



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico
del deslizamiento de madrigal – Arequipa**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
mención en Geotecnia

AUTOR

Juan Carlos GÓMEZ AVALOS

ASESOR

Ciro Sergio BEDIA GUILLÉN

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Gómez, J. (2017). *Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de madrigal – Arequipa*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

493
201



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMERICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA



UNIDAD DE POSGRADO

«Año del buen servicio al ciudadano»

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Lima, a los tres días del mes de marzo del 2017, siendo las 17.30 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 002/UPG-FIGMMG/2017 del 05 de enero del 2017, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TITULO

«EVALUACIÓN GEODINÁMICA Y MODELAMIENTO GEOTÉCNICO DEL DESLIZAMIENTO DE MADRIGAL - AREQUIPA»

Que, presenta el Bach. **JUAN CARLOS GOMEZ AVALOS**, para optar el **GRADO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA** con mención en **GEOTECNIA**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente 01770-FIGMMG-2013 del 01 de marzo del 2013, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas de la Directiva para el procedimiento de la elaboración de la tesis para la obtención del Grado de Magister o Doctor (Aprobado por Resolución Directoral 080.EPG.2010).

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA** con mención en **GEOTECNIA** al Bach. **JUAN CARLOS GOMEZ AVALOS**.

Siendo las 18.30 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. NESTOR ITALO CHACON ABAD
Presidente

MG. ENRIQUE GUADALUPE GOMEZ
Secretario

MG. JORGE ESCALANTE CONTRERAS
Miembro

MG. VICTOR ABEL TOLENTINO YPARRAGUIRRE
Miembro

MG. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN
Asesor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer término, a mis padres Nelson y Juana por motivarme siempre en los estudios que seguí, y a toda mi familia en general que son el motor para que yo siga cumpliendo mis metas profesionales.

A mi asesor, MSC. Ciro Bedia por los consejos para el desarrollo del tema de tesis.

A los profesores Nestor Chacón y Enrique Guadalupe por su apoyo en la investigación realizada.

Al Instituto Geofísico del Perú, por permitirme tomar información de los proyectos de investigación que se realizan en esta entidad para el tema presentado como tesis.

INDICE

	Página
RESUMEN	
CAPITULO I INTRODUCCION	
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 Situación problemática	12
1.2 Formulación del problema	14
1.3 Justificación de la investigación	14
1.4 Objetivos de la investigación	15
1.4.1 Objetivo general	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	16
2.2 BASES TEÓRICAS	20
2.2.1 Evaluación geodinámica	20
2.2.2 Movimientos en masa	22
2.2.3 Análisis de estabilidad de taludes	27
2.2.4 Modelado numérico utilizando elementos finitos	31
2.2.5 Procesos de geodinámica interna	35
2.2.6 Geotecnia	37
2.2.7 Mecánica de suelos	38
2.2.8 Geofísica aplicada: Prospección eléctrica	48
2.2.9 Métodos directos de evaluación de deslizamientos	52
2.2.10 Vulnerabilidad física	54
2.2.11 Mitigación	55
2.3 MARCO CONCEPTUAL O GLOSARIO	59

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1	TIPO DE INVESTIGACION	63
3.2	UNIDAD DE ANALISIS	63
3.3	POBLACION DE ESTUDIO	63
3.4	TAMAÑO DE MUESTRA	63
3.5	SELECCIÓN DE MUESTRA	64
3.6	TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS	64
3.7	HIPOTESIS Y VARIABLES	66
	3.7.1 Hipótesis general	66
	3.7.2 Hipótesis Específicas	66
	3.7.3 Identificación de variables	66
	3.7.4 Operacionalización de variables	67

CAPÍTULO IV GENERALIDADES

4.1	UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD	68
4.2	HIDROLOGÍA GENERAL	70
4.3	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	75
4.4	GEOLOGÍA REGIONAL	82
4.5	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL	99
	4.5.1 Unidades morfológicas	99
	4.5.2 Unidades litológicas	103

CAPÍTULO V GEODINÁMICA EXTERNA

5.1	ÁREAS AFECTADAS POR DESLIZAMIENTOS	110
5.2	ESTIMACIÓN DE ÁREAS INESTABLES	112
5.3	PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASAS EN MADRIGAL	112
5.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA EN MADRIGAL	112
5.5	CAUSAS DE LA INESTABILIDAD	114

CAPÍTULO VII GEODINÁMICA INTERNA

6.1	COMPLEJOS VOLCÁNICOS Y ACTIVIDAD SÍSMICA	115
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA	116
6.3	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS SÍSMICOS	119

CAPÍTULO VII INVESTIGACIONES EN EL SUBSUELO

7.1	INSTRUMENTAL	121
7.2	TRABAJO DE CAMPO	122
7.3	OPERACIONES DE CAMPO	123
7.4	PROCESAMIENTO	126
7.5	INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS	126

CAPÍTULO VIII GEOTECNIA

8.1	UBICACIÓN DE EXPLORACIONES GEOTÉCNICAS	136
8.2	TIPOS DE SUELOS	140

CAPÍTULO IX ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

9.1	GEOMETRÍA DEL TALUD EN MADRIGAL	144
9.2	MODELADO NUMÉRICO DEL DESLIZAMIENTO	152
9.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	164

CAPÍTULO X MONITOREO GEODÉSICO DEL DESLIZAMIENTO

10.1	REDES DE MONITOREO GEODÉSICO: GPS Y EDM	167
------	---	-----

CAPÍTULO XI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1	Análisis, interpretación y discusión de resultados	177
11.2	Pruebas de hipótesis	181
11.3	Resultados	182

CONCLUSIONES	192
---------------------	-----

RECOMENDACIONES	194
------------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195
-----------------------------------	-----

RELACION DE CUADROS

1. Cálculo de la estabilidad de taludes
2. Coordenadas UTM del área de estudio
3. Distancias desde Arequipa a Madrigal
4. Ubicación de SEV en el deslizamiento de Ushina
5. Ubicación de SEV en el deslizamiento de Pullhuay
6. Valores de resistividad verdadera en Uchina
7. Valores de resistividad verdadera en Pullhuay
8. Ubicación de calicatas
9. Valores obtenidos del ensayo de corte directo
10. Capacidad de carga de los 5 muestras de suelos de Madrigal
11. Rango de capacidad de carga admisible
12. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales del talud
13. Puntos de control con estación total en el deslizamiento de Madrigal

RELACIÓN DE FIGURAS

1. Vista panorámica del deslizamiento de Madrigal
2. Características de un deslizamiento rotacional

3. Superficies de ruptura en deslizamiento rotacional
4. Deslizamiento traslacional
5. Esparcimiento lateral
6. a) Flujo de detritos b) Partes de un flujo de tierra
7. Búsqueda del círculo crítico
8. Ejemplo de discretizaciones de elementos finitos
9. Medio poroso saturado y heterogéneo
10. Elemento individual
11. Disposición geométrica de los electrodos
12. Esquema de la distribución del agua en el subsuelo
13. Medición de la resistividad en laboratorio
14. Líneas de c
15. orriente y superficies equipotenciales
16. Estructuras de sostenimiento adecuadas para zonas con taludes inestables
17. Drenajes de coronación y anclajes
18. Aspersores ubicados en zonas de talud inestable
19. Esquema de un muro de contención para control de empujes en zonas desestabilizadas
20. Cumbre del volcán Hualca Hualca
21. Zona de laderas con flancos de fuerte pendiente en Madrigal
22. Unidad de planicies altas
23. Unidad de valle represado
24. Zona del valle cañón a la altura de la Cruz del Cóndor – Cabanaconde
25. Complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca-Hualca
26. Afloramientos del Grupo Yura en Madrigal
27. Afloramiento del volcánico Tacaza
28. Coladas de lavas y depósitos de avalancha de escombros en Quebrada Hualca Hualca
29. Esquema del marco geológico-tectónico en el Altiplano del Sur de Perú
30. Laderas de montaña en Madrigal.
31. Zona de terrazas aledañas al río Colca
32. Afloramiento del Grupo Yura en zona de Peña Blanca
33. Afloramiento del volcánico Tacaza indiviso en Madrigal.
34. Depósitos aluviales en terrazas bajas de Madrigal
35. Depósitos de avalancha de escombros conformando colinas tipo hummocks en Madrigal
36. Depósitos lacustrinos en parte baja de Madrigal
37. Fotointerpretación multi-temporal período 1957-1997 de los deslizamientos activos en el valle del río Colca.
38. Caracterización tectónica del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y el valle del río Colca.
39. Equipo de resistividad eléctrica usado en Madrigal.
40. Dispositivo Schulemberger
41. Dispositivo tetraédrico Schulemberger
42. Variables para el cálculo de la resistividad aparente
43. Ubicación de los 9 SEV en Madrigal
44. Toma de datos de resistividad eléctrica en campo
45. Sección geoeléctrica A-A´Uchina
46. Sección geoeléctrica B-B´Uchina

47. Sección geoelectrica C-C´Pullhuay
48. Sección geoelectrica D-D´Pullhuay
49. Calicata MAD 01
50. Calicata MAD 02
51. Calicata MAD 03
52. Tipo de falla circular en un deslizamiento rotacional
53. Tipo de superficie de falla circular en suelos
54. Ubicación de las secciones A-A´ y B-B´ en Madrigal
55. Análisis estático en Sección A-A´
56. Análisis pseudo-estático en sección A-A´
57. Análisis estático en sección B-B´
58. Análisis pseudoestático en sección B-B´
59. Algoritmo del programa de modelamiento geotécnico
60. Representación gráfica de un Modelo Digital del Terreno.
61. Gráficas comparativas de los MDT generados con diferente fuente.
62. MDT generado con MATHLAB
63. Gráficas de MDT usando Global Mapper y Mathlab.
64. Gráficas de pendientes con Mathlab
65. Gráficas comparativas utilizando Arcgis y Mathlab respectivamente.
66. Esquema conceptual principal del modelo.
67. Malla establecida para corrida del modelo numérico.
68. Análisis de estabilidad en estático perfil B-B´
69. Análisis de estabilidad en pseudoestático del perfil B-B´
70. Distribución de las presiones de poro en el perfil B-B´
71. Gráfica de esfuerzos y aceleraciones
72. (a,b,c,d, y e) Evolución de la deformación del deslizamiento.
73. Ubicación de los puntos de control topográfico en el deslizamiento de Madrigal.
74. Base EDM al frente de Madrigal.
75. Punto de control EDM en Madrigal.
76. Tasas de desplazamiento del terreno en Madrigal período 2007-2011.
77. Puntos de control GPS en Madrigal.
78. Sitio GPS MAD4 parte baja deslizamiento Ushina.
79. Sitio GPS MAD3 parte media del deslizamiento de Madrigal.
80. Sitio GPS MAD 1 parte alta de Madrigal.
81. Sitio GPS MAD2 Plaza de Armas de Madrigal.
82. Vectores de desplazamiento del deslizamiento de Madrigal.
83. Punto de control MAD4, muestra desplazamiento en los 3 ejes.
84. Punto de control MAD3, comportamiento similar a MAD4.
85. Punto de control MAD1 comportamiento similar a los dos anteriores.
86. Rellenos estabilizadores al pie del talud.
87. Esquema de estructuras de mitigación en cabecera del deslizamiento.
88. Estructura tipo gaviones para estabilización del talud.
89. Sección A-A´ que atraviesa perpendicularmente a Madrigal y zona de deslizamiento.
90. Sección topográfica actual y con mejora de estabilidad.
91. Perfil transversal de Madrigal que muestra infraestructura proyectada.

RELACIÓN DE TABLAS

1. Identificación de elementos finitos
2. Clasificación de suelos de acuerdo a la granulometría
3. Simbología utilizada en la clasificación SUCS
4. Características granulométricas del suelo
5. Descripción de los tipos de suelos SUCS
6. Clasificación de los suelos finos.
7. Clasificación de los suelos orgánicos
8. Promedio de precipitación anual estación Madrigal
9. Promedio de temperatura anual. Estación de Madrigal.
10. Formato de adquisición y procesamiento de datos GPS.

RELACIÓN DE PLANOS

- P-01 Ubicación
- P-02 MDT
- P-03 Pendientes
- P-04 Geomorfología regional
- P-05 Geomorfología local
- P-06 Geología regional
- P-07 Geología local
- P-07b Geodinámico
- P-08 Tipos de suelo
- P-09 Capacidad de carga admisible

RESUMEN

Los fenómenos naturales que se derivan de la inestabilidad de laderas se han convertido en uno de los desastres más recurrentes que se registran en la actualidad. La mayoría de estos problemas son el resultado de la interacción entre las condiciones climáticas, geodinámicas y la vulnerabilidad de un gran número de asentamientos humanos. Un caso es el ocurrido en el distrito de Madrigal, Provincia de Caylloma, Arequipa, poblado afectado por un deslizamiento rotacional que se activó desde 1959 y que actualmente muestra un alto peligro y por ende niveles de vulnerabilidad física altos.

Madrigal se localiza en la parte media del valle del río Colca, que en sus partes altas alberga una cadena de volcanes activos denominados Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, éste último sufrió en el Pleistoceno Tardío un colapso de flanco que originó una avalancha de escombros que cambió radicalmente la morfología del valle en este sector. Esta avalancha de escombros represó el río Colca y formó un paleolago, por ese motivo actualmente se encuentran conspicuos depósitos lacustres como suelos de cimentación en diversos poblados, uno de ellos es Madrigal.

Estudios de fotointerpretación de fotos aéreas de los años 1955, 1970 y 1997 determinaron que en casi 50 años el deslizamiento de Madrigal incrementó el área inestable en 0.6 km².

El deslizamiento del tipo rotacional que afecta la seguridad física de Madrigal involucra un 70% del área del distrito.

Entre los años 2001 y 2004 se hicieron mediciones GPS en 4 sitios del deslizamiento en Madrigal, se estableció una tasa anual promedio de 0.4 m de desplazamiento. Entre los años 2008 y 2014 se estableció una red EDM de 20 puntos de control que mostró desplazamiento promedio de 0.30 m por año en la parte media y baja de Madrigal.

El análisis de estabilidad en los sectores Ushina y Pullhuay arrojan valores de FS menores a 1 en condición estática y pseudoestática. Además se ha desarrollado un modelamiento numérico utilizando elementos finitos donde se

evidencia que la parte media y baja de Madrigal se encuentra en condición inestable crítica.

Para la reducción de la vulnerabilidad física del poblado se propone realizar un drenaje de coronación de 500 m a la altura de la cota 3290 m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3090 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja. En la parte media se hará banquetas con sistema de drenaje para disminuir la carga hidráulica.

ABSTRACT

Natural phenomena derived from the slope instability have become one of the most frequent disasters that occur today. Most of these problems are the result of the interaction between climatic conditions, geodynamic and vulnerability of a large number of human settlements. One case is happened in the district of Madrigal, Province of Caylloma, Arequipa, a town affected by a rotational slip it was activated since 1959 and currently shows a high risk and therefore higher levels of physical vulnerability.

Madrigal is located in the middle of the valley of the Colca River in its upper reaches has a chain of active volcanoes called Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, the latter suffered in the Late Pleistocene collapse flank which caused an avalanche of debris radically changed the morphology of the valley in this sector. This avalanche of debris dammed the river Colca and formed a paleolake for that reason now conspicuous lacustrine deposits as foundation soils found in various villages one of them is Madrigal. Studies interpretation of aerial photos of the years 1955, 1970 and 1997 found that in nearly 50 years slip Madrigal increased the unstable area 0.6 km². Madrigal is affected by a sliding rotational type involving 70% of the area of the district.

Between 2001 and 2004 GPS measurements in 4 sites sliding it did in Madrigal, an average annual rate of 0.4 m displacement was established. Between 2008 and 2014, an EDM network of 20 control points that showed average displacement of 0.30 m per year in the middle and lower Madrigal was established.

The stability analysis in Ushina sectors and Pullhuay throw FS values less than 1 in static and and pseudoelastic . It has also developed a numerical modeling

using finite element where it is evident that the middle and lower Madrigal is in unstable condition critical.

To reduce the physical vulnerability of the village are propose to make a drainage coronation of 500 m height of 3290 m altitude , a stabilizer fill up to the foot of the main scarp (elevation 3090 m) and a type structure support gabions in the lower part and will banquettes with drainage system in the middle part to reduce the hydraulic load.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación Problemática

La región de Arequipa, particularmente el valle del Colca, muestra evidencias de una fuerte actividad sísmica, volcánica y fenómenos geológicos peligrosos. Como producto de estas actividades, se han desencadenado en el Colca fenómenos geodinámicos de gran magnitud, tal como un represamiento y la formación de un gran lago durante el pasado geológico reciente, aquí denominado “Lago Colca”. Este gran Lago se desembalsó, aparentemente rápida y repentinamente, con efectos desastrosos aguas abajo (Ocola y Gómez 2005b).

Esta situación generó que en esta parte del valle quedaran como evidencias de ese gran lago, un gran volumen de materiales lacustres depositados en ambas márgenes del río Colca, donde actualmente se asientan poblados como Lari, Maca y Madrigal. Esta composición predominante de materiales finos en los suelos de cimentación aunados a las labores antrópicas de agricultura que se desarrollan desde el tiempo de los Incas en la zona y la alta sismicidad, han dado como consecuencia la generación de movimientos de masa activos y recurrentes en esta zona que amenazan la seguridad física de los poblados anteriormente citados (Zavala y Fidel, 1994).

De los estudios geológicos realizados en la zona por anteriores investigadores y el suscrito se reconocieron depósitos lacustres que tipificaron la existencia de un paleolago de 40 km de longitud y 2 km de ancho máximo entre las localidades de Pinchollo y Yanque, en el curso presente del río Colca. A este lago se le ha denominado “Lago Colca” (Ocola et al, 2004).

Se infiere que el Lago Colca fue formado por el represamiento repentino debido a una avalancha muy grande proveniente del nevado Hualca Hualca.

Los estudios geodinámicos realizados en la zona de Madrigal y alrededores, concluyen que existen eventos (derrumbes, deslizamientos, huaycos, flujos hiperconcentrados, avalanchas, etc) de gran magnitud, como los que originaron del Paleolago Colca, que han ocurrido en este valle y han condicionado su morfología actual.

A lo anterior debe añadirse que, la actividad turística es la segunda actividad productiva de la región Arequipa (después de la minería). Esta actividad se ha incrementado notoriamente en la zona del valle del Colca, por su gran belleza natural y paisajística. A inicios del año 2000 arribaron cerca de 90,000 turistas y en el año 2015 bordean los 500,00 turistas, representa 1/3 de los ingresos de la Región. Por tanto, se requiere conocer las características geodinámicas de esta zona a fin de reducir la vulnerabilidad de la infraestructura y patrimonio cultural frente a probables desastres por ocurrencia de eventos de origen natural que pudieran generarse en el área (Palacios y Gómez, 2008).

Uno de los poblados que presenta alta vulnerabilidad a la ocurrencia de este tipo de eventos es la localidad de Madrigal, localizada en la margen derecha del valle del río Colca, asentada sobre depósitos inconsolidados provenientes del antiguo lago, con predominancia de elementos finos por su naturaleza lacustre. Se adiciona a esto un deficiente manejo de los recursos hídricos para las labores agrícolas, por lo que actualmente todo el borde de las terrazas que dan al río Colca están afectados por deslizamientos rotacionales que amenazan en la actualidad ya un 40% de la parte urbana-rural del distrito (Gómez, 2010).

Asimismo, se requiere conocer las tasas de movimiento y las direcciones (vectores) con la finalidad de zonificar las áreas de mayor peligro para una probable reubicación de un sector de la población de esta localidad. Esto fue posible mediante un modelamiento geotécnico usando elementos finitos.

1.2 Formulación del Problema

De lo anterior se plantea el problema general siguiente: ¿De qué manera la evaluación geodinámica y modelado geotécnico del deslizamiento de Madrigal permitirá reducir la vulnerabilidad física del poblado en mención?

1.3 Justificación de la Investigación

Para promover un desarrollo sostenible de los centros poblados del valle del Colca, en particular la localidad de Madrigal, es indispensable identificar, categorizar y estimar probables reactivamientos de los eventos geológicos de gran peligro que amenazan centros poblados e infraestructura, a fin de tomar las medidas preventivas para disminuir el impacto de los potenciales desastres que puedan causar estos eventos.

Se está tomando como un estudio piloto el caso del distrito de Madrigal que está amenazado por un deslizamiento activo que afecta directamente el área poblada del distrito. Se contempla desarrollar una metodología de investigación descriptiva que permita hacer una caracterización geodinámica de la evolución geológica de esta parte del valle mediante la aplicación de técnicas geodésicas y geofísicas que lleven a definir las causas de este evento y realizar un modelamiento geotécnico mediante el uso de elementos finitos para lograr conocer la probabilidad del grado de activación de este evento y las zonas a ser afectadas por el mismo.

En base a los resultados del modelamiento geotécnico se está proponiendo medidas de mitigación estructural que permitan reducir la alta vulnerabilidad del poblado de Madrigal ante estos eventos naturales.

