especificación técnica DGAR-ET-002 V-2 elaborada por el INGEMMET a escala 1:25,000. Fuente: Elaboración Propia.
- 3:** Mapa geológico del distrito de Cerro Colorado. Fuente: Elaboración Propia
- 4:** Mapa de Simulación de flujo de detritos (lahares), en el distrito de Cerro Colorado. Fuente: Elaboración Propia.

MAPA DE PENDIENTES DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO



MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO

220000

225000

230000

235000

8210000

8205000

8200000

8195000

8190000

8185000

8210000

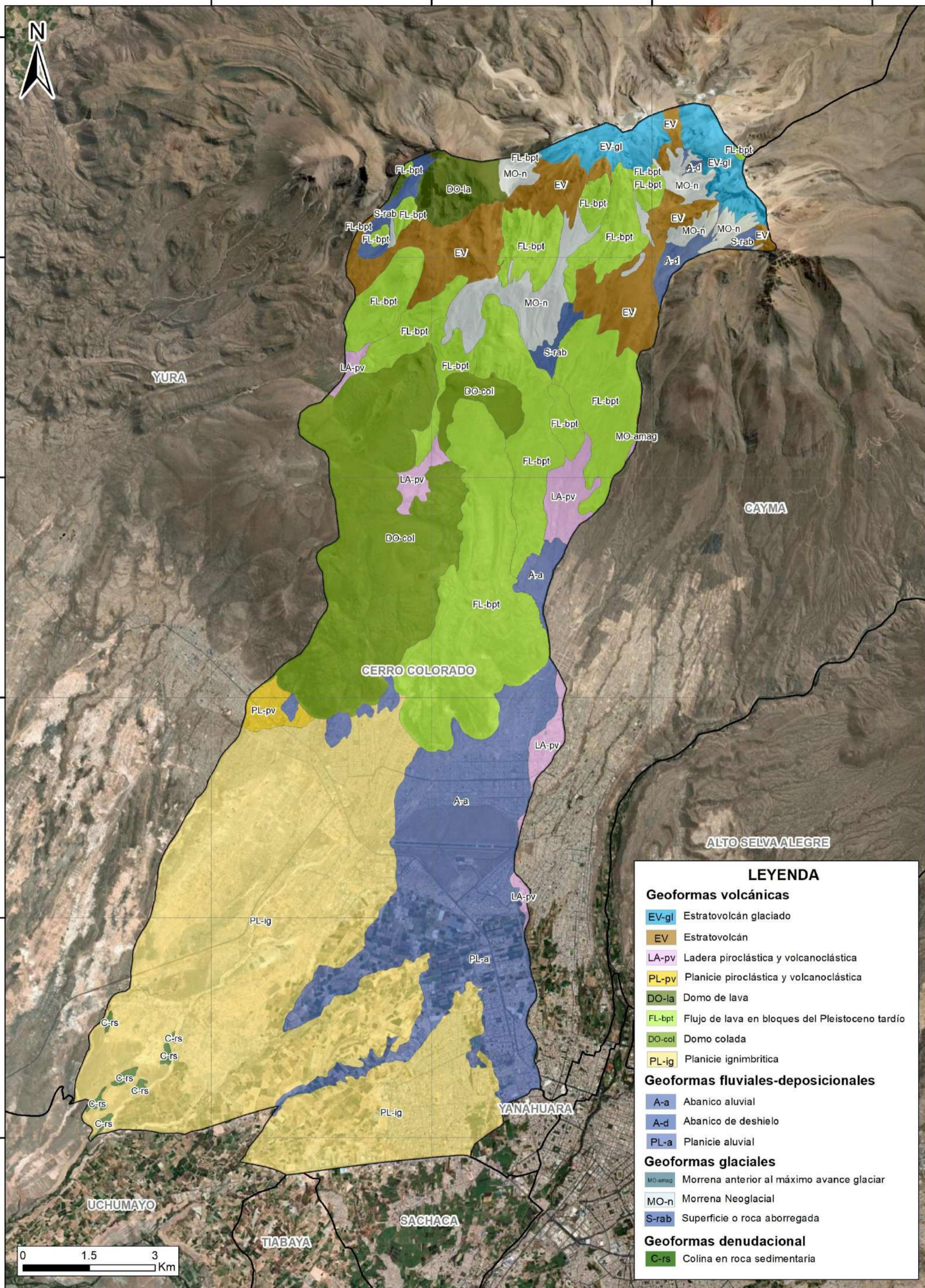
8205000

8200000

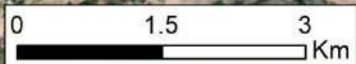
8195000

8190000

8185000



LEYENDA	
Geomorfos volcánicas	
EV-gl	Estratovolcán glaciado
EV	Estratovolcán
LA-pv	Ladera piroclástica y volcanoclástica
PL-pv	Planicie piroclástica y volcanoclástica
DO-la	Domo de lava
FL-bpt	Flujo de lava en bloques del Pleistoceno tardío
DO-col	Domo colada
PL-ig	Planicie ignimbrítica
Geomorfos fluviales-deposicionales	
A-a	Abanico aluvial
A-d	Abanico de deshielo
PL-a	Planicie aluvial
Geomorfos glaciales	
MO-amag	Morreña anterior al máximo avance glaciario
MO-n	Morreña Neoglacial
S-rab	Superficie o roca aborregada
Geomorfos denudacional	
C-rs	Colina en roca sedimentaria



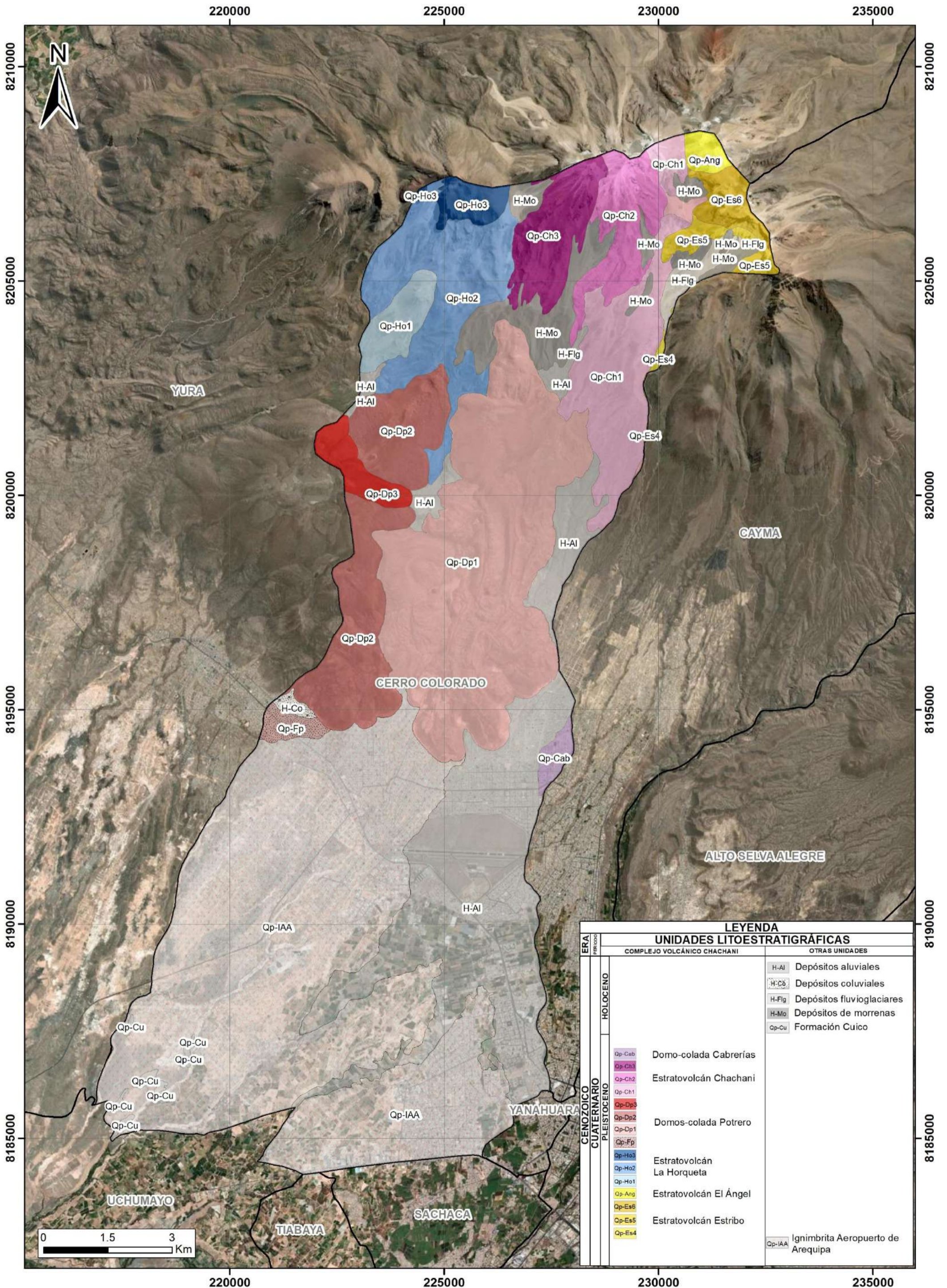
220000

225000

230000

235000

MAPA GEOLÓGICO DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO



MAPA DE LAHARES DEL DISTRITO DE CERRO COLORADO