Teniendo en cuenta que Madrigal presente como elementos expuestos a deslizamientos alrededor de 40 viviendas, 2 puentes carrozables, dos vías de comunicación, una escuela, 35 parcelas agrícolas, una línea eléctrica de conducción de media tensión y el cementerio, con alta vulnerabilidad a estos eventos

Cabe resaltar que, gran parte de la actividad turística en el valle del río Colca, margen derecho, parte desde esta localidad mediante trochas carrozables y caminos de herradura hacia la zona del cañón del Colca en las inmediaciones de Tapay y Cabanaconde, por lo que los efectos severos del deslizamiento dejarían sin actividad turística a estos poblados, además de afectar áreas de cultivo y pastoreo principales actividades productivas de la zona.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la geodinámica del deslizamiento que afecta la localidad de Madrigal y una probable reactivación de gran magnitud y realizar un modelado geotécnico con la finalidad de proponer medidas de mitigación para la reducción de la vulnerabilidad física de esta localidad.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Conocer el comportamiento geodinámico del deslizamiento de Madrigal, mediante estudios geológicos y geomorfológicos de detalle.
- Evaluar el comportamiento del suelo-subsuelo mediante estudios geofísicos en el área del deslizamiento.
- Evaluar el grado de estabilidad actual del deslizamiento mediante métodos geodésicos y geotécnicos (ensayos de mecánica de suelos).
- Realizar un modelamiento geotécnico mediante el uso de elementos finitos que permitan conocer las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por el deslizamiento en el corto y mediano plazo.
- Dar una propuesta de tratamiento de mitigación o minimización del peligro de deslizamiento para reducir la vulnerabilidad física de Madrigal.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El valle del Colca está ubicado aproximadamente a 90 km al norte de Arequipa en el sur del Perú. Uno de los fenómenos geológicos superficiales que se ha producido en la zona ha sido un represamiento natural en el Pleistoceno tardío (Ocola y Gómez, 2002) que produjo la formación de un gran lago, causado por una avalancha de escombros provenientes del Nevado Hualca-Hualca. Este lago fue rellenado por depósitos lacustres y fluviales que conforman la secuencia superior del Grupo Colca. Debido a procesos de levantamiento andino, se han presentado procesos de remoción en masa, siendo la litología del Grupo Colca uno de los principales factores causales de los deslizamientos que se presentan a lo largo del valle afectando principalmente a los pueblos de Maca, Lari y Madrigal, Figura 1.

El deslizamiento de Madrigal se encuentra localizado en la parte terminal del paleolago Colca, correspondiente a una facie marginal del lago (Zavala y Fidel, 1994) y donde la presencia de bofedales y las infiltraciones de aguas de regadío, así como la actividad sísmica en la zona incrementan la actividad del deslizamiento.

Diversos trabajos se han efectuado en el valle del Colca, en especial en el distrito de Maca, pero no existe un estudio detallado para el distrito de Madrigal.

Entre las principales publicaciones relacionadas al tema de investigación destacan:

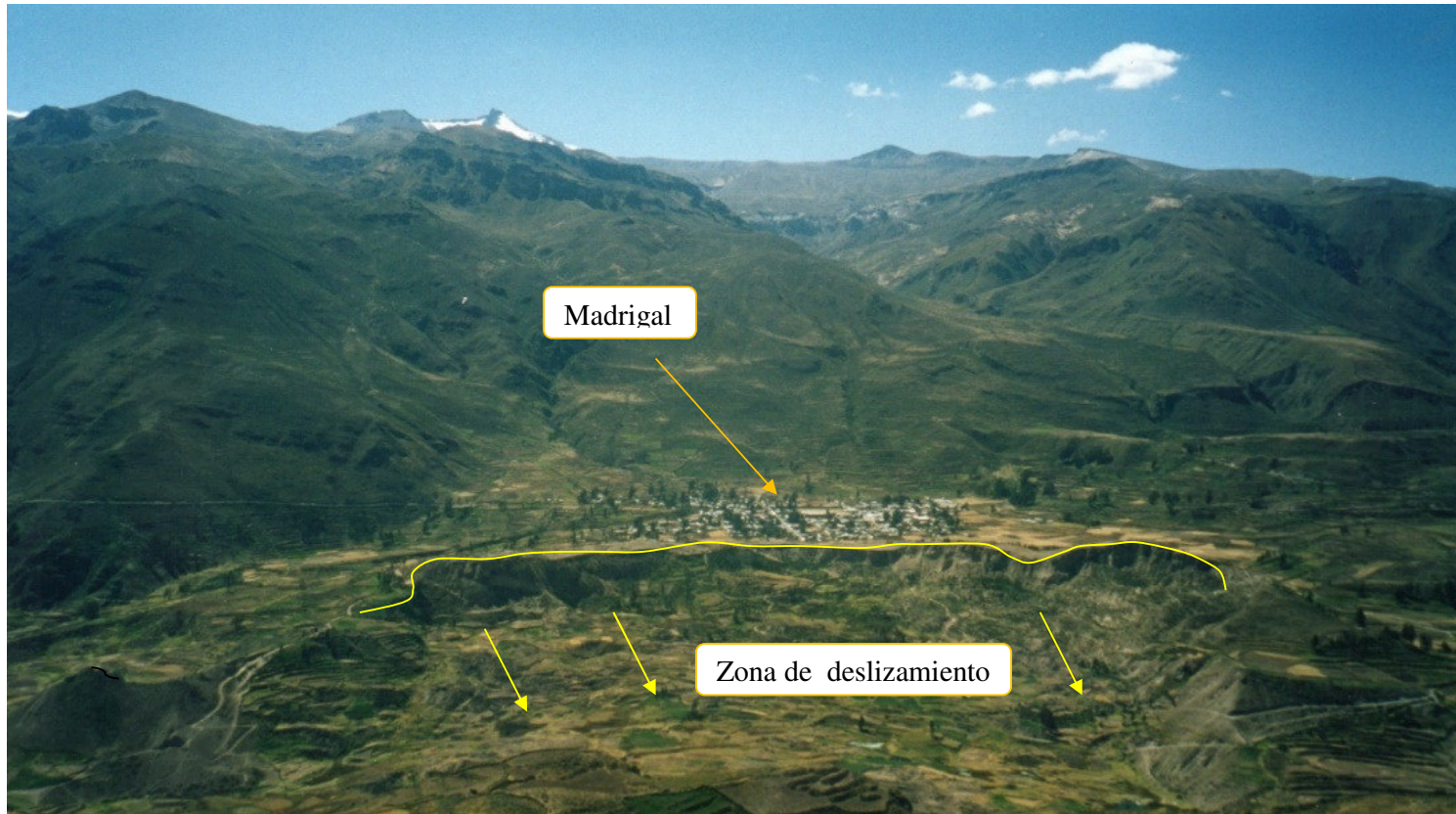


Figura 1 Vista panorámica del deslizamiento de Madrigal que afecta la seguridad física del poblado en mención. La línea en color amarillo indica la escarpa principal del deslizamiento y las flechas color amarillo la dirección de movimiento de las masas inestables.

García (1966) realizó una inspección a raíz de un deslizamiento ocurrido en las faldas del Cerro Quehuisa. Asimismo, INGEMMET reporta que en el año 1960 envió al Ing. Márquez W. quien hizo una evaluación preliminar del deslizamiento de Madrigal donde en el año 1959 se produjo un derrumbe de material como consecuencia de un sismo, haciendo de la zona un peligro latente. Además, el autor realizó una evaluación al proyecto de construcción de una pequeña presa, que por la litología de la zona fue declarado inviable.

Pacheco (1976) realizó un estudio geomorfológico, estructural, estratigráfico y de geología histórica sobre la zona comprendida entre los distritos de Madrigal y Coporaque, haciendo mención a la presencia de grandes movimientos en masa en las zonas de Madrigal, Lari e Ichupampa, como un peligro latente debido a su magnitud y reactivaciones continuas.

En 1994, Fidel y Zavala como parte del “Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Camaná-Majes (Colca)” hacen mención de un deslizamiento en la zona de Madrigal, el cual afecta el poblado del mismo nombre, indicando que el deslizamiento presenta capas que corresponden a un antiguo lago.

Huamán (1996) mediante la interpretación de imágenes satelitales ópticas (SPOT) y de radar (SAR ERS-1) el autor delimita patrones geodinámicos en el Sur de Perú, en particular en la zona del Valle del río Colca, reconoce lineamientos de fallas activas, deslizamientos, entre los que destaca el deslizamiento de Madrigal.

Palacios, et al. (1988) conjuntamente con colegas ingleses realizaron el estudio geológico en el Sur de Perú, y observan a la altura del poblado de Pinchollo un extenso depósito de avalancha de escombros que ha obturado el valle del río Colca y que ha dado paso a la formación de un antiguo lago que represó el río Colca entre Pinchollo y Tuti. Encuentran evidencias de depósitos lacustres que confirman la existencia del lago antiguo.

Bulmer, et al (2002) usando una combinación de trabajos de campo y sensoramiento remoto reconstruyeron los eventos producidos en el sismo que afectó el valle del río Colca el 23 de julio de 1991 (magnitud 5.1) a las 14:45 hora local que afectó severamente el poblado de Maca. Reportes periodísticos de esos días destacaron la ocurrencia de flujos de barro que destruyeron parcialmente el poblado en mención.

La sismicidad en la zona está asociada a la actividad del Complejo Volcánico Hualca Hualca – Ampato – Sabancaya que en esos años mostró evidencias de reactivación.

Antayhua et al (2002) analiza la sismicidad en el valle del río Colca en base a los sismos ocurridos en Maca, Sepina y Cabanaconde que ocurrieron en la década de los años 90. Estos sismos de origen cortical con profundidades superficiales, produjeron daños considerables en la infraestructura del valle y reactivaron los deslizamientos que afectan los poblados de Maca, Lari y Madrigal.

Ocola y Gómez (2005a) estudian los peligros geológicos existentes en el valle del Colca sector medio entre Sibayo y Cabanaconde, donde se hizo una evaluación en base a imágenes satelitales y fotografías aéreas multitemporales; además se plantea la existencia de dos paleolagos: uno en el Pleistoceno Tardío a raíz de una avalancha de escombros proveniente del Nevado Hualca Hualca, formando los depósitos lacustres, en los cuales se establecieron los pobladores del valle del Colca. El otro paleolago se debe al emplazamiento de una lava fisural en el sector medio del valle, que se desarrolló entre Canocota y Tuti, a 15 km al Este de Madrigal. Se realizaron varias columnas estratigráficas en distintos puntos del valle para mostrar la diferencia de la estratigrafía de los dos paleolagos.

INGEMMET (2014) realizó un cartografiado geológico-geodinámico a escala 1/750,000 donde describe al deslizamiento de Madrigal del tipo rotacional que cubre un área de aproximadamente 120 Has y una escarpa principal de algo más de 2 km de longitud. Este deslizamiento ha mostrado varias reactivaciones, se han descrito desde el año 1959 y se debe a la presencia de depósitos inconsolidados, filtraciones, socavamiento del río Colca y mal uso de las aguas de regadío.

Lacroix, P. et al (2014) realiza la caracterización de los procesos sísmicos y gravitacionales que generan el reactivamiento de los deslizamientos en la localidad de Maca, localizada a 2 km al NE de Madrigal y establece tasas de movimiento de las masas inestables en base a mediciones GPS: Establece una tasa mensual con picos de hasta 0.60 m en la parte baja del deslizamiento, en época de lluvias.

2.2 BASES TEÓRICAS

La investigación abarca la temática de peligros geológicos, en particular un tipo de movimiento en masa como son los deslizamientos, el análisis de estabilidad de taludes, la vulnerabilidad física, mitigación de los efectos en la infraestructura del poblado y modelamiento geotécnico de deslizamientos mediante el uso de elementos finitos, cuyos conceptos teóricos se describen a continuación:

2.2.1. Evaluación geodinámica: La geodinámica se refiere a todos los movimientos que experimenta la Tierra desde sus inicios, tanto aquellos que se generan por la interacción de la hidrósfera y/o atmósfera sobre la corteza terrestre.

La metodología para la evaluación geodinámica permite comprender como ocurren los eventos geológicos, cuales son las causas y factores que los generan, las condiciones en que se desarrollan y, finalmente, sus efectos sobre el globo terrestre. Para esto se vale de otras disciplinas como la geomorfología, hidrología, tectónica, sedimentología, fotogeología, etc que permiten conocer todos los factores que participan en el desarrollo de los eventos geodinámicos.

Los eventos geodinámicos ocurren bajo diferentes modalidades o mecanismos, dependiendo del agente principal y los factores que participan en su origen y desarrollo. Se clasifican en: fenómenos de remoción en masa, flujos hídricos y otros.

A continuación se describen los principales agentes geodinámicos (Medina, 1991):

- El Agua: Es el agente geodinámico principal y su acción modeladora de la superficie es casi universal. Participa en casi todas las etapas o fases de los ciclos de erosión y sedimentación tales como: la meteorización, en la remoción de materiales rocosos y en la acumulación de los sedimentos que casi siempre se realiza en medios acuosos.
- El Sol: Al igual que el agua interviene en todos los procesos que ocurren en la Tierra, mediante las variaciones de temperatura, influye en el

comportamiento del agua y viento, propiciando cambios en el estado o resistencia de los cuerpos (dilatación, contracción y ruptura).

- La gravedad: La fuerza de atracción gravitacional de la Tierra es un agente inherente a la dinámica de ésta y está presente en todos los procesos y fenómenos que tienen lugar en superficie; su acción es más evidente en los fenómenos de remoción en masa, facilita la caída de los cuerpos.
- El viento: Al igual que el agua, el viento ejerce una acción de movilización o transporte y otra de erosión pero de naturaleza totalmente distinta. La acción del viento (acción eólica), se produce en toda su extensión en los desiertos, en regiones de clima extremadamente seco donde existe muy poca vegetación y en regiones tropicales, acompañado por precipitaciones pluviales a modo de tormentas.
- Los organismos vivos: La actividad que realizan los seres orgánicos sobre la superficie terrestre, casi siempre ha pasado desapercibida. Hoy en día no se puede desconocer la importante movilización de materiales y el modelado que resulta de dicha acción, desde los seres unicelulares hasta los más evolucionados como el hombre.

Finalmente, se encuentran los factores geodinámicos que son parte de la metodología de una evaluación geodinámica. Así, la formación y desarrollo de los fenómenos geodinámicos están condicionados a ciertos factores que determinan su intensidad, magnitud y frecuencia. Algunos de los factores o causas tienen una participación pasiva o estática, mientras que los otros son activos o desencadenantes. Entre los principales factores figuran los: litológicos, tectónicos, geomorfológicos, estratigráficos, climatológicos, hidrológicos y antrópicos. Los tres primeros se describen en el ítem siguiente y los demás se describen a continuación:

- **Estratigráficos:** Se refiere al modo en que yacen o están dispuestas las rocas, lo que determina la estabilidad o inestabilidad de los terrenos, así por ejemplo, en capas gruesas, delgadas, intercaladas o alternadas con estratos macizos blandos, deleznales, permeables o impermeables. Las condiciones de estabilidad serán menores donde las condiciones climáticas y las superficies de exposición de las rocas son adversas.

- **Climatológicos:** Las variables climatológicas como temperatura, humedad, precipitación y otras, según sea su manifestación y ocurrencia, participan de las condiciones ambientales de una región y determinan la velocidad de meteorización de la roca, la intensidad, frecuencia y magnitud de los fenómenos hidrometeorológicos (lluvias torrenciales, huracanes), que desencadenan otras manifestaciones geodinámicas de magnitudes severas.
- **Hidrológicos:** Se refiere a la acción de las aguas de escorrentía superficial y subterránea que provocan la saturación y sobrepeso de los materiales rocosos, el socavamiento y erosión de los taludes y la disolución de las rocas solubles. La presión que ejerce el agua sobre las rocas y suelos, hace que se alteren las condiciones de estabilidad de los taludes y se propicie la ocurrencia de deslizamientos, hundimientos, etc.
- **Antrópicos:** Son todas las actividades mediante las cuales el hombre altera y rompe el equilibrio del medio natural, por ejemplo: la deforestación por la tala de bosques y sobrepastoreo que destruye la cobertura vegetal, la deficiente infraestructura de riego que sobresaturan los terrenos y facilitan la remoción del suelo, las inadecuadas prácticas agrícolas y agronómicas que empobrecen el suelo dejándolo improductivo, propiciando su abandono.
También, la remoción de tierras en la ejecución de obras civiles, explotación de yacimientos y canteras, que dejan taludes inestables, así como la acumulación y sobrecarga de desmontes o desperdicios sobre terrenos no apropiados. Todas estas actividades crean condiciones de desequilibrio que aceleran el desarrollo de fenómenos geodinámicos.

2.2.2 Movimientos en masa

Uno de los tipos de movimientos en masa más frecuentes en ocurrencia son los deslizamientos en suelos y rocas, presentan un comportamiento muy peculiar en cada caso, por lo cual es necesario conocer sus características para poder mitigar sus efectos.

Campbell R. & Varnes, D. (1994) proponen una clasificación de movimientos en masa en función de su origen, velocidad y tipo de movimiento, de manera que

se use como protocolo en la evaluación de este tipo de peligro y contribuya a la gestión de riesgo de desastre.

La tipología del movimiento de una ladera está definida principalmente por el material del que está compuesta la ladera en cuestión. Los principales tipos de movimientos que se presentan en un suelo son, Figura 2 (Varnes, 1986):

2.2.2.1 Deslizamientos: Se denomina así al proceso de movimiento de una masa de terreno por efecto de la gravedad y en sentido de la pendiente a través de una superficie de ruptura o plano de falla. Por la forma de esta superficie, los deslizamientos se pueden clasificar en:

2.2.2.1.1 Deslizamientos rotacionales: Presentan una superficie de ruptura de forma curva o cóncava cuyo centro de giro se encuentra por encima del cuerpo en movimiento. Visto en planta el deslizamiento presenta una serie de agrietamientos perpendiculares la dirección del movimiento.

En la cabeza de la masa en movimiento, el desplazamiento es aproximadamente semi-vertical, con muy poca rotación, sin embargo, se puede observar por lo general que la superficie original del terreno gira en dirección a la corona del talud.

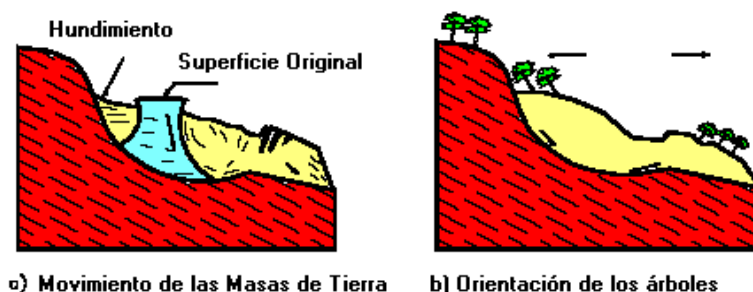


Figura 2. Características de un deslizamiento rotacional. Suárez (1998)

Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren en suelos homogéneos, naturales o artificiales y por su simplicidad son los que se utilizan en los estudios en la literatura. Por lo regular las discordancias, planos de estratificación y juntas afectan la forma de la superficie de

ruptura (Figuras 2 y 3) los cuales deben tenerse en cuenta para el estudio.

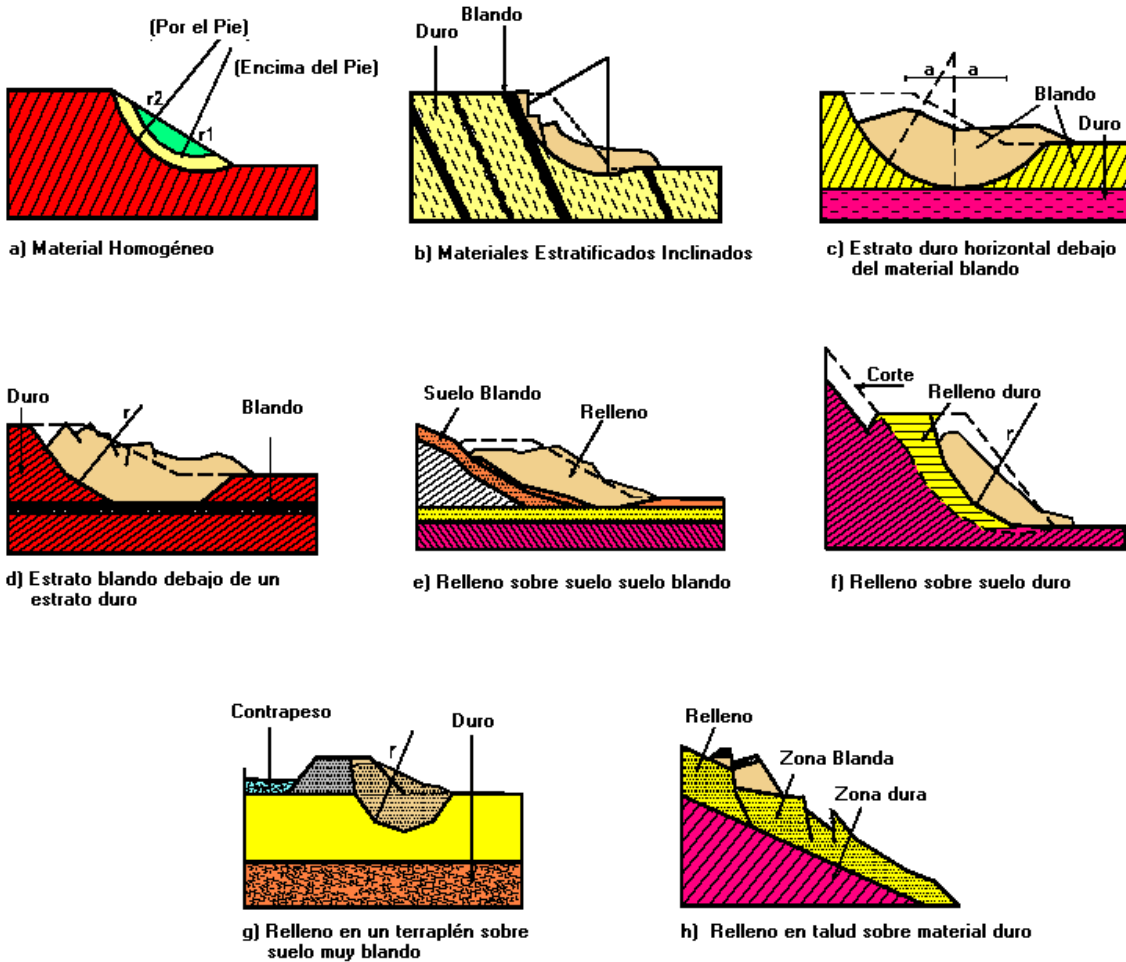


Figura 3. Superficies de ruptura en deslizamientos rotacionales. (Suárez 1998)

2.2.2.1.2 Deslizamientos Traslacionales: Este proceso consiste en el movimiento de una masa de suelo a lo largo de una superficie plana u ondulada y con muy poco o nada de movimiento de rotación. A diferencia de los movimientos de rotación que tratan de autoestabilizarse, los movimientos de traslación avanzan indefinidamente ladera abajo. Los movimientos de traslación son controlados generalmente por fallas, fracturas, planos de estratificación, discontinuidades y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a zonas de cambio de

resistencia al corte de materiales, o por el contacto entre roca dura y materiales blandos o coluviones (Suárez, 1988), Figura 4.

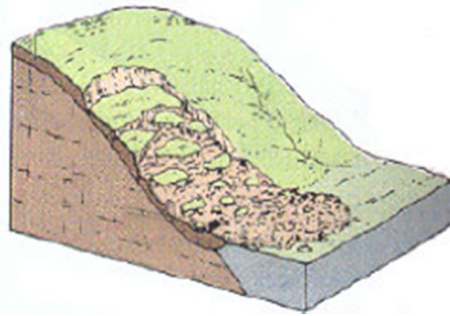


Figura 4. Deslizamiento traslacional (Skinner y Porter,1992)

2.2.2.2 Esparcimiento Lateral: Es una forma de falla planar que incluye suelos y rocas. El modo de movimiento predominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. Este movimiento es bastante complejo pues no solo puede incluir movimientos de rotación y traslación sino también, de flujo. Su tasa de movimiento es bastante lento

Los desprendimientos laterales pueden originarse por eventos sísmicos, pero las grietas de tensión se originan por efectos de la gravedad, durante la falla progresiva, estas grietas se abren formando bloques separados, Figura 5.

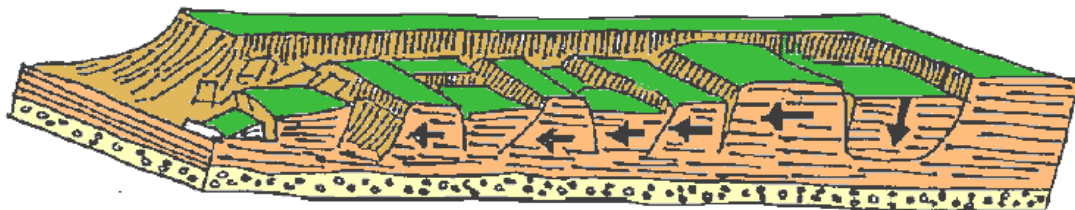


Figura 5. Esparcimiento lateral (Skinner and Porter, 1992).

2.2.2.3 Flujos: Consiste en el desplazamiento de partículas o bloques pequeños de rocas dentro de una masa que se desplaza sin un plano fijo de falla, Figura 6. Los flujos varían en su velocidad de desplazamiento desde muy lentos a extremadamente rápidos y también varían en su contenido de detritos, así como su contenido de agua. Su ocurrencia está asociada a la saturación de los materiales subsuperficiales (Suárez,1998). Algunos flujos son consecuencia

de la alteración de suelos muy sensitivos tales como sedimentos no consolidados.

Debido a sus diferentes características los flujos se clasifican en flujos de roca, detritos, flujos de suelo, flujos de lodo.

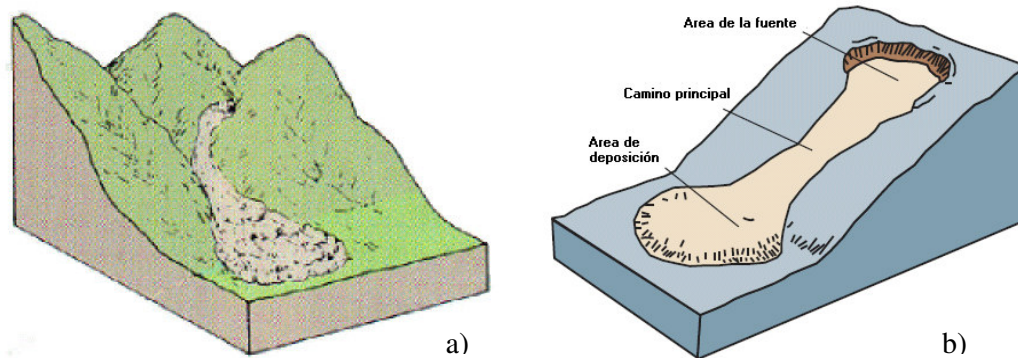


Figura 6. a) Flujo de detritos b) Partes de un flujo de tierra (Albalagan, 1992)

2.2.2.4 Avalancha de escombros: Son deslizamientos súbitos de una parte voluminosa de los edificios volcánicos. Se originan a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, presencia de fallas, movimientos sísmicos fuertes y explosiones volcánicas. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia y pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia. Bajan a gran velocidad y destruyen todo lo que encuentran a su paso. (Suárez, 1998)

- **Factores condicionantes y desencadenantes de los Movimientos en Masa**

En la generación de los movimientos en masa se involucran diversos factores, que son los que determinan el equilibrio o desequilibrio de una masa de material, así como su intensidad, magnitud y frecuencia. Dichos factores pueden dividirse en dos grandes grupos, a saber: los condicionantes y los desencadenantes. Los primeros determinan el estado de equilibrio del material potencialmente deslizable, su participación en la generación del proceso, podrán considerarse como pasivos, los segundos determinan la ocurrencia del proceso y son factores activos, estos alteran el estado de equilibrio mencionado. Es importante mencionar que un factor puede comportarse de las

dos formas, en ocasiones pasivamente y por lo tanto condicionar el proceso, en otras activamente y de esta forma desencadenarlo.

Los factores asociados a movimientos en masas, en particular a deslizamientos, se refieren a condiciones naturales y antrópicas del terreno que varían en diferentes escalas de tiempo y que se combinan para contribuir a la generación de dicho proceso. Un factor importante es el aspecto geológico. La geología aporta un grupo de parámetros importantes para comprender la ocurrencia de los movimientos en masa, entre ellos se tienen:

- **Litológicos**

Los tipos de roca y la calidad de los suelos determinan en muchos casos la facilidad con que la superficie se degrada por la acción de los factores externos, entre los cuales se tienen a la meteorización, el intemperismo, etc. Las características químicas, físicas, mineralógicas, y genética de los diferentes materiales que conforman la corteza terrestre, determinan en gran parte la forma como estos evolucionan y se comportan en el ambiente (clima) en que se encuentran.

- **Tectónicos**

Son los factores asociados al tipo, magnitud e intensidad de la deformación que presentan los materiales rocosos, que genera en ellos elementos, tales como, foliaciones, plegamientos, fallas, diaclasas, que afectan su estructura y que condicionan su estabilidad.

La importancia de las estructuras radica en que determinan zonas de debilidad por las cuales se originan los movimientos en masa.

- **Geomorfológicos**

Son las características físicas del relieve de la superficie terrestre, la expresión del nivel de desarrollo alcanzado en el proceso evolutivo. Elementos como la pendiente, agudeza, amplitud, profundidad, de dicho relieve que dan una idea del grado de equilibrio o desequilibrio de los materiales que constituyen el relieve, y del modo o mecanismos de los procesos que se desarrollan en él.

2.2.3 Análisis de estabilidad de taludes

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. El objetivo es calcular el Factor de Seguridad (F.S.) para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad define las condiciones de estabilidad en la que se encuentra un talud, el FS a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos y que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores. Para ninguna *posición* de la superficie del talud el factor de seguridad debe ser < 1 ; si el Factor de *Seguridad* es exactamente 1 el talud se halla en estado de equilibrio límite (Alva, 1994).

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre un talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en:

- ⇒ **Determinísticos:** Conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Existen dos grupos: de equilibrio límite y de tensión-deformación
- ⇒ **Probabilísticos:** Consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas.

Los métodos más usados son los métodos de equilibrio límite, los cuales analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo, a lo largo de una determinada superficie de rotura y se basan en: la selección de una superficie teórica de rotura en el talud, criterio de rotura de Mohr-Coulomb, y la definición del “cociente de seguridad”. Asimismo, se asumen las siguientes condiciones (Whalley, 1984):

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.)
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de roturas.
- Con estas condiciones, se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que inducen a los deslizamientos y las fuerzas resistentes. Los análisis proporcionan el valor del **coeficiente de seguridad** del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan.

Expresado en términos de tensiones:

Tensiones tangenciales resistentes

$$F = \text{-----}$$

Tensiones tangenciales deslizantes

Una vez evaluado el **coeficiente de seguridad** de la superficie de falla supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, cinemáticamente posibles, hasta encontrar aquella que tenga el menor coeficiente de seguridad, F_{min} , la cual se admite como superficie potencial de rotura o círculo crítico del talud y F_{min} se toma como el correspondiente al talud en cuestión. (Paredes, 2009), Figura 7.

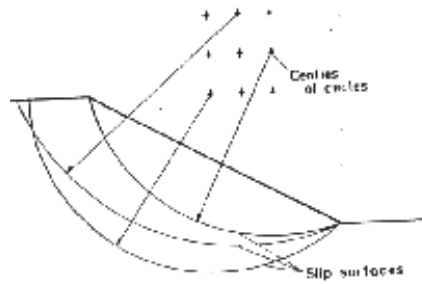


Figura 7. Búsqueda del círculo crítico

Existen varios métodos para el cálculo del coeficiente de seguridad por equilibrio límite. Los métodos analíticos proporcionan el coeficiente de seguridad a partir de la resolución inmediata de ecuaciones simples (Taylor, Fellenius, Bishop), mientras que los métodos numéricos necesitan, para su resolución sistemas de ecuaciones y procesos de cálculo interactivo, en esta categoría se encuentran los métodos de Morgensten y Price, Spencer, etc.

En la actualidad existen diversos programas que efectúan este análisis por ser muy complicada su evaluación hallar el círculo crítico para cada círculo o posible superficie de falla (Slope, Slide, GGU, etc.)

En el Cuadro 1 se muestra gráficamente los métodos mencionados:

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	c_u c, ϕ	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Círculo de fricción	Análisis no drenado. Taludes secos solamente.
Bishop y Morgenstern (1960)	c, ϕ, r_u	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern (1960)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	c, ϕ, r_u	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	c_u c, ϕ, r_u	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	c, ϕ	20-90°	Análisis límite	
O'Connor y Mitchell (1977)	c, ϕ, r_u	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	c, ϕ c, ϕ	0-90° 0-90°	Círculo de fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	c, ϕ	0-45°	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
Charles y Soares (1984)	ϕ	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	c, ϕ, r_u	11-63°	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Cuadro 1 Cálculo de la estabilidad de taludes. (Suárez, 1998)

- **Modelado numérico de talud inestable**

El auge que ha tomado en los últimos años el uso del computador prácticamente ha obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Este sistema ha permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite resolver situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales. Actualmente se conocen programas comerciales de software para computador, tales como: SLOPE/W, STABLE y QUAKE, los cuales permiten de una forma rápida y sencilla obtener los factores de seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cualquiera de los métodos de análisis. Algunos métodos emplean los elementos finitos, con muy poco éxito en la estabilidad de taludes

específicos, y otros emplean análisis de equilibrio por interacción, siendo este último sistema muy empleado universalmente (Espinoza y Niño, 2001).

El modelamiento en 3D también es una de las mayores aplicaciones que se le viene dando al ordenador para procesar información para todo un talud específico, para lo cual se le da información de las características geotécnicas para cada punto de una grilla definida.

2.2.4 Modelado numérico utilizando elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales por medio de “aproximaciones discretas”. A diferencia de del método de diferencias finitas (MDF), en el cual la zona de solución es un conjunto de puntos discretos, el método de elementos finitos supone que la zona de solución está compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan “elementos finitos”. Estos elementos, los que pueden tomar formas simples (por ejemplo líneas, triángulos, rectángulos, paralelepípedos) se ensamblan de diferentes maneras para representar la solución sobre una región cualquiera (Espinoza y Niño 2001).

Los conceptos básicos que se incorporan son simples y la idea principal es comprender la operatoria detrás de la técnica numérica de los elementos finitos.

- **Conceptos básicos:** El análisis de elementos finitos para un problema físico puede ser descrito de la siguiente forma:

- a) El sistema físico se divide en series de elementos que están conectados por un número de discreto de puntos nodales; este proceso se denomina “discretización”. Discretizaciones típicas de un sistema de tuberías y de un sistema continuo bidimensional se muestran en la Figura 8. En estos casos se identifican los elementos por medio de números. El problema de tuberías contiene 8 elementos

y 6 nudos, mientras que el problema continuo posee 20 elementos y 52 nudos.

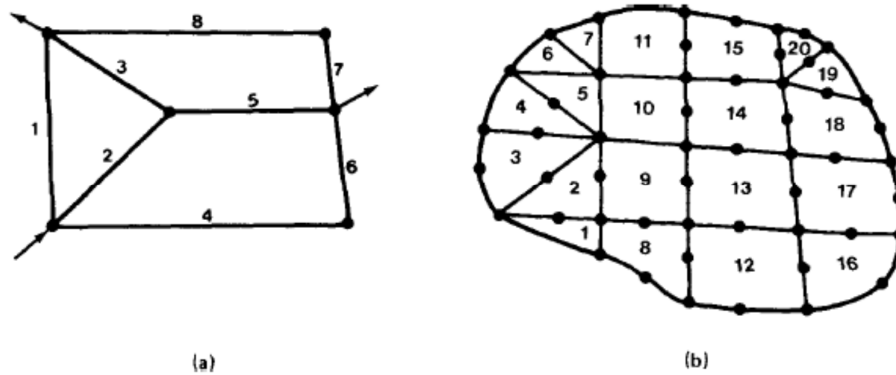


Figura 8. Ejemplo de discretizaciones de elementos finitos

- b) Una expresión matricial se desarrolla para relacionar las variables nodales de cada elemento. La matriz resultante se conoce comúnmente como “matriz elemental” que puede ser generada a partir de un análisis físico simple. Para problemas continuos, la matriz elemental se obtiene mediante un proceso matemático que utiliza técnicas variacionales o métodos de residuos ponderados.
- c) Las matrices elementales se combinan o “ensamblan” para formar un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el sistema global. La matriz de coeficientes del problema global se conoce como la matriz global. El procedimiento de ensamble se realiza para cumplir condiciones de compatibilidad en la unión de elementos.
- d) Condiciones de borde son incorporadas de la matriz global.
- e) El conjunto de ecuaciones algebraicas se resuelve mediante algún método matricial adecuado.

- **Solución a un problema discreto:** Consideremos el flujo de agua a través de un medio poroso, en estado estacionario. Este medio poroso está compuesto de tres zonas de diferente conductividad hidráulica, tal como se muestra en la Figura 9. El agua se inyecta a una tasa unitaria a través de uno de los extremos del medio poroso, mientras que la carga hidráulica se

mantiene constante, con un valor igual a 5, en el otro extremo. Utilicemos el MEF para determinar la distribución de la carga hidráulica dentro del medio poroso.

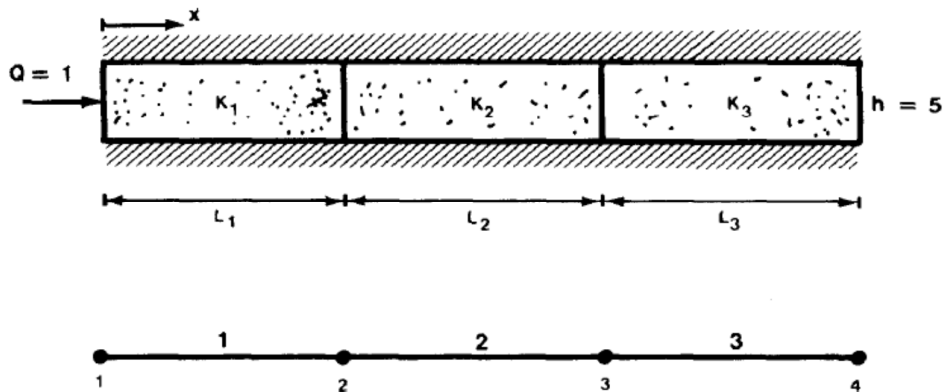


Figura 9. Medio poroso saturado y heterogéneo

. **Paso 1: discretizar el medio poroso:** Tal como se muestra en la Figura anterior. El sistema se divide en tres elementos, los que se identifican en la Tabla 1.

Identificación Elementos Finitos		
Número de Elemento	Conexiones Nodales	
	Nodo 1	Nodo 2
1	1	2
2	2	3
3	3	4

Tabla 1. Identificación de elementos finitos

. **Paso 2: Determinar características de los elementos:** Consideremos un elemento aislado como el que se indica en la Figura 10 (elemento e). Los valores del flujo de agua subterránea, Q , y la carga hidráulica h , son definidas en cada nudo. Por conveniencia se asigna un signo positivo al flujo que entra al elemento. El término desconocido en este problema es la carga hidráulica. La relación entre la carga hidráulica y el flujo de agua subterránea está dada por la Ley de Darcy. La ecuación de Darcy para cada nudo se puede escribir como:

$$Q_1 = \frac{K \cdot A}{L} \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{K \cdot A}{L} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2)$$

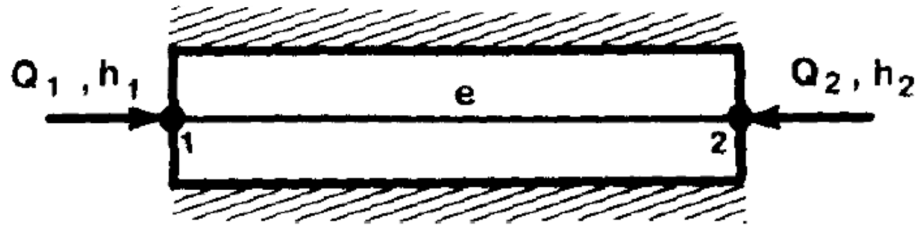


Figura 10. Elemento individual

. **Paso 3: Ensamblar ecuaciones elementales:** Después de ensamblar todas las ecuaciones para cada elemento, se obtiene un conjunto de ecuaciones globales, lo que se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{Bmatrix}$$

o en forma equivalente,

$$[C] \cdot \{h\} = \{Q\}$$

donde C es la "matriz global".

. **Paso 4: Incorporar condiciones de borde:** En este caso se tienen dos condiciones de borde: en el nodo 1, $Q_1=1$, y en el nodo 4, $h_4=5$. La primera condición de borde se incluye en forma simple en el vector del lado derecho:

$$\begin{bmatrix} c_{11}^{(1)} & c_{12}^{(1)} & 0 & 0 \\ c_{21}^{(1)} & c_{22}^{(1)} + c_{11}^{(2)} & c_{12}^{(2)} & 0 \\ 0 & c_{21}^{(2)} & c_{22}^{(2)} + c_{11}^{(3)} & c_{12}^{(3)} \\ 0 & 0 & c_{21}^{(3)} & c_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ Q_2^{(3)} \end{Bmatrix}$$

. **Paso 5: Resolver sistema de ecuaciones algebraicas:** La ecuación puede ser resuelta en forma directa mediante un método de solución tradicional o en forma indirecta mediante un método iterativo.

También se debe tener en cuenta la solución de problemas en estado estacionario o permanente y los problemas transientes (que consideran soluciones mediante ecuaciones de estado transformadas en parabólicas) para lo cual es necesario realizar discretizaciones espaciales y temporales. La aproximación en el tiempo puede ser realizada a través de un esquema de diferencias finitas o elementos finitos.

2.2.5 Procesos de geodinámica interna

Los procesos de geodinámica interna abarcan lo relacionado a la actividad sísmica y el vulcanismo de la zona estudiada, que se describen a continuación:

2.2.5.1 Sismicidad regional

Sismicidad es un término que describe la calidad o grado de ser sísmico de una región, localidad o paraje. Se le describe por su número de sismos por unidad de área o volumen y por unidad de tiempo, modo de ocurrencia y sus efectos en la superficie.

Los sismos, para su estudio, se les clasifican por la cantidad de energía y/o volumen desestabilizado mediante las escalas de magnitud calculadas en función de las amplitudes y periodos de las ondas sísmicas registradas por los sismógrafos.

La magnitud es un valor único por evento. La escala de magnitud más popular y tradicional es la de Richter. Otras escalas de uso común por los sismólogos son: **Mb, Ms, Mw, Mc**.

La sismicidad en el Perú puede ser dividida en dos grupos: el primero y más importante, está relacionado con la sismicidad, asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Continental; esta actividad libera aproximadamente el 90% del total de la energía sísmica anual, siendo generalmente el más frecuente y de grandes magnitudes (Antayhua, et al., 2002).

El segundo grupo, considera la sismicidad producida por deformaciones y está asociada a los fallamientos tectónicos activos existentes en el Perú; esta actividad sísmica es de menor frecuencia y de magnitudes moderadas.

La sismicidad del Perú, ha sido estudiada por diversos autores (Stauder, 1975; Bevis e Isacks, 1984; Tavera y Buforn, 1998). La distribución de los focos en superficie y en profundidad ha sido clasificada en sismos con foco superficial ($h < 60$ Km.), intermedios ($60 < h \leq 350$ Km.) y profundos ($h > 350$ Km.).

2.2.5.2 Vulcanismo

El origen de los volcanes en la región sur del Perú está enmarcado dentro del proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental, presente en el borde oeste de Sudamérica. La placa oceánica (Nazca) debido a su menor densidad, subduce bajo la placa continental (Sudamericana) arrastrando con ella los sedimentos procedentes de la superficie oceánica hasta los 70 – 100 km. de profundidad aproximadamente, límite en el cual aparece una capa llamada astenósfera. La elevada temperatura en el interior de la Tierra y el descenso de las mismas al añadir agua y dióxido de carbono de los sedimentos transportados por la placa oceánica (fusión de rocas), genera un fluido caliente y viscoso conocido como magma, el mismo que debido a su densidad asciende hasta la superficie dando origen a los volcanes (Thouret et al, 1994).

Los volcanes Huaynaputina, Ubinas (departamento de Moquegua), Misti y Sabancaya (departamento de Arequipa), han sido registrados como los más activos de los últimos tiempos, ya que erupcionaron, provocaron importantes daños personales y materiales. Un claro ejemplo de la fuerza catastrófica de estos volcanes, es la erupción del volcán Huaynaputina en el año 1600 DC y que causó la desaparición de la localidad de Quinistaquillas; la erupción del Volcán Ubinas en 1957, con abundante emisión de cenizas que afectó de manera considerable a los terrenos de cultivo de las localidades aledañas. Otro ejemplo, es el volcán Sabancaya que en 1986 produjo abundante emisión de fumarolas y cenizas, pero sin causar daños severos (Antayhua y Tavera, 2004).

El modelado actual del valle del río Colca es debido a los procesos eruptivos recurrentes que se han dado en el Complejo volcánico Sabancaya-Ampato-Hualca Hualca, uno de los más importantes fue el colapso de la ladera norte del volcán Hualca Hualca que generó una avalancha de escombros que represó el río Colca y dio origen a un paleolago cuyos depósitos lacustres son el suelo de cimentación principal de los poblados de Maca, Lari y Madrigal.

2.2.6 Geotecnia

El medio geológico está en continua evolución y los procesos geodinámicos afectan tanto a materiales rocosos y suelos como al medio natural en su conjunto (Gonzales, 2003). La diversidad del medio geológico y la complejidad de sus procesos se hacen condicionantes para la ocurrencia de diversos problemas geotécnicos como son en este caso los deslizamientos.

Las condiciones de un cuerpo ya sea de roca o suelo a la presencia de deslizamientos, dependen de una serie de características tanto intrínsecas del tipo de material del que está compuesto así como agentes externos que viene a alterar su estado inicial de equilibrio.

Para el estudio de estas condiciones es que se recurre a la geotecnia que realiza un análisis cuantitativo de las características

del terreno para establecer posteriormente las medidas para remediar esta situación.

Para ello la Geotecnia se sirve de dos ramas muy importantes como son la Mecánica de Suelos y la Mecánica de Rocas, las cuales en comunión con la geología permiten a la geotecnia aportar una solución a problemas de construcción. Debido a que en la zona de estudio el problema de deslizamientos se presenta en suelos, sólo se describe los aspectos de esta rama.

2.2.7. Mecánica de suelos

Para el estudio de un material tan complejo como es el suelo (por su diferente tamaño de grano y composición química) es necesario seguir una metodología con definiciones y sistema de evaluación de propiedades que permitan un mejor manejo de la información. Resolver un problema geotécnico supone conocer las características del suelo que permitan resolver el problema, así tenemos:

- 1) Para calcular la estabilidad de un talud, se mide la resistencia al corte del suelo y este valor se lleva a expresiones de equilibrio estático.
- 2) Para determinar la velocidad de circulación de un acuífero, se mide la permeabilidad del suelo, se utiliza la red de flujo y la ley de Darcy.
- 3) Para calcular los asentamientos de un edificio, se mide la compresibilidad del suelo, valor que se utiliza en las ecuaciones basadas en la teoría de la consolidación de Terzaghi.

La clasificación de un suelo se realiza en base a su granulometría obteniéndose la tabla 2.

TIPO DE SUELO	TAMAÑO DE GRANO	CARACTERISTICAS
Gravas	10 cm. – 2mm	Granos observables a simple vista, no retienen el agua
Arenas	2mm – 0.060 mm.	Todavía son observables a simple vista, cuando se mezclan con agua se separan con facilidad
Limos	0.060mm. – 0.002 mm.	Retiene el agua. Si se tiene una muestra de agua con limo en la mano al golpearla el agua se exhuda con facilidad.
Arcillas	< 0.002 mm	Partículas de tamaño gel. Están formadas por minerales silicatados tetraédricos y octahedricos con enlaces covalentes débiles que permiten el ingreso de moléculas de agua y produciendo a veces aumento de volumen

Tabla 2. Clasificación de los suelos de acuerdo a la granulometría (Suárez, 1998)

2.2.7.1. Plasticidad

La granulometría proporciona una primera aproximación a la identificación del suelo pero a veces queda poco claro el nombre, por lo que se utilizan unos índices que definen al suelo en base al contenido del agua a través del contenido de humedad. Atteberg definió tres límites: El límite de consistencia, El límite plástico W_p que separa el estado semisólido del plástico y el Límite líquido W_l que separa el estado plástico del semilíquido.

2.2.7.2 Estado de los suelos

Para definir el estado inicial de los suelos se intenta determinar primeramente la concentración relativa de sólidos, volumen relativo de suelos, volumen relativo de vacíos y contenido de agua en un volumen elemental y representativo de la muestra de suelo.

De esta forma se obtienen parámetros como son: porosidad, índice de vacíos, peso específico de las partículas, humedad, grado de saturación, etc

2.2.7.3 Permeabilidad

La permeabilidad está definida como el grado de facilidad que tiene el agua a atravesar un suelo; así un suelo granular posee un tamaño de poros razonablemente grande como para permitir el paso del agua más fácilmente que un limo, que es casi impermeable.

2.2.7.4 Resistencia al Corte

Al modificarse el estado tensional inicial de un suelo, se producen deformaciones que pueden ocasionar su rotura. A veces los suelos cohesivos rompen por tracción, como se suele ver algunas veces en las grietas de los deslizamientos, la forma de rotura más habitual es por rotura en una superficie de falla.

La resistencia al corte no puede considerarse como un parámetro único y constante, puesto que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc. así como, de forma especial de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua, aire).

De acuerdo al criterio de Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier parte del suelo y establece que para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi \text{ (Para suelos saturados)}$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' + (\mu - \mu_a) \tan \phi''$$

(Para suelos parcialmente saturados)

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

μ_a = Presión del aire intersticial

ϕ' = Angulo de fricción interna del material

ϕ'' = Angulo de fricción del material no saturado.

Para la determinación de la resistencia al corte se realiza con el ensayo de resistencia al corte que es un ensayo rápido con principios básicos elementales y es muy empleado para medir la resistencia al corte en suelos flexibles.

2.2.7.5 Características geotécnicas de los sedimentos

Los depósitos sedimentarios se forman por la acción de procesos geomorfológicos y climáticos, resaltando el medio de transporte y la meteorización. Los distintos medios de sedimentación originan depósitos cuyas características geotécnicas están relacionadas con las condiciones de formación de estos sedimentos. Se describen a continuación los tipos de depósitos principales:

- **Depósitos coluviales.** Tiene gran importancia geotécnica puesto que se trata de masas inestables. La resistencia de estos materiales es baja, sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso, y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de lluvias intensas. La identificación de estos materiales es de gran importancia en un estudio geológico – geotécnico.
- **Depósitos aluviales.** Están muy desarrollados en climas templados, ocupando cauces y valles fluviales, llanuras y abanicos aluviales, terrazas y paleocauces. Son suelos anisotrópicos en su distribución con propiedades geotécnicas altamente variables, estrechamente relacionadas a la granulometría. Su continuidad es irregular, pudiendo contener material orgánico en algunos medios. La permeabilidad depende de la granulometría. Generalmente presentan un nivel freático alto.
- **Depósitos lacustres.** En general son sedimentos de grano fino, predominando los limos y las arcillas. El contenido de materia

orgánica puede ser alto sobre todo en zonas pantanosas. Frecuentemente presentan estructuras laminadas en niveles muy finos. Los principales problemas geotécnicos están relacionados a su contenido de material orgánico siendo en general suelos muy blandos, también puede producir problemas geotécnicos como deslizamientos cuando el contenido de humedad es alto.

2.2.7.6 Tipo de suelos: Clasificación SUCS

Es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo (con la excepción de **Pt**). Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. También se le denomina clasificación modificada de Casagrande.

El SUCS utiliza símbolos para clasificar un suelo, de acuerdo con su “tipo” y “característica” (granulometría en el caso de los granos gruesos o de posible compresibilidad en el caso de la fracción que pasa la malla N° 40); los tipos son, Tabla 3:

SIMBOLO	SIGNIFICADO
G	Grava (Gravel)
S	Arena (Sand)
M	Limo (mo)
C	Arcilla (Clay)
O	Suelo Orgánico

Tabla 3. Simbología utilizada en la clasificación SUCS

Las gravas y arenas se separan en la malla N° 4, por lo que un suelo pertenecerá al grupo G (Gravel) si más del 50% de su fracción gruesa retiene en la malla N° 4, y si sucede lo contrario, el suelo formara parte del grupo S (Sand).

SIMBOLO	SIGNIFICADO
W	Bien graduado (Well graded)
P	Mal graduado (Poorly graded)
L	Baja compresibilidad (Low compressibility)
H	Alta compresibilidad (High compressibility)

Tabla 4. Características granulométricas del suelo.

Los anteriores símbolos precedidos de la grava (G) o arena (S) dan lugar a los grupos que a continuación se mencionan, todos considerandos suelos gruesos (Tablas 4 y 5):

SIMBOLO	SIGNIFICADO
GW y SW	Suelos bien graduados y con pocos finos, el contenido de finos sea menor del 5% .Para considerar una arena bien graduada, el $C_u > 6$ y C_c 1-3, para una grava el $C_u > 4$ y C_c 1-3
GP y SP	Suelos mal graduados, son de apariencia uniforme o presenta predominio de un tamaño faltando algunos intermedios. No cumplen con los requisitos para GW y SW, referente a los índices de graduación necesarios.
GM y SM	Suelos para porcentajes de finos superiores al 12%. La plasticidad de estos finos es nula o media situándose bajo la línea A de la carta de plasticidad o bien un índice de plasticidad < 4
GC y SC	Suelos con contenido de finos $>$ del 12%, de media a alta plasticidad, localizandose sobre la línea A con un índice plástico > 7

Tabla 5. Descripción de los tipos de suelos SUCS.

Los suelos gruesos con contenidos de finos comprendidos entre el 5%-12%, así como a los suelos cuyo material no cae claramente dentro de un grupo, el SUCS les asigna un símbolo doble, por ejemplo GW-SW.

Los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad, Tabla 6.

SIMBOLO	SIGNIFICADO
M	Limo (de l sueco Mo y mjala)
C	Arcillas (Clay)
Pt	Turba

Tabla 6. Clasificación de los suelos finos.

Si el LL <50%, se le añade al símbolo genérico la letra L (Low), si LL>50% se agrega la letra H (High) Los suelos que contienen una gran cantidad de elementos orgánicos, suelos usualmente fibrosos tales como turbas y suelos pantanosos, que resultan ser altamente compresibles, se consideran dentro de un grupo independiente con símbolo Pt.

Se describe en forma detallada, haciendo uso de la Carta de Plasticidad

SIMBOLO	SIGNIFICADO
CL y CH	Pertenecen a las arcillas inorgánicas. CL comprende a la zona sobre la línea A, definida por LL<50% e Ip>7% CH corresponde a la zona arriba de la línea A, definida por LL>50%
ML y MH	Pertenecen a los limos inorgánicos, limos arcillosos y polvo de roca. ML comprende la zona bajo la línea A, definida por LL<50%, y la porción de la línea A con Ip<4 MH corresponde a la zona debajo de la línea A, definida por LL>50%
OL y OH	Pertenecen a los suelos orgánicos, siempre se encuentran en lugares próximos a la línea A.
Pt	El suelo fino se clasifica como altamente orgánico cuando se identifica por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa; se le denomina turba.

Tabla 7. Clasificación de suelos orgánicos

Cuando un material fino no se define claramente en uno de los grupos, se utilizaran para el símbolos dobles de frontera. Símbolo doble MH-CH representa un suelo fino con LL>50%

e índice plástico tal que el material quede situado prácticamente sobre la línea A, Tabla 7.

La información obtenida para la clasificación de suelos SUCS se realiza mediante calicatas y ensayos estandarizados que se describen a continuación:

2.2.7.7 Exploraciones a cielo abierto (calicatas, norma ASTM D 420)

Es una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico de un terreno. Son excavaciones de profundidad superficial (hasta 3.5 m aproximadamente), realizadas con maquinaria (retroexcavadora).

De requerirse mayor profundidad deberá programarse sostenimiento dentro de las exploraciones para evitar posibles derrumbes.

Las calicatas son empleadas en los trabajos de ingeniería geotécnica y otros campos afines, permiten la inspección directa del subsuelo que se desea estudiar.

Una vez terminada la excavación de la calicata, se procede a loguear y describir el perfil litológico del subsuelo.

- **Densidad de suelo in – situ (Norma ASTM D1556)**

La densidad se define como la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo o la medida del estado de empaquetamiento del mismo.

En cada una de las calicatas se realiza un ensayo de densidad de campo, haciendo uso del método del cono, con la finalidad de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación es importante ya que permite conocer la compactación de las partículas que conforman un suelo. Mientras un suelo sea más compacto, van a existir menos espacios vacíos entre las partículas, por tanto el suelo va a ofrecer mayor resistencia y disminución de la capacidad de deformación.

El procedimiento consiste en extraer material del suelo a fin de obtener una relación entre la masa de éste y el volumen que ocupa la arena del cono (arena calibrada).

Para el ensayo de densidad se utilizaron los siguientes instrumentos:

- 01 cono metálico de 4 pulgadas de diámetro
- Arena calibrada (pasada por tamiz N° 10 y retenida en el N° 20; además se debe conocer la densidad que presenta).
- Placa metálica hueca (diámetro de 4 pulgadas)
- 01 balanza con precisión de 0.1 gr.
- 02 cinceles
- 01 comba
- Bolsas para el material extraído

Una vez terminada la excavación (calicata), se procede a realizar el ensayo.

- **Ensayo de corte directo (Norma ASTM D-3080)**

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen que existe o existiría

en el terreno producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia a la cortante en los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (relacionado comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna que hace se refiere al rozamiento que existe en las partículas granulares.

Para conocer esta resistencia en laboratorio se usa el aparato de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

- **Capacidad de carga admisible**

De los ensayos de corte directo se usan los datos: ángulo de fricción y cohesión, a los cuales se les calcula con la ayuda de fórmulas empíricas la capacidad de carga última de los suelos (mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico). En base a esta última se obtiene la capacidad de carga admisible que resulta al ser multiplicado por un factor de seguridad, cuyo valor es de 1/3, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones. La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia al cortante en los suelos se debe a dos componentes: la cohesión (relacionado comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna que hace se refiere al rozamiento que existe en las partículas granulares.

Para conocer esta resistencia en laboratorio se usa el aparato de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h)

creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

2.2.8 Geofísica Aplicada: Prospección eléctrica

La prospección geoelectrica en corriente continua es una técnica basada en un dispositivo tetraelectrónico que inyecta corriente en el terreno y mide la diferencia de potencial que se genera. Los cambios de la resistividad calculados permiten modelizar la estructura del subsuelo (Lakubovski y Liajov, 1980).

A partir de los valores medidos de corriente, de potencial eléctrico y del factor geométrico para cada disposición de electrodos se obtiene la respuesta de resistividad aparente ρ_a , que irá variando al aumentar la distancia entre electrodos (AB) y consecuentemente aumentando la profundidad de investigación. Por lo tanto para cada sitio de sondeo se obtiene una curva de resistividad aparente en función de la semidistancia entre electrodos de corriente (AB/2), Figura 11.

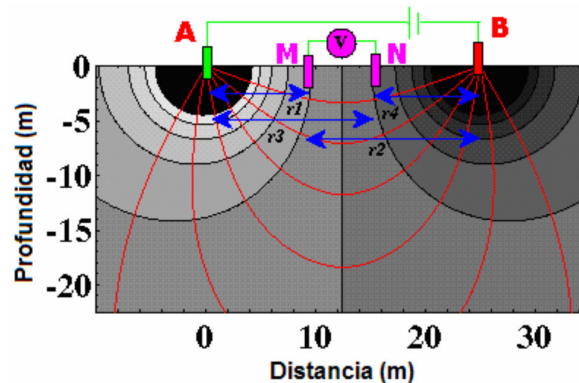


Figura 11. Disposición geométrica de los electrodos

Las rocas, suelos en función de su composición, textura y disposición presenta propiedades eléctricas diferentes y parámetros geométricos diferentes del medio que son el espesor, profundidad de los diferentes estratos del subsuelo, nivel freático, la composición litológica y estratigráfica, buzamiento de las rocas y otras que determinan el corte geoelectrico, investigación que permite explicar

el comportamiento del subsuelo que es característico de la estructura de la región.

El objetivo del estudio geofísico, es realizar una investigación geoeléctrica del subsuelo en una determinada área de estudio, por el método de Resistividades, cuyos ensayos de Resistividad de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), tiene por objeto obtener por medio indirecto las características y condiciones estratigráficas, y litológicas, hidrogeoeléctricas principales de los suelos, su nivel freático, sus características físicas y mecánicas del suelo para la evaluación de la napa freática, y estructuras geológicas, lito-estratigráficas del suelo-roca. Para evaluación de la potencia del manto acuífero.

Por consiguiente la aplicación del método de resistividad tiene por finalidad obtener los datos de S.E.V, con las cuales se elabora el estudio en la determinación de las propiedades eléctricas de resistencia la conductividad de las capas identificar, determinar los diferentes horizontes laterales y verticales de los perfiles geoeléctricos por medio de sus parámetros, análisis, y conclusiones y recomendaciones sujetos a los alcances del servicio que comprenderá: Determinar el Espesor expresado en metros y Resistividad Verdadera de los diferentes horizontes geoeléctricos expresados en Ohmios-metros, delimitando horizontes geoeléctricos de suelos y rocas, zonas litológicas alteradas, fracturadas, compactas, niveles freáticos, contenidos de humedad, permeabilidad, porosidad, la granulometría de los materiales rocosos con fines de proyectar la estructura de los materiales constituyentes de la zona de estudio y el nivel freático, Figuras 12 y 13.

Estas evaluaciones de parámetros geofísicos del subsuelo tienen alcances de informaciones básicas en complementar a las investigaciones geotécnicas que se realiza en el estudio.

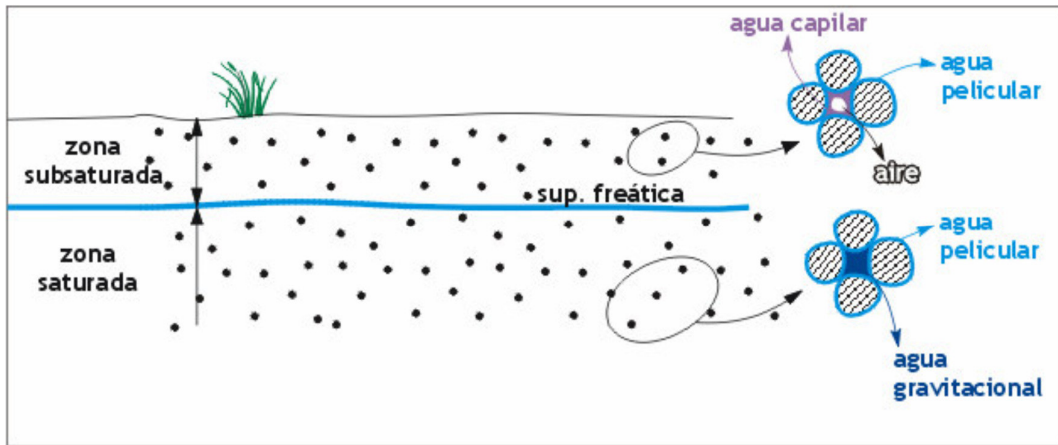


Figura 12. Esquema de la distribución del agua en el subsuelo

2.2.8.1 Fundamentos de Electricidad

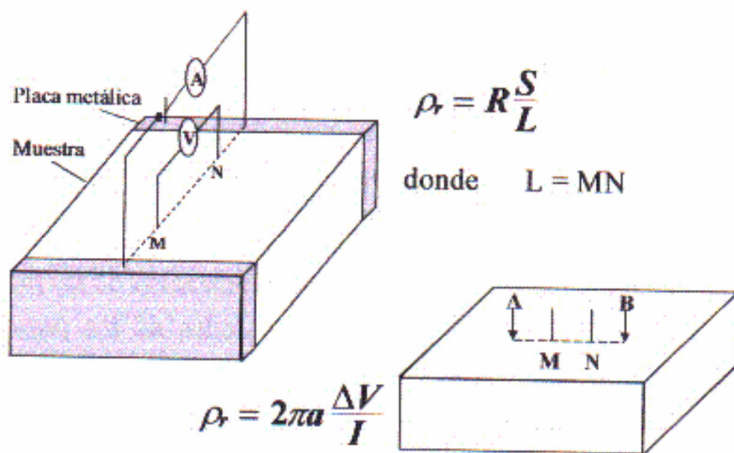


Figura 13. Medición de la resistividad en laboratorio

La resistividad eléctrica es la resistencia en Ohmios medida entre dos caras opuestas de un cubo de materia con dimensiones unitarias.

$$R = \rho \cdot L / S$$

$$\rho = R S / L$$

R = resistencia de un conductor de longitud L.

S = Sección de área

ρ = resistividad.

L = 1 cm; S = 1 cm²

Se obtiene la unidad de resistividad que se expresa en Ohmios por metro: Ohm-m , se utiliza este símbolo ($\Omega\text{-m}$).

Por la ley de Ohm, la corriente I , que pasa por un cuerpo y la diferencia de potencial V que se produce, se tiene la relación

$$I = V / R$$

Por consiguiente las rocas presentan diferentes valores de resistividad están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad) que impregna la roca, porosidad de la roca, textura y distribución de la roca, Figura 14.

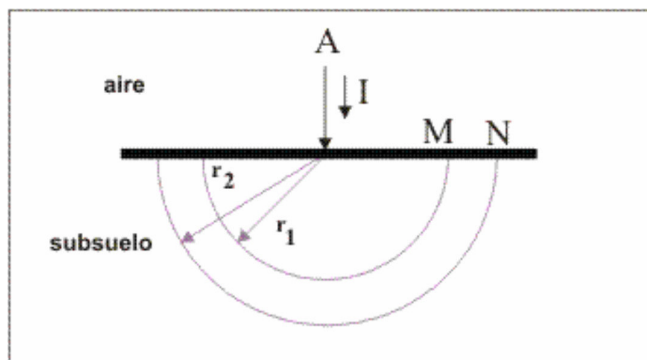


Figura 14. Líneas de corriente y superficies equipotenciales en las proximidades del electrodo A

2.2.8.2 Método de Resistividades: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El método geoelectrico de Resistividades: Sondeo Eléctrico Vertical consiste básicamente en emitir al terreno corriente continua o pulsante de baja frecuencia a través de un par de electrodos A y B (varillas de acero inoxidable) dispuestos en forma simétrica respecto del punto de atribución; y medir la diferencia de potencial ΔV a través de otro par de recepción M y N, dispuestos de igual forma.

El subsuelo actúa como impedancia, de tal forma que, al variar la separación interelectródica ello implicará, por una parte abarcar un mayor volumen de tramo, entre los electrodos, lo que modificará la impedancia

(resistividad aparente) y, por otra, una mayor profundidad de investigación.

Los dispositivos electródicos que se utiliza son cuatro (AMNB), que se disponen simétricamente y alineados respecto del centro, tenemos la expresión de resistividad aparente dada por:

$$\rho_a = K \cdot V / R$$

ρ_a = Resistividad Aparente en unidad de medida en Ohmios – metro.

K = Valor geométrico

ΔV = Caída de Potencial en milivoltios

I = Intensidad de corriente en miliamperios

Siendo K un factor geométrico, función de la distancia electródica:

$$K = 2 \pi (1/ AM -1 / AN - 1 / BM + 1 / BN)$$

2.2.9 Métodos directos de evaluación de deslizamientos: Vigilancia

La vigilancia de deslizamientos activos se realiza utilizando métodos de medición directa como es el caso del control topográfico, utilizando en algunos casos distanciómetros electrónicos o usando tecnología geodésica satelital (GPS), lo cual se describe a continuación de forma sucinta:

- **Topografía.** El control topográfico es realizado a través de mediciones de desplazamientos relativos de ciertos puntos de control superficial, identificados en campo, los cuales se determinan respecto de unos mojones construidos en terreno estable (fuera del área de influencia de los deslizamientos) que servirán de puntos de referencia, y otros puntos ubicados dentro del deslizamiento para evaluar el desplazamiento y la dirección que efectúa el punto. Existen muchos métodos para la medida del desplazamiento.
- **Medición electrónica de distancias.** Mediante el uso de instrumentos electrónicos como la estación total que es un teodolito con un distanciómetro que efectúa automáticamente el cálculo de coordenadas del punto visado.

- **Medición con GPS.** Se usa el método del GPS diferencial para mejorar la precisión del sistema GPS mediante la determinación de un error de posición desde los satélites del GPS a una estación fija conocida y la transmisión posterior del error determinado, o factores de corrección, para las otras estaciones GPS rover que operan en el área.

El sistema de correcciones funciona de la siguiente manera:

Una estación base en tierra, con coordenadas muy bien definidas, recibe la señal de los satélites GPS; calcula su posición por los datos recibidos de los satélites. Dado que su posición está bien definida, calcula el error entre su posición verdadera y la calculada, estimando el error en cada satélite. Se envía estas correcciones al receptor a través de algún medio. Existen varias formas de obtener las correcciones DGPS.

Las más usadas son recibidas por radio a través de algún canal preparado para ello, como el RDS en una emisora de FM. Descargadas de Internet con una conexión inalámbrica. Proporcionadas por algún sistema de satélites diseñado para tal efecto. En Estados Unidos existe el WAAS, en Europa el EGNOS y en Japón el MSAS, todos compatibles entre sí.

Para que las correcciones DGPS sean válidas, el receptor tiene que estar relativamente cerca de alguna estación DGPS, generalmente, a menos de mil kilómetros.

La precisión lograda alcanza errores de acuerdo al tiempo de medida, y la ventaja de este método es que no necesita que haya visión entre los dos instrumentos GPS. Sólo que haya buena recepción de satélites.

Las acciones de monitoreo geodésico se efectúan con la finalidad de conocer la dinámica del fenómeno, evaluar su evolución en el tiempo y de esta forma tener herramientas para poder predecir el comportamiento del mismo a futuro.

2.2.10 Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad se refiere al grado de daño que puede resultar por la ocurrencia de un peligro.

La vulnerabilidad física está directamente relacionada con la capacidad que tiene la estructura para soportar los efectos de un peligro natural y/o tecnológico.

En consecuencia, un análisis de vulnerabilidad determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica.

Los elementos bajo riesgo son el contexto social y material representado por las personas y por los recursos y servicios que pueden ser afectados por la ocurrencia de un evento, es decir, las actividades humanas, los sistemas realizados por el hombre tales como edificaciones, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, utilidades, servicios y la gente que los utiliza.

Este tipo de evaluaciones deben ser realizadas por entidades o profesionales de diversas disciplinas. Estudios acerca de la vulnerabilidad física y funcional deben ser realizados por ingenieros, arquitectos, planificadores; y evaluaciones de la vulnerabilidad social deben ser desarrolladas en forma multidisciplinaria por parte de economistas, sociólogos, médicos, socorristas y planificadores, entre otros”.

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR, 2009), la vulnerabilidad se refiere a las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. Por otra parte Wilches-Chaux (1989) sostiene que una sociedad puede enfrentar distintas vulnerabilidades, entre las cuales, la vulnerabilidad física se refiere a la localización de los elementos expuestos en una zona de riesgo físico, condición provocada por la pobreza y la falta de oportunidades para una ubicación de menor riesgo.

La vulnerabilidad física analiza por ejemplo: la capacidad sismo-resistente de las edificaciones, el nivel de exposición de viviendas y su capacidad para soportar inundaciones, etc.

2.2.11 Mitigación

- **Mitigación** Medidas estructurales y no estructurales emprendidas para limitar el impacto adverso de las amenazas naturales y tecnológicas y de la degradación ambiental.

Medidas estructurales y no estructurales Medidas de ingeniería y de construcción tales como protección de estructuras e infraestructura para reducir y/o evitar el posible impacto de las amenazas.

Las medidas no estructurales se refieren a políticas, concientización, desarrollo del conocimiento, compromiso público, y métodos o prácticas operativas, incluyendo mecanismos participativos y suministro de información, que puedan reducir el riesgo y consecuente impacto (Medina, 1991).

- **Tratamiento de la superficie del talud**

Por regla general, lo que se debe tratar es de descargar o desbrozar el talud en la parte superior del evento, a fin de restarle peso a la masa deslizante. También se debe desquinchar las partes altas de los taludes que han perdido estabilidad y se encuentran muy propensos a desprenderse y deslizarse pendiente abajo. Se puede reemplazar el material débil al pie del talud con materiales de compactación adecuada.

- **Estructuras de sostenimiento**

Como su nombre lo indica, son estructuras que cumplen la función de sostener la masa deslizante, generalmente son estructuras rígidas de concreto armado, gaviones y otros materiales de similar resistencia al empuje del deslizamiento. Se ubican en la parte inferior del deslizamiento o en posiciones intermedias a fin de controlar

pequeños deslizamientos dentro de una masa deslizante mayor. Se suelen denominar como: contrafuertes, muros de sostenimiento o contención, pilotes aislados o muros pilotes, etc, Figura 15.

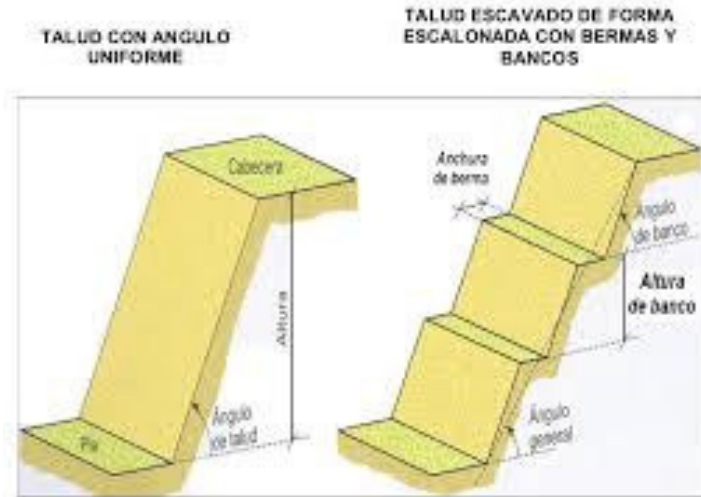


Figura 15. Estructuras de sostenimiento adecuada para zonas con taludes inestables

- **Zanjas de drenaje**

Programar zanjas de drenaje en la parte alta de Madrigal que reduzcan el área de infiltración, Figura 16.

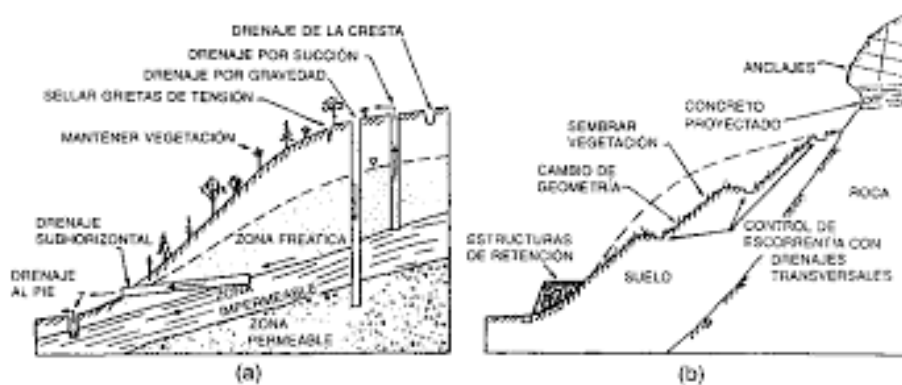


Figura 16 a) Drenajes de coronación b) Anclajes

- **Anclajes**

Se emplean en los casos donde no es posible o es muy difícil construir el contrafuerte ya sea por escasez de espacio y materiales etc. Consisten en perforaciones que se practican en la masa deslizante hasta llegar a la roca estable donde se incrustan unas barras metálicas, con la finalidad de fijar las materias rocosas inestables propensas a deslizarse. Pueden ser de barras simples o pretensados. El área de acción de un anclaje es pequeño. La ubicación de los anclajes requiere del conocimiento real y profundo de las características y comportamiento de las rocas donde se fijan los anclajes.

- **Sistema de riego por goteo y/o aspersión**

Estos sistemas de riego tecnificado permiten elevar el porcentaje de áreas con regadío y reducir la infiltración de las aguas de escorrentía, Figura 17.



Figura 17. Aspersores ubicados en zona de talud inestable

No se deben utilizar los terrenos desestabilizados como parcelas agrícolas, deben primeramente realizar movimientos de tierra para hacer terraplenes con drenajes que permitan derivar las aguas al río.

- Reducción y control de la infiltración de las aguas en los terrenos escarpados propensos a deslizamientos.

Esto puede llevar a cabo mediante la impermeabilización y/o reubicación de canales de riego, mejoramiento en el sistema de riego, sellado de grietas en las partes superiores de los terrenos en laderas, drenaje de exceso de agua contenida en la masa deslizante mediante galerías filtrantes, tuberías y canales a fin de bajar el nivel del agua subterránea y aumentar la fricción en la superficie de falla.

- Construcción de muros secos o pircas, gaviones que ayuden a conservar la forma del talud, sembrío de árboles de raíces profundas en las masas deslizantes de poca profundidad. Estos servirán a la vez como indicadores del movimiento que pueden experimentar los terrenos, Figura 18.

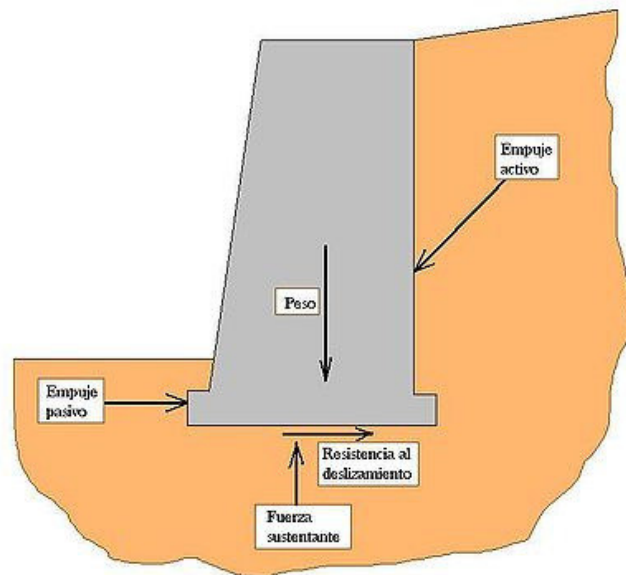


Figura 18. Esquema de un muro de contención para controlar empujes de las zonas desestabilizadas.

Entre las medidas de mitigación no estructural se tienen las siguientes:

– **Capacitación en gestión de riesgo de desastres de la población**

El proceso de capacitación involucra la comunicación en la gestión de riesgo de desastre, visto desde la óptica de que no sólo es necesario

informar a la población sino también formarla, es dinámico, intersectorial, interinstitucional e interdisciplinario y requiere de una estrecha interrelación y coordinación entre todos los actores que son parte del proceso para lograr una estrategia efectiva de comunicación para la reducción de los riesgos a todo nivel como veremos más adelante. El comunicador social cumple la función de ser el enlace entre la población y los entes científicos e instituciones públicas y privadas que se encargan de gestionar el riesgo de desastre. En su papel de interlocución entre las partes, brinda al público la información necesaria para conocer los peligros a que está expuesto, identificar su vulnerabilidad y sus capacidades, e influir en los distintos actores del proceso para que se generen cambios que transformen las condiciones de riesgo existente en condiciones de seguridad y resiliencia en los distintos territorios y en las personas. La comunicación se convierte en un elemento fundamental en la medida que logra facilitar el diálogo de todos los actores sociales, el manejo de conceptos y apropiación del tema a través de estrategias comunicativas que generan conciencia en la población más vulnerable.¹⁶ Los medios de comunicación pueden jugar un papel muy importante en desarrollar una perspectiva de gestión de riesgo y cambiar la improvisación por un esfuerzo permanente y organizado (Ulloa, 2001).

2.3 MARCO CONCEPTUAL O GLOSARIO

- **Acuífero** Que tiene agua. Conformado por materiales rocosos que contienen agua en su interior y que pueden ser explotados.
- **Aluvial** Relativo o perteneciente a los aluviones.
- **Aluvión** Depósito de fracciones de roca transportada por las aguas corrientes
- **Antrópico** Comprende a las modificaciones o cambios provocados directa o indirectamente por el hombre sobre el medio natural donde se desarrolla.
- **Cárcava** Zanja excavada en sedimentos no consolidados en las laderas por acción de las aguas de lluvias que escurren por la superficie.
- **Colmatación** Acción y efecto de colmatar, llenar hasta el borde. Sedimentación excesiva en los cauces fluviales u otros.

- **Deforestación** Destrucción de bosques
- **Desastre** Calamidad, catástrofe. Daño o efecto negativo que deja la ocurrencia de un fenómeno, natural o inducido, sobre una situación vulnerable.
- **Detrítico** Compuesto de detritos o residuos de fragmentos de rocas producto de la meteorización de la roca.
- **Dinámica** Fuerza, movimiento, cambio.
- **Drenaje** Sinónimo de avenamiento. Se refiere al escurrimiento de los fluidos a través de una superficie o cuerpo dado.
- **Ecosistema** Sistema constituido por los seres vivos existentes en un lugar determinado y el medio natural que le es propio.
- **Erosión** Desgaste o destrucción producido por algún agente físico, químico o biológico.
- **Endógeno** Es utilizado por distintas disciplinas para hacer referencia a algo que es originado dentro de una cosa, en contraposición a exógeno. Hace referencia a algo que se origina o nace en el interior, o que se origina en virtud de causas internas.
- **Escorrentía** Movimiento de las aguas continentales por efecto de la gravedad, que tiene lugar a lo largo de cauces excavados en la superficie del terreno.
- **Fenómeno** Todo lo que puede ser percibido por los sentidos o por la conciencia. Hecho natural que hiera a la imaginación.
- **Freático** Relativo a las aguas acumuladas en el subsuelo.
- **Fumarola:** Emanación de gases y vapor de agua, generalmente a altas temperaturas, que sale de fracturas o grietas de la superficie de un volcán. La mayor parte de los gases emitidos son vapor de agua; sin embargo, se encuentran otros gases como CO₂, CO, SO₂, H₂S, etc.
- **Gavión** Cestón lleno de piedras, hecho con mallas metálicas que se usa para defensa ribereña y estabilización de taludes.
- **Geoforma** Referido a la forma que adopta la superficie terrestre o parte de ella.
- **Hidrogeología** Parte de la geología que estudia el agua contenida en las rocas y materiales del subsuelo.

- **Infiltración** Paso lento de un líquido a través de los poros del suelo y rocas.
- **Ladera** Declive o pendiente de un monte o ribera de un río.
- **Magnitud** Tamaño de un cuerpo, importancia, cantidad.
- **Medidas de control** Todas aquellas medidas tomadas para contrarrestar y/o reducir el riesgo de desastres. Frecuentemente comprenden medidas de ingeniería (estructurales) pero pueden también incluir medidas no estructurales y herramientas diseñadas y empleadas para evitar o limitar el impacto adverso de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos consecuentes.
- **Meteorización** Destrucción de las rocas y minerales por acción de agente meteóricos como: el agua, el aire, el sol; puede ser física, química o biológica.
- **Modelado** Conjunto de formas del relieve que son características de un proceso de erosión particular.
- **Monitoreo** Es un término no incluido en el diccionario de la **Real Academia Española (RAE)**. Su origen se encuentra en **monitor**, un aparato que toma imágenes de instalaciones filmadoras o sensores y que permite visualizar algo en una pantalla. El monitor, por lo tanto, **ayuda a controlar o supervisar** una **situación**.
- **Proluvial** Depósito acumulado por los torrentes en el fondo de su lecho y desembocadura.
- **Pronóstico** Declaración definida o estimación estadística de la ocurrencia de un acontecimiento futuro (UNESCO, WMO). Este término tiene significado diferente según la disciplina.
- **Remoción** Acción de remover. Cambiar de sitio una cosa. Movilización de roca o sedimentos por un agente geológico bajo la acción de la gravedad.
- **Resiliencia** es la capacidad para afrontar la adversidad y lograr adaptarse bien ante las tragedias, los traumas, las amenazas o el estrés severo.
Ser resiliente no significa no sentir malestar, dolor emocional o dificultad ante las adversidades. La muerte de un ser querido, una enfermedad grave, la pérdida del trabajo, problemas financiero serios, etc., son

sucesos que tienen un gran impacto en las personas, produciendo una sensación de inseguridad, incertidumbre y dolor emocional.

- **Socavación** Acción y efecto de socavar. Excavación producida por las aguas al pie de las escarpas, acantilados y márgenes.
- **Substrato** Terreno que queda bajo una capa superpuesta.
- **Talud** Declive o inclinación de un muro o del terreno.
- **Tectónica** Relativo a la estructura de la corteza terrestre. Parte de la geología que trata de dicha estructura.
- **Tefra** Término general que comprende cualquier material sólido emitido durante una erupción volcánica explosiva. Puede ser ceniza, lapilli, bloques y bombas volcánicas, escoria, entre otros.
- **Torrencial** Que parece un torrente, sumamente violento.
- **Torrentera** Cauce o lecho de un torrente.
- **Vertiente** Pendiente por donde corren o pueden correr las aguas pluviales hasta los valles.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tema de investigación es del tipo de investigación siguiente: No experimental, descriptiva y explicativa.

- **Tipo No experimental.** Al comenzar el proyecto de investigación será del tipo no experimental que abarcará el análisis del problema, la toma de datos en campo revisión de bibliografía especializada y el análisis del deslizamiento de tierra en el centro poblado de Madrigal y sus principales evidencias.
- **Tipo Descriptiva:** En esta etapa de investigación se pretende determinar la relación que existe entre el análisis geodinámico del evento y su caracterización geotécnica con la finalidad de estimar medidas de mitigación estructural que permita reducir la alta vulnerabilidad de este poblado al deslizamiento activo.
- **Tipo Explicativa:** Finalmente el trabajo de investigación será del tipo explicativo, ya que se indicarán las condiciones en las que ocurren los deslizamientos de tierra y las características que presentan.

Los resultados del trabajo pueden constituir un aporte al modelo teórico de la explicación de hechos y fenómenos que puedan generalizarse a partir del problema de investigación.

3.2 UNIDAD DE ANÁLISIS

Deslizamiento de Madrigal

3.3 POBLACIÓN DE ESTUDIO

En la localidad de Madrigal se han delimitado 2 deslizamientos activos que afectan la seguridad física de esta localidad: Pullhuay y Uchina.

3.4 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Se seleccionaron los sectores de Pullhuay y Uchina, puesto que en estas zonas se encuentran los deslizamientos activos que afectan la seguridad física de esta localidad.

3.5 SELECCIÓN DE MUESTRAS

Muestreo intencional ya que se ha elegido porque se tiene una única área de estudio.

3.6 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La investigación se ha dividido en tres etapas:

3.6.1 Recopilación de la información existente: Consistió en buscar toda la información referente a la zona de estudio y a las actividades que debían desarrollarse en la misma. Esta etapa se desarrolló en diversas instituciones de Lima y Arequipa.

- Análisis fotogramétrico de fotografías aéreas vuelo SAN del año 1997 delimitándose los deslizamientos existentes para su posterior comprobación en campo.

3.6.2 Trabajo de campo: Se realizaron las siguientes actividades:

- Levantamiento topográfico a escala 1: 15000 con estación total de la zona de estudio
- Mapeo geológico - estructural, delimitación de deslizamientos y manantiales a escalas 1:35000.
- Cartografiado geodinámico a escala 1/35,000.
- Recolección de muestras de suelos para ensayos geotécnicos.
- Monitoreo Geodésico Satelital, que consistió en el control de puntos GPS en la zona de estudio, los cuales fueron ubicados en el año 2001 como parte de un proyecto IGP-CONCYTEC.
- Investigación geofísica: 10 sondajes eléctricos verticales en la zona del deslizamiento en Madrigal.
- Vigilancia geodésica del deslizamiento mediante puntos de control EDM (medidas con distanciómetro electrónico).

3.6.3 Trabajo de gabinete: Consistió en las siguientes actividades:

- Realización de los ensayos de las muestras de suelos en laboratorio de mecánica de suelos de la UNSA (Arequipa) y UNALM (Lima), para su posterior interpretación de resultados.
- Elaboración de base topográfica: Se ha utilizado la topografía digital del Catastro Rural del Ministerio de Agricultura a escala 1/25,000, que ha sido complementada con la topografía obtenida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDT) con resolución de 30 m descargado de www.astergdem.com. Esta información ha sido georeferenciada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se ha trabajado en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y Datum WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), Zona 18 S.
- Elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT): Es una representación digital de la superficie terrestre que permite reconocer las geoformas presentes en el área de estudio, teniendo en cuenta la elevación del terreno (m.s.n.m); se obtiene en base a la restitución fotogramétrica, a escala 1:5000 que se realizó en el área de estudio, con coordenadas UTM, resolución espacial de 5 m y con referencia al geoide WGS 84, la cual se referencia con el programa SIG.

En base al MDT elaborado para Madrigal se obtiene que la zona urbana se asienta sobre terrazas fluvio-aluvionales que presentan una cota promedio entre los 2100 y 2900 m.s.n.m, **Plano 02**.

El MDT se utilizó para el modelamiento numérico del deslizamiento de Madrigal.

- Elaboración del mapa de pendientes: Mapa temático que mediante un sistema gráfico digital representa los diferentes grados de desnivel (inclinación de una superficie respecto a la horizontal de un territorio) del terreno.

Consiste en representar mediante colores zonas del terreno con pendiente semejante, por lo tanto, el objetivo de este mapa es reconocer las distintas geoformas presentes en el terreno a través de la pendiente que presenten. Se obtiene en base a la aplicación de la rutina SPATIAL ANALYST del software SIG, usando como archivo fuente el MDT generado anteriormente.

3.7 HIPOTESIS Y VARIABLES

3.7.1 Hipótesis General

La evaluación geodinámica del deslizamiento de Madrigal permitirá plantear una propuesta de modelo geotécnico para reducir la vulnerabilidad física de la localidad de Madrigal.

3.7.2 Hipótesis Específicas

1. La evaluación geodinámica del deslizamiento de Madrigal permitirá plantear una propuesta de modelo geotécnico del evento.
2. El modelo geotécnico del deslizamiento de Madrigal permitirá plantear medidas para la reducción de la vulnerabilidad física de esta localidad. utilizando software especializado de estabilidad de laderas considerando

3.7.3 Identificación de Variables

Las variables directas, indirectas e indicadores de la investigación son las siguientes:

2.2.10 **Variable independiente:** La evaluación geodinámica del deslizamiento de Madrigal.

2.2.11 **Variable dependiente:** Modelo geotécnico para la reducción de la vulnerabilidad física del poblado de Madrigal.

3.7.4 Operacionalización de las variables

- Variable Independiente: Evaluación geodinámica del deslizamiento de Madrigal
 - Definición: Procedimiento que involucra conocer las causas de la ocurrencia de eventos geológicos y aquellos factores que los generan, las condiciones en que se desarrollan y sus efectos sobre el globo terrestre.
 - Dimensión: Los factores condicionantes y desencadenantes de los eventos geológicos.
 - Indicadores: Cartografiado geológico, cartografiado geomorfológico, monitoreo geodésico, etc.
- Variable dependiente: Modelo geotécnico para la reducción de la vulnerabilidad física del poblado de Madrigal.
 - Definición: Modelamiento numérico utilizando elementos finitos mediante parámetros geotécnicos que definen el análisis de estabilidad de un talud y simula escenarios en función de los valores asignados.
 - Dimensión: Las tasas de deformación del talud inestable, diagnosticar el estado actual del deslizamiento.
 - Indicadores: Análisis de estabilidad de taludes, monitoreo geodésico con distanciómetro electrónico y GPS.

CAPÍTULO IV

GENERALIDADES

En este capítulo se describe la ubicación geográfica y política del área de estudio, los accesos a la misma y los aspectos hidrológicos. También se describen los aspectos geomorfológicos y geológicos a nivel regional.

4.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

El área de estudio que se muestra en el plano 01, está ubicada a 31 km. al Oeste de Chivay, en el distrito de Madrigal, provincia de Caylloma, Región Arequipa. La ubicación está delimitada por las siguientes coordenadas, Cuadro 2:

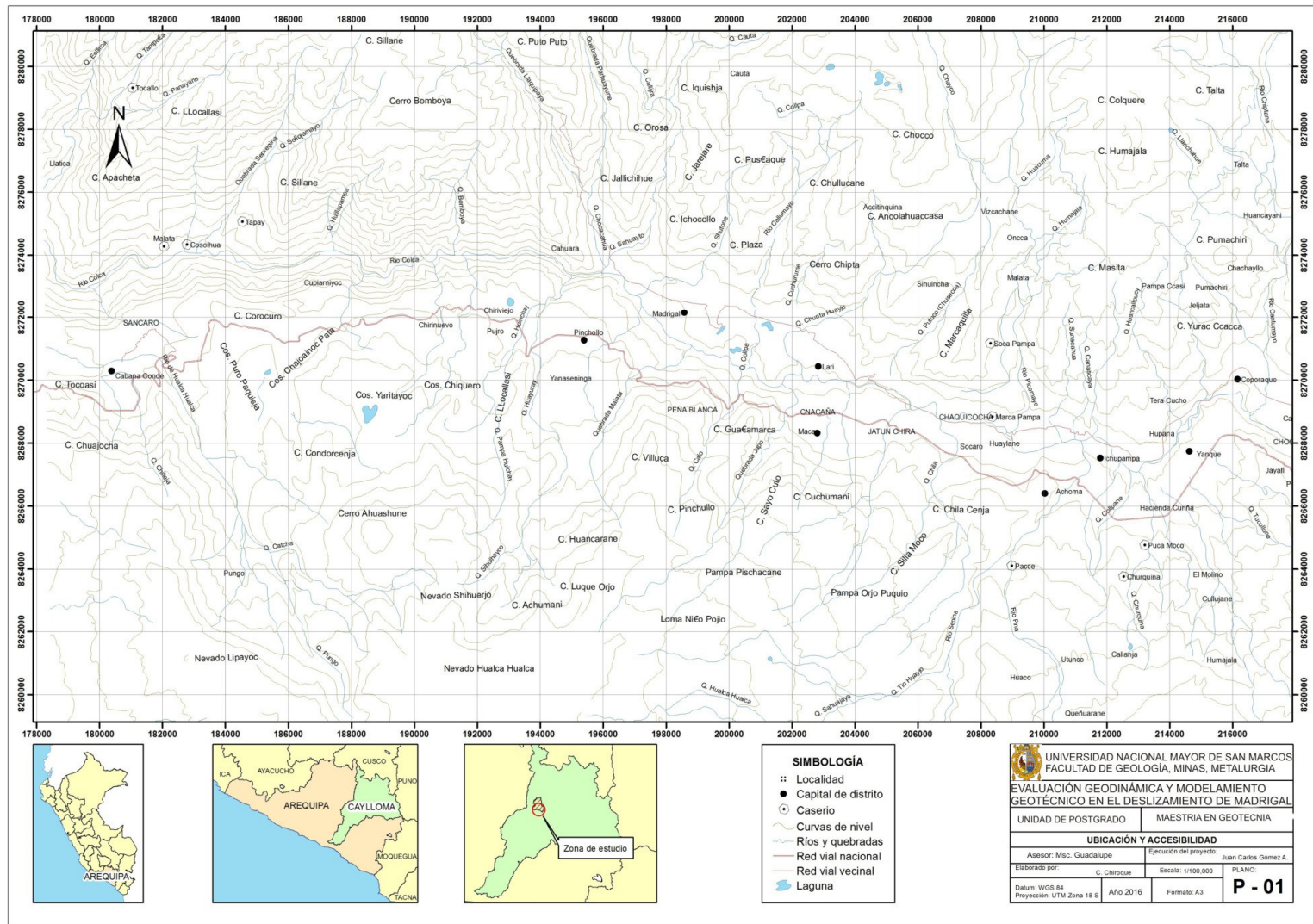
Hemisferio:	Sur
Zona:	19
Datum:	WGS 84
Coordenadas:	178000 , 8260000 216000 , 8280000

Cuadro 2. Coordenadas UTM del área de estudio

El acceso al distrito de Madrigal se presenta en el Cuadro 3:

Vía	Distancia	Estado	Tiempo Aprox.
Arequipa - Yura	36.5 km.	Asfaltada	50 min.
Yura - Chivay	155.5 km.	Afirmada	2 h 30 min.
Chivay - Madrigal	20 km.	Afirmada	1 hora

Cuadro 3. Distancias desde Arequipa a Madrigal.



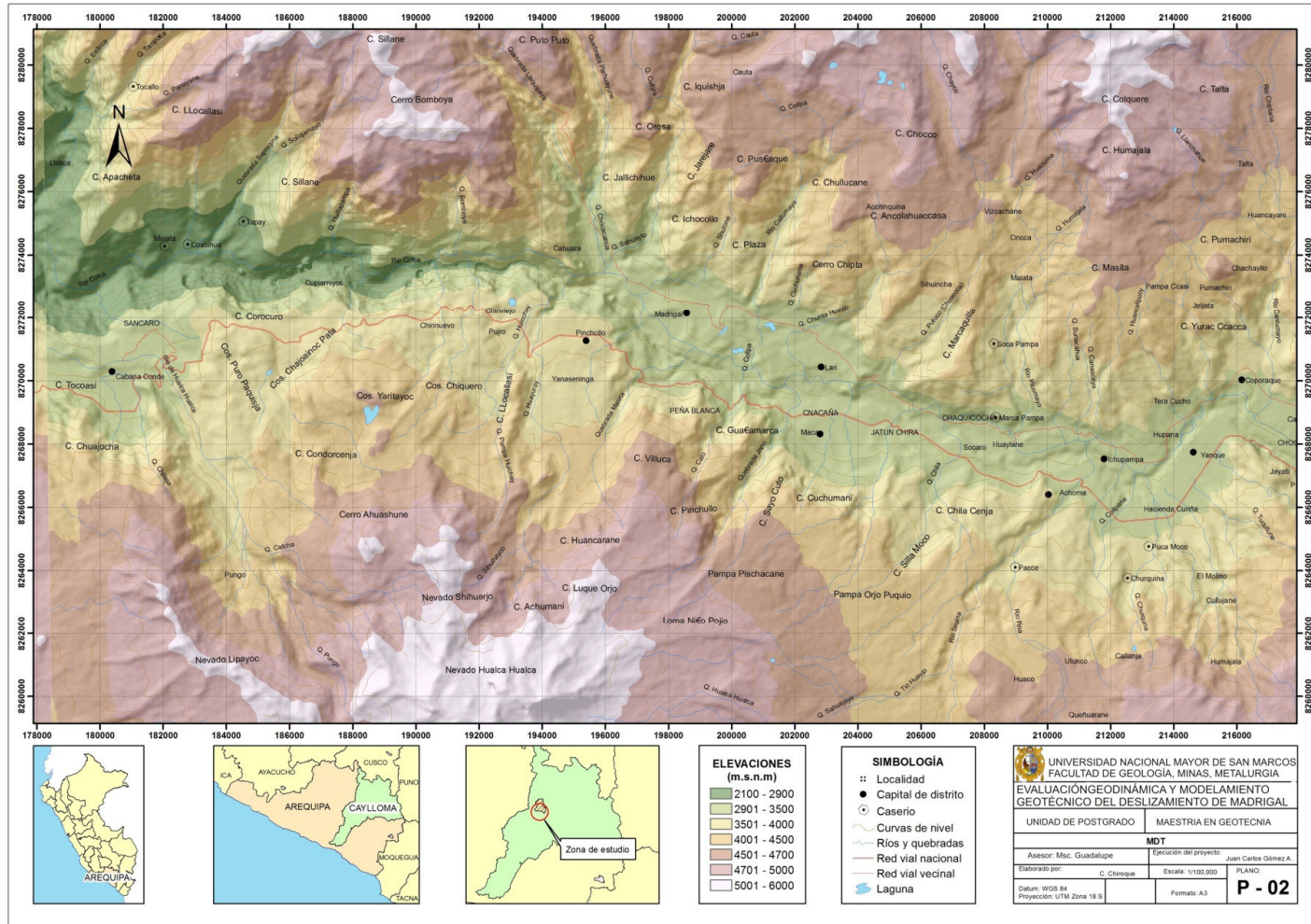
4.2 HIDROLOGÍA GENERAL

El río Colca - Majes y Camaná, en la vertiente del Pacífico es uno de los de mayor longitud, sus nacientes está en el C° Yanasalla, a 4 886 m al NE del departamento de Arequipa, en el límite con el departamento de Puno. En sus inicios sigue una dirección SE-NO, atravesando las Pampas de Acucullo, Lazayacınca y Colca, donde toma este nombre (ONERN, 1973). El río Colca, recibe una serie de afluentes, siendo el mayor el río Negrillo, luego recibe las aguas del río Acopunco y a partir de esta confluencia cambia de rumbo y se dirige al SSO, hasta Chivay donde varía nuevamente su dirección y discurre con rumbo E-W, formando un importante valle agrícola entre los 3 651 m (Chivay) y los 2 219 m (confluencia del Colca con el río Huaro Rumi), Plano 03. Concluye el valle agrícola y el Colca formando un largo y profundo cañón, sigue con dirección NO-SE hasta confluir con el río Andamayo, donde una vez más cambia de rumbo y de nombre pues se dirige con dirección N-S, y la denominación de río Majes nombre que se mantiene hasta poco antes de su desembocadura, llegando al mar como río Camaná, al norte de la ciudad de Camaná. Su longitud es de 397Km, con una pendiente promedio de 1.2%. Tiene una forma ensanchada en su sector superior y alargada en el inferior. Como casi todos los ríos de la costa, es de fondo profundo y quebrado y de fuertes pendientes. Se encuentran en su parte superior varias lagunas como las de Arcata, Huisca Huisca, Mamacocha, Chilacocha, Samaccota y Mucurca. Sus afluentes principales por la margen derecha, son los ríos Blanquillo, Negrillo, Condoroma, Moqueruyo, Molloco, Chalhuanca, Ayo, 6 Mamacocha y Capisa. Por la margen izquierda los ríos Antasalla, Callalli, Hualca Hualca y Huambo. El escurrimiento superficial del río se debe principalmente a la precipitación estacional que ocurre en su cuenca alta (Zavala y Fidel, 1994), Plano 02.

4.2.1 Hidrografía

El río Colca pertenece a la subcuenca del río del mismo nombre, cuenca del río Majes – Camaná, hoya del Océano Pacífico.

El río Colca tiene su nacimiento en las alturas de los cerros Yaretana y Torre, ubicados en la provincia de Caylloma a 4750 msnm., alimentando sus



cursos de agua primordialmente con las precipitaciones que caen en las alturas del flanco occidental de la Cordillera de los Andes y con los deshielos de éstas (Figueroa, 2009).

La cuenca media del río Colca está limitada entre las localidades de Tuti y Cabanaconde abarcando un área de drenaje de 1274.84 Km² y una longitud de recorrido de 61 Km. presentando una pendiente promedio de 2.25%.

Antes de entrar en el valle, en el tramo de Tuti – Chivay la dirección del río Colca es de NE– SW cambiando de dirección a E-W a la altura de Chivay hasta Cabanaconde, (Panitz, 2004).

En la parte media del río Colca, las principales fuentes de recarga del río son las aguas que vienen de los nevados de la Cordillera del Chila, los nevados Ampato, Sabancaya y las aguas subterráneas, que son evidenciadas en manantiales ubicados en varias localidades de la zona.

El río Colca es captado y regulado en su totalidad, con fines de riego y generación de energía por el proyecto Majes y las aguas captadas son conducidas por medio de un sistema de túneles y canales por la margen izquierda del río Colca, Plano 02.

4.2.2 Parámetros geomorfológicos

El valle del Colca se encuentra ubicado en el flanco occidental (ramal oriental) de la Cordillera de los Andes, localmente conocido como cordillera del Chila a una altitud promedio de 2300 msnm. Esta localización hace que el valle del Colca tenga una serie de características propias de la región Puna.

El río Colca en todo su recorrido presenta diversas variantes en su dirección pero en una escala regional se distinguen tres tramos (Zavala y Fidel, 1994):

- Tramo oriental, que comprende desde Tuti hasta Chivay, donde el cauce del río Colca presenta una dirección NE-SW, presentando un contrafuerte oriental bastante empinado el margen occidental también caracterizado por un flanco empinado.

- Tramo medio, abarca el sector de Chivay a Pinchollo, donde el río discurre en una dirección general E - W mostrando un valle amplio con terrazas de cultivo cuyo sustrato son sedimentos finos lacustres.
- Tramo Occidental, desde Pinchollo hasta Cabanaconde, se caracteriza por una profundización espectacular del río Colca (E-W) a lo largo del cañón más profundo del mundo; debido a un cambio de litología de los terrenos atravesados constituidos por series volcánicas del Terciario Superior - Cuaternario.

La zona de estudio está ubicada en el final del tramo medio donde el río Colca constituye el eje principal de recepción de las quebradas y drenajes de segundo y tercer orden.

El distrito de Madrigal está ubicado entre las subcuencas del río Punco y el río Ccallomayo, ambos de segundo orden, que provienen de las partes altas y que reciben aportes de quebradas a lo largo de su cauce, estas son estacionales que corresponden a los períodos de lluvia.

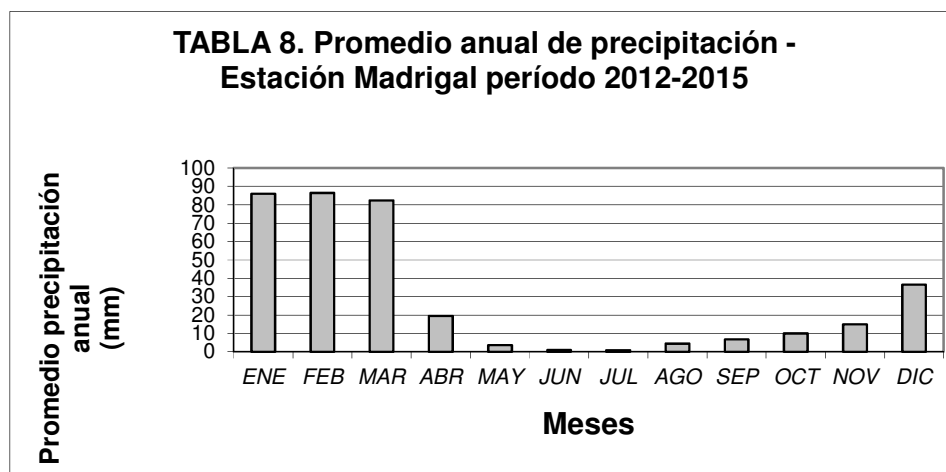
Presenta flancos de moderada a fuerte pendiente, en zonas netamente volcánicas con desniveles de 1000 a 2000 metros.

Los factores geomorfológicos modelan principalmente la red de drenaje y la topografía, el ambiente geomorfológico actual ha sido modelado sobre la base de las crisis climáticas que tuvieron lugar en el Pleistoceno, modificando el valle previamente formado, ocasionando un proceso de rejuvenecimiento con formación de nuevas terrazas y aislando las previamente formadas (valles colgados) de esta manera el río socavó las laderas, y la acción del viento y de los agentes climáticos erosionaron las rocas aflorantes dando lugar a geoformas positivas de perfiles suaves cortadas por cañones de naturaleza abrupta. La erosión de los suelos por las aguas de escurrimiento superficial en los flancos y en el fondo de los valles es muy activa, y a los manantiales no son permanentes. Estos valles tienen partes muy estrechas (V cerrada) y partes muy amplias (V abierta), en los cuales se forman cuencas amplias (Peñaherrera, 2004).

4.2.3 Precipitación pluvial

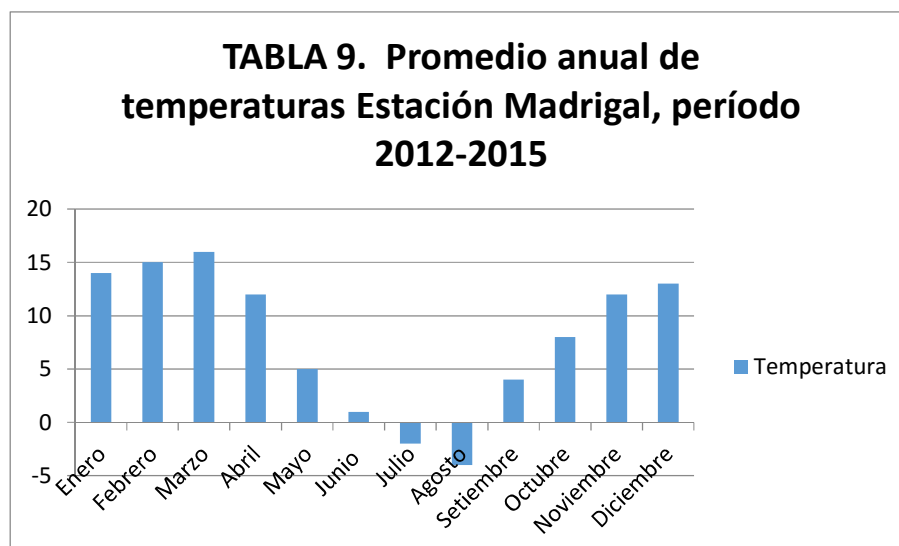
El clima de acuerdo a la clasificación del ANA (EX INRENA) que toma como base la clasificación modificada de Koppen de 8 climas, corresponde a un clima entre “templado sub – humedad” propia de valles interandinos bajos e intermedios entre altitudes 200 y 3000 msnm. Y parte del tipo de clima “frío boreal” propia de valles interandinos intermedios y valles mesoandinos situados entre los 3000 y 4000 msnm.

Las precipitaciones en la zona de estudio son registradas por el SENAMHI en la Estación de Madrigal. La data con la que se cuenta corresponde al intervalo de precipitaciones de los años 1965 a 1989 (Tabla 8), observándose precipitaciones del orden de los 85 mm en los meses de Enero a Marzo, que corresponden al período de lluvias de la región. La precipitación máxima 2002 fue de 489 mm en tanto que la mínima fue de 39.1 mm, y una precipitación promedio anual de 346.1 mm/año



4.2.4 Temperatura

La temperatura media anual en Madrigal es de 12.8 °C con temperaturas mínima de -6,6 entre junio y Julio y máximas de 13,8 a 16 °C entre Enero y Marzo, Tabla 9.



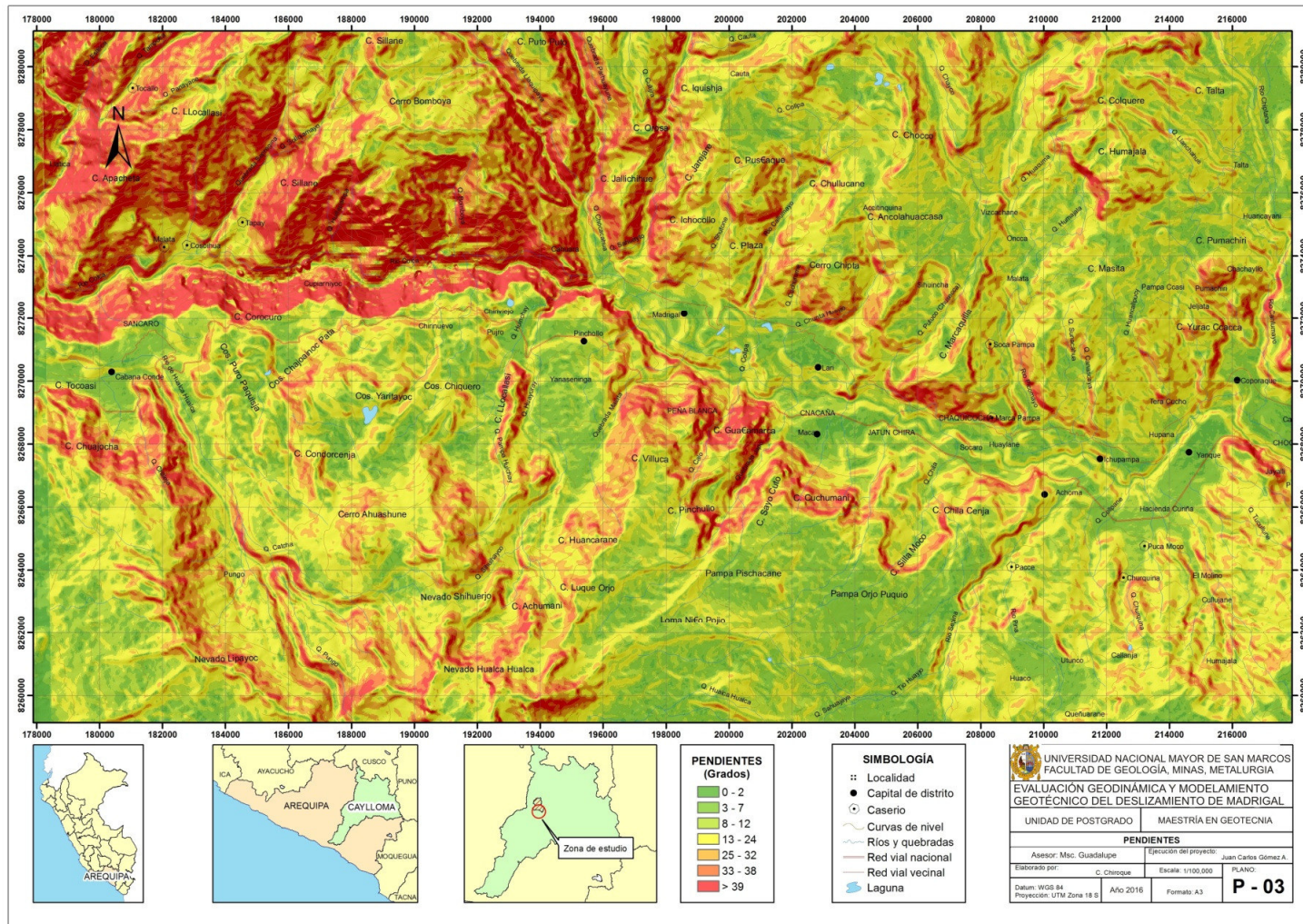
Fuente: SENAMHI, 2015.

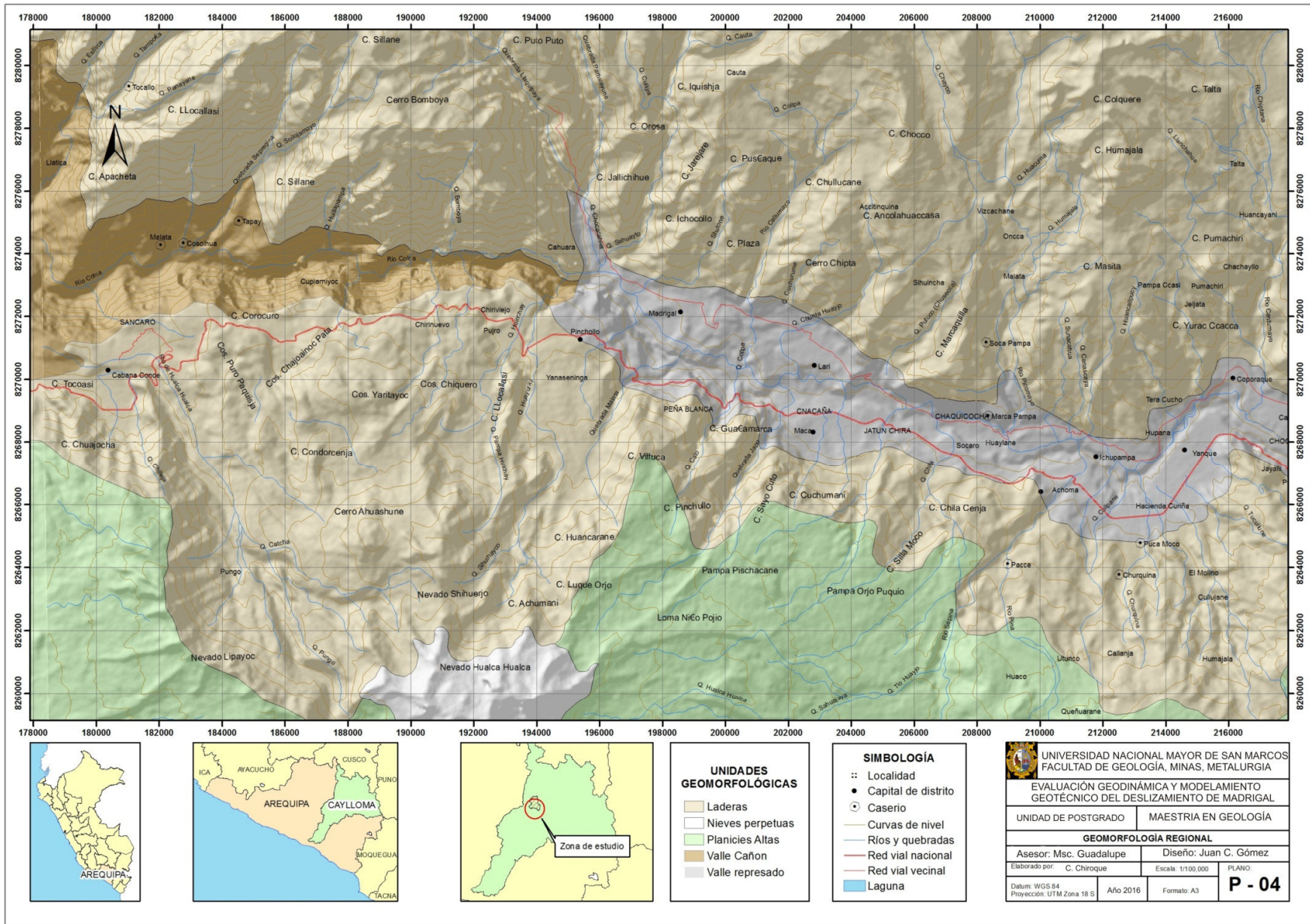
4.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

En este ítem se aborda lo concerniente a las condiciones físicas del terreno, su representación y análisis del relieve en función de los agentes modeladores, temas que se refieren a los aspectos topográficos y geomorfológicos, respectivamente, que se detallan a continuación:

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas que presenta la superficie de la Tierra. Las geoformas son cuerpos tridimensionales con forma, tamaño, volumen y relieve. Las geoformas a lo largo de la Tierra son muy variadas debido a la heterogeneidad de materiales e independencia de eventos y procesos por lo cual es difícil aplicar las mismas leyes en diferentes lugares.

El modelado del paisaje depende de factores geológicos, estructurales, climáticos, hidrológicos, topográficos, etc., planos 03 y 04.





El valle del Colca es resultado de una serie de procesos que han ido modelando a lo largo del tiempo geológico, las características fisiográficas que observamos hoy en día. En base a trabajos anteriores y estudio de campo las unidades geomorfológicas observadas en la zona de estudio son:

4.3.1 Zonas de montaña y nieves perpetuas

Estas unidades forman parte de la Cadena Occidental de la Cordillera de los Andes y son producto de las diversas fases del levantamiento andino.



Figura 19. Cumbre del volcán Hualca Hualca que forma parte de la Cordillera Occidental

Estas unidades geomorfológicas corresponden a remanentes de depósitos volcánicos antiguos que han sido sometidos por un fuerte proceso de erosión producto de procesos exógenos (variación de temperaturas, lluvias, fuerzas eólicas y glaciación), conllevando esto a la profundización de los cursos fluviales, dando como resultado profundos valles interandinos, Figura 19.

Conforman los flancos del valle y por su naturaleza volcánica presentan paredes abruptas con diferentes pendientes, por lo que se les ha clasificado en dos subunidades (Panitz, 2003)

4.3.2 Laderas con flancos de pendiente fuerte

Se le asigna este nombre a los flancos que presentan más de 30° de pendiente. Están constituidas tanto por roca como de sedimento parcialmente inconsolidadas, conformando escarpas de gran magnitud llegando incluso a la verticalidad, esto debido a la variación de litología (afloramiento del volcánico Tacaza) siendo ésta más dura que las zonas que presentan moderada pendiente; en las partes bajas se encuentran conformadas por detritos y conos de derrubios, Figura 20. No presenta actividad antrópica y las zonas más estables vienen a ser aquellas escarpas que muestran roca aflorante. Se les aprecia en cerros de elevaciones que van desde 3400 hasta 4000 m.s.n.m. Se les localiza en las partes altas y medias del valle. Debido a su elevada altitud estos depósitos han experimentado actividad glacial.



Figura 20. Al fondo de la fotografía se observan zona de laderas con flancos de fuerte pendiente en las inmediaciones de Madrigal

4.3.3 Planicies altas con flancos de pendiente moderada

Estas unidades corresponden a áreas con pendientes menores a 30° , se localizan en la parte más alta del valle y en su mayoría han sido modeladas en rocas más blandas y uniformes (Volcánico Barroso). Por su cercanía con los nevados, además por la altura a la que se localizan muestran evidencias de actividad glaciar (morrenas y taludes periglaciares) y algunos afloramientos rocosos, Figura 21.



Figura 21. En el extremo superior derecho de la fotografía se observa la unidad de planicies altas.

4.3.4 Valle represado

Es una zona de valle con depósitos de corte y relleno limitados por las laderas y el río colca. Es en esta zona donde se encuentra la mayoría de los pueblos y zonas de cultivo; este relleno es producto de la acumulación de aluviales antiguos que ocasionaron la formación de terrazas levantadas y disectadas, son superficies horizontales a subhorizontales con una pendiente de 2 a 3° .

Su formación se sitúa entre el Plioceno y el Holoceno por relleno de cauces fluviales, estos depósitos fueron total o parcialmente

interrumpidos por efectos de deslizamientos y avalanchas de escombros provenientes del aparato volcánico Hualca Hualca (centro Ashuane), (Chávez, 2004), produciéndose un lago con la consiguiente deposición de material tipo lacustre constituido por limo y arcillas; Después de unos miles de años este dique se rompió y comenzó una etapa de erosión dejando valles amplios formados por una prolongada acción erosiva que dio lugar a un potente relleno detrítico que al ser cortado posteriormente por los agentes erosivos en proceso de rejuvenecimiento formó valles colgados y dejó al descubierto terrazas elevadas, Figura 22.

Los valles de erosión están conformados por terrazas y andenerías y están ubicados a altitudes de 3200 a 3400 m.s.n.m. En la actualidad estos suelos están afectados por deslizamientos y agrietamientos.



Figura 22. La unidad valle represado está conformada por terrazas y colinas adyacentes al río Colca.

4.3.5 Valle cañón

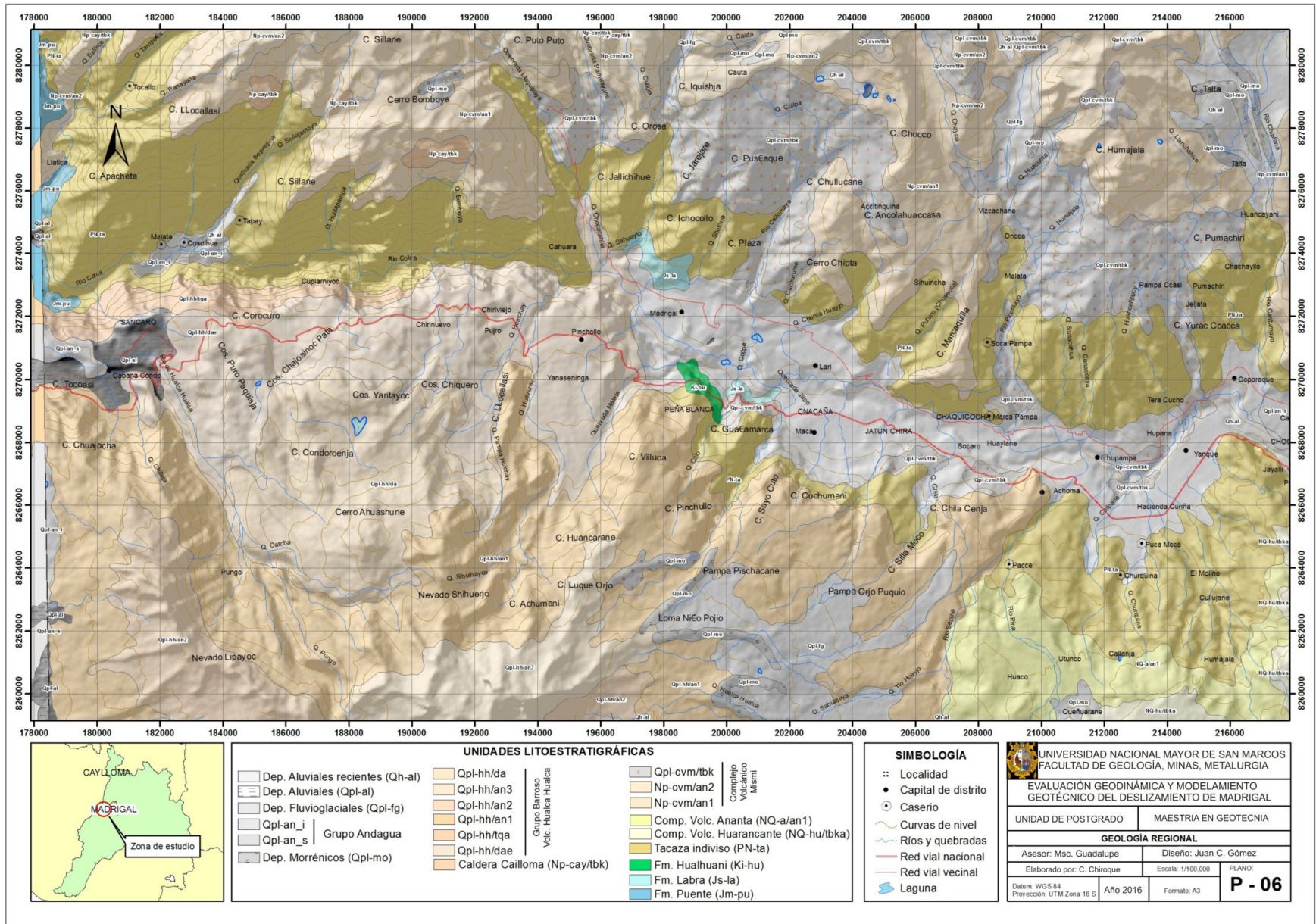
Esta unidad se desarrolla en el extremo occidental de Madrigal desde la Quebrada Sahuayco hasta las inmediaciones de Cabanaconde, con desniveles de hasta 1300 m. Esto debido a la máxima incisión del valle por el levantamiento cortical activo, Figura 23.



Figura 23. Zona del valle Cañón a la altura de la Cruz del Cóndor - Cabanaconde

4.4 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología del valle del río Colca presenta unidades litológicas desde el Jurásico hasta el Reciente, los cuales salieron a superficie por la tectónica y afloran gracias a la acción erosiva del río Colca. Estos estratos han sufrido procesos de compresión correspondientes al levantamiento andino produciéndose plegamientos y callamientos; además de procesos de geodinámica externa los cuales dan lugar a diversas geoformas descritas anteriormente, plano 06.



4.4.1 Geología Histórica

La historia geológica del Valle del Colca comienza en el Jurásico Superior con la sedimentación casi continua a lo largo del geosinclinal andino que dio lugar a una potente secuencia sedimentaria, depositándose las capas del Grupo Yura cuyos remanentes se encuentran en la zona de estudio (Palacios y Klinck, 1987).

En el Cretáceo Superior el mar se retira definitivamente de la región andina ocasionando regresiones paulatinas, produciéndose posteriormente el levantamiento de la secuencia sedimentaria (Grupo Yura) producto de la primera fase de la orogenia andina (Fase Peruana), por lo que se producen plegamientos y fallamientos, delineándose la Cordillera Occidental; conjuntamente se da la deposición de sedimentos continentales (en Arequipa y Puno, formación Huanca y Grupo Puno respectivamente) este ocurrió entre el Paleoceno y el Eoceno entrando ya a la era Cenozoica.

Durante el Eoceno medio se producen perturbaciones tectónicas evidenciadas por deformación compresional que culminan en el Eoceno terminal (Fase Inca), posteriormente se produce la primera peneplanización del área (posiblemente erosionando la formación Huanca y parte del grupo Yura), sobre la cual se registra la primera gran actividad volcánica que da lugar a la formación del volcánico Tacaza (Volcanismo Andino) el cual sufrió el plegamiento y la fase de distensión del Mioceno inferior posteriormente se produce un nuevo levantamiento (Quechua 1) y luego se produce una acción erosiva fuerte que genera una superficie de erosión la cual se conoce como la superficie Puna (Mioceno Medio).

Después de ser cubierta la superficie de aplanamiento "Puna" por los materiales volcánicos, los Andes fueron levantados por la gran flexura epirogénica del límite Mioceno – Plioceno. A partir de este levantamiento distintas fases de erosión se desarrollaron en los Andes: cada una de estas etapas sucesivas de evolución geomorfológica posterior a la superficie puna fue sellada por una formación volcánica distinta con tal resultado que el volcanismo Plio-Pleistoceno sigue el ritmo de las etapas de erosión de los Andes, desarrollándose de manera general dos fases de vulcanismo:

una fase preliminar aérea (Maure - Sencca - Capillune) y una fase de estrato Volcanes (Chila - Barroso - Ubinas).

Después de la fase de levantamiento se produce una fase de erosión que fue interrumpida por la fase volcánica de la formación Maure colmando depresiones tectónicas de la última fase andina (plegamiento Pliocénico) y sobre todo cuencas de erosión consecutivas al levantamiento general de los Andes.

La actividad volcánica de este período es esencialmente piroclástica, un magma muy fluido y muy cargado de gas emitió alternadamente piroclásticos (que fueron sepultados en lagos) y sillares correlacionables con el sillar de Arequipa.

Cuando el magma salía por puntos de emisión aislados, el vulcanismo era piroclástico; cuando el magma salía por muchos puntos de emisión agrupados o por fisuras funcionando al mismo tiempo, el vulcanismo daba lugar a nubes pesadas que seguían la topografía antes de compactarse por enfriamiento (sillares).

Este vulcanismo Plioceno-Pleistoceno conocido también como vulcanismo post - andino o vulcanismo reciente se desarrolló en tres etapas: La etapa de la formación Maure que se puede interpretar como una fase volcánica que desorganizó e interrumpió la erosión en los andes, una segunda etapa que consistió en la deposición del Sencca que fueron sillares emitidos durante una gran crisis climática de erosión en los Andes y de acumulación en el pie de monte, y finalmente una tercera etapa de actividad volcánica aérea la cual descansa en discordancia erosional con el Sencca.

El vulcanismo del Pleistoceno reciente está representado por el volcánico Chila que se depositó entre la primera y segunda crisis climáticas pleistocénicas, finalizando así la fase aérea y comenzando la etapa llamada de estrato volcán.

En el Pleistoceno Medio se produce la deposición del volcánico Barroso, el cual se depositó sobre el volcánico Chila casi totalmente destruido por efecto de la segunda crisis climática, emplazándose una segunda

generación de conos que dan lugar a los relieves actuales de la Cordillera Occidental.

En el Pleistoceno Superior una colada lávica del centro Ahuashune (considerada del Grupo Ampato) represa el antiguo río Colca esto sucedió durante la cuarta crisis climática iniciándose así una sedimentación del tipo lacustrina (Grupo Colca), Figura 24.

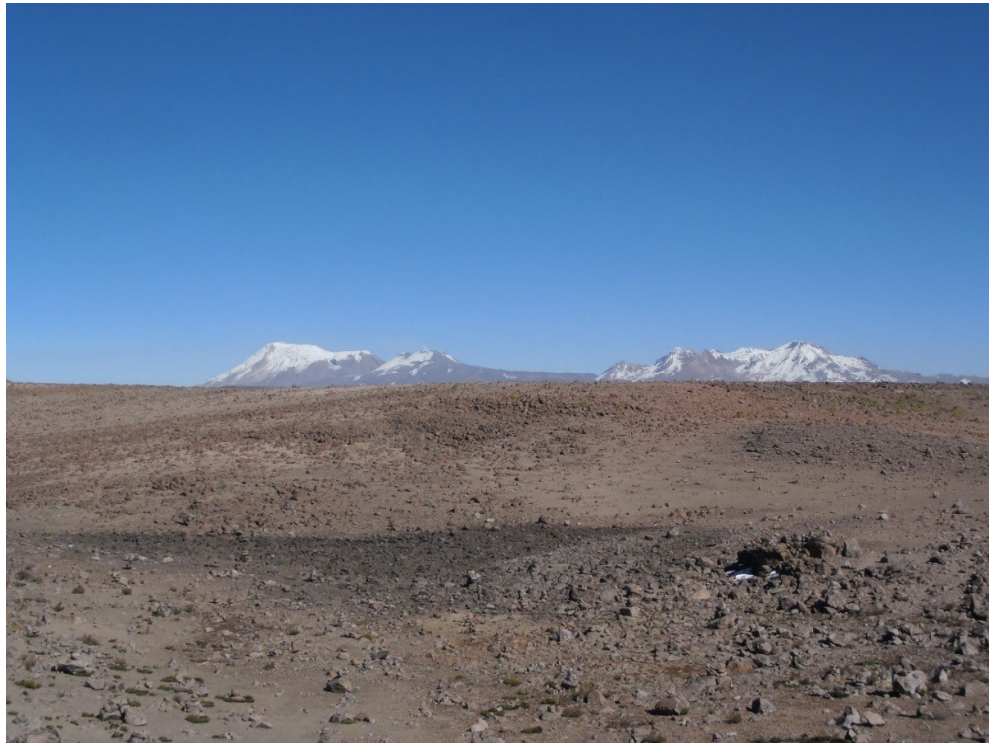


Figura 24. Complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca

La depositación de los sedimentos lacustrinos del Grupo Colca se inicia hace cerca de 1.1 M. A, coincidente con la actividad volcánica; estos sedimentos colmaron todo el valle desde Tuti hasta Pinchollo. Por otro lado cuerpos volcánicos de la formación Inca del Grupo Ampato datados con una edad aproximada de 0.28 MA. (Kaneoka y Guevara, 1984) intruyen al Grupo Colca lo cual le da un límite para la sedimentación terminal.

La actividad volcánica del Grupo Ampato continuó, con derrames lávicos que provinieron del volcán Sabancaya y del centro volcánico Ahuashune (Pleistoceno Medio) y posteriormente con los domos exógenos de Chivay (Pleistoceno Superior). Contemporáneamente a este vulcanismo localizado

de extensión limitada a los centros de emisión, en la zona del valle fueron erosionados los sedimentos lacustres (Thouret et al, 1995).

Hacia los 750,000 años (antes del presente), se inició la última y más conspicua glaciación en los Andes. Esta dio lugar al máximo desarrollo de glaciares (Hualca - Hualca), originándose lahares y flujos de escombros en los frentes de los glaciares que se deslizaron a través de las principales quebradas.

En las partes bajas y relativamente planas (terrazas de corte y relleno), se depositaron grandes cantidades de escombros, dando lugar a morrenas que represaron pequeñas lagunas (Maca). Estas micro cuencas fueron alimentadas por las aguas producto de la fusión de los glaciares en retroceso, en un contexto de intenso vulcanismo rico en sílice. Esto dio lugar a una sedimentación notable de diatomeas en un ambiente lacustre somero y de aguas tranquilas, probablemente en el Pleistoceno Superior – Holoceno, (Ubeda, 2010).

En el Reciente la zona muestra una geodinámica muy activa, ocurriendo grandes deslizamientos en las márgenes del valle, por sobresaturación de agua de enormes masas de tierra (sedimentos lacustres) que van perdiendo estabilidad por las fuertes pendientes de las laderas del valle.

4.4.2 Estratigrafía

Los afloramientos rocosos en las inmediaciones de la localidad de Madrigal, que conforma la cuenca media del río Colca, se describen a continuación (Quispevana y Navarro, 2001):

4.4.2.1 Grupo Yura

Es una serie sedimentaria marina que aflora en los márgenes del río Colca, está compuesta por intercalaciones de areniscas blanquecinas, calizas, areniscas grises, limolitas, lutitas carbonosas y cuarcitas (cuarciarenitas y ortocuarcitas), conformando 5 formaciones litológicas descritas por Benavides y citadas por INGEMMET (Klinck, et al, 1993) que son: Puente, Cachios, Labra, Gramadal y Hualhuani. En el valle del Colca afloran los tres miembros superiores y corresponden a empinadas

laderas formadas por la acción erosiva del río Colca. Sus afloramientos se observan en todo el valle al pie del río Colca y al NW del pueblo de Madrigal en donde los afloramientos corresponden a potentes capas de areniscas con intercalaciones de lutitas, Figura 25.



Figura 25. Afloramientos del Grupo Yura en la parte baja de Madrigal en inmediaciones del río Colca.

4.4.2.2 Grupo Tacaza

Serie volcánica que se manifiesta en forma de brechas y derrames (flujos) volcánicos, algunos niveles de tufos de naturaleza dacítica, y una ocurrencia de manera local de conglomerados y areniscas en forma de lentes aislados.

La brecha volcánica es del tipo andesítico que, generalmente se presenta en gruesos bancos entre 4 – 10 m de espesor, en superficie intemperizada es de color gris y en superficie fresca es de color verde azulino (Mena, 1966).

En la zona de estudio estos afloramientos se encuentran en el cerro Orana Collo donde se muestra como un afloramiento de pendientes empinadas, Figura 26.



Figura 26. En la parte media-alta de los cerros aflora el volcánico Tacaza.

4.4.2.3 Grupo Barroso

La cordillera del Barroso corresponde a una serie erosionada por la glaciación pre-Pleistocénica; de andesitas y traquitas que provienen de conos volcánicos ubicados en la cordillera del Barroso donde las tobas dominan sobre las lavas; los mantos presentan espesores de 20 – 30 m (Chávez, 2004). De acuerdo a las características litoestratigráficas comprende de abajo hacia arriba tres secuencias: Volcánico Sencca, Volcánico Barroso y el volcánico Hualca Hualca.

4.4.2.4 Volcánico Sencca

Comprende el piso del Grupo Barroso; son volcánicos de naturaleza piroclástica constituidos esencialmente por tufos lapillíticos con estratificación de 10 – 20 cm. De composición riolítica – dacítica blancos con fragmentos andesíticos, pómez y vidrio volcánico.

Macroscópicamente muestra una textura piroclástica vítrea con cristales de sanidina, plagioclasas, cuarzo y biotitas englobados en una pasta andesítica con pómez y vidrio volcánico.

Las dataciones realizadas por INGEMMET arrojan a esta secuencia una edad de 6.5 ± 0.6 MA. Se encuentra en discordancia erosional sobre el Tacaza y es correlacionable con la Formación Chachani del cuadrángulo de Arequipa (Chávez, 2004).

Los afloramientos de esta secuencia se encuentran al oeste de Maca donde se encuentra el túnel que une este distrito con Cabanaconde.

4.4.2.5 Volcánico Hualca Hualca

Pertenece al centro Mismi – Hualca Hualca del Arco Volcánico del Barroso y deriva su nombre del arco volcánico del mismo nombre. (Panitz, 2004)

Está conformado por flujos volcánicos que tienen un rango de composición que va de una riolita pasando por una andesita augítica porfírica oscura hasta una andesita basáltica interestratificada con flujos de barro.

Las andesitas son de textura porfírica de grano fino con fenos de plagioclasa cálcica con una matriz abundante máfica oscura, como secundarios contiene piroxenos y hornblendas. Los basaltos son de textura porfírica de grano fino, con escasos fenos de plagioclasa cálcica con una matriz máfica de piroxenos gris oscuro a negro, algunos de estos basaltos son de naturaleza afanítica.

El volcánico Hualca Hualca se presenta en conos volcánicos, cúpulas y bancos horizontales terminando en frentes de erosión escarpados con buena disyunción columnar formando acantilados. (Panitz, 2004)

El nevado Hualca Hualca aparentemente es un estrato volcánico erosionado. La naturaleza no vesicular de las lavas podrían considerarse como evidencia de la ausencia de volátiles disueltos que podrían normalmente indicar una erupción explosiva.

Se le correlaciona con las últimas erupciones ocurridas en Arequipa y con el miembro superior del Volcánico Sillapaca del altiplano puneño.

Según dataciones radiométricas su edad es de $0,9 \pm 0.25$ MA y sobreyace paralelamente al volcánico Sencca (Chávez, 2004)

Los afloramientos de este depósito se encuentran al sur del poblado de Maca, al igual que al frente del poblado de Madrigal, al Sur de Pinchollo, Figura 27.



Figura 27. Coladas de lavas del volcánico Hualca Hualca cubiertos por el depósito de avalancha de escombros.

4.4.2.6 Volcánico Barroso

Constituido por derrames riolíticos, riodacíticos y tufos de composición traquítica, conglomerados tufáceos blancos de flujos de barro con algunos bloques andesíticos tufáceos (Panitz, 2004).

Los derrames riolíticos son de textura porfirítica de grano medio, con fenocristales semiorientados de sanidina, cuarzo, plagioclasa sódica, hornblenda y biotita, en una pasta gris blanca. Las dacitas (riodacitas) son de textura porfirítica de grano fino, con fenocristales de plagioclasa cálcica, menor proporción de sanidina, augita, hornblenda y biotita, en

una pasta brillante gris rosáceo clara. Los conglomerados son flujos de barro moderadamente compacto con clastos y bloques de hasta 5 metros de andesitas, con una potencia de 5 metros (Nuñez, 1992).

Presenta una edad de 0.7 +/- 0.2 MA, se le correlaciona con el volcánico Sillapaca medio del Altiplano. Se encuentra en las partes más altas de la zona de estudio coronando los cerros en ambos márgenes del río Colca y es el afloramiento rocoso de mayor extensión.

4.4.2.7 Grupo Colca

Es una serie de sedimentos de naturaleza lacustre y abarca el 80% del piso del valle del Colca, comprende una secuencia de limos y arcillas, con algunos lentes de arena fina y gravas. El espesor máximo se encuentra en el poblado de Lari con 400 m aproximadamente reconociéndose tres facies (Zavala y Fidel, 1994):

- Facie aluvio-fluvial

Esta facie es una serie de cobertura con intercalaciones de abanicos fluviales compuesta litológicamente de arenisca arcósica, lentes de arenisca, conglomerados guijarrosos con matriz arenosa y conglomerados de bloques volcánicos.

La distribución de estos depósitos a manera regional indica que los ríos afluentes contemporáneos formaron abanicos aluviales durante la existencia del lago.

La presencia de lentes de areniscas se interpreta como que han sido depositados por ríos pequeños que atraviesan el abanico fluvial durante ciertos períodos del año. Se infiere que pudo deberse al primer embalse.

Los afloramientos de estas facies se encuentran principalmente en el lado sur del valle del Colca y al SSE de Maca.

- Facie Lacustrina Marginal

La facie lacustrina marginal se desarrolla en la parte E de Madrigal y en el lado sur del Valle del Colca. Se interdigita con las facies fluvial y la Facie lacustrina masiva.

Las litologías típicas son gravas guijarrosas, arenisco - tobáceas y limos laminados, los conglomerados guijarrosos son en su mayoría formada por material volcánico con clastos moderadamente bien redondeados en una matriz arenosa. Las areniscas tobáceas son de tono oscuro debido al alto contenido de material volcánico de grano grueso, con estratificación cruzada planar, festoneada y con ondulaciones entrecruzadas.

El alto contenido de material volcánico, especialmente, los guijarros de pumita indican probablemente una fuente eruptiva sinsedimentaria muy cerrada.

- **Facie lacustrina**

Esta facie se caracteriza por contener limos de color gris amarillento claro de grano muy fino. Presenta laminación a una escala de 4 mm, y muestra microondulación cruzada, deformación suave de sedimentos, pliegues volcados y sobrecorrimientos a pequeña escala entre los estratos. Estas capas ocupan la parte principal del afloramiento del Grupo Colca.

- **Depósitos clásticos recientes**

Agrupan una serie de depósitos provenientes de: flujos de lodo, acumulaciones aluviales, eluviales, coluviales, etc. conformados por clastos de diferentes grosores. Su acumulación y deposición ocurren debido a la geodinámica externa de la zona. Generalmente se encuentran rellenando depresiones, (quebradas, parte baja de escarpas, etc.)

4.4.3 Geología estructural

La geología estructural en el valle medio del río Colca está dada por los procesos tectónicos que han modelado el valle que se describe a continuación:

4.4.3.1 Tectónica

La respuesta de la red de drenaje frente a la tectónica puede resolverse mediante fuertes encajamientos o formando llanuras y terrazas fluviales.

En los sectores de la cordillera, donde la densidad de fracturación es mayor y las pendientes son más elevadas, el levantamiento tiene dos consecuencias que actúan en sentidos opuestos (Sébrier et al, 1985).

Por una parte incrementa la capacidad de incisión fluvial, de manera que durante las fases tectónicamente activas se desarrollan valles que alcanzan varios miles de metros de profundidad en los que los ríos ahondan sus cauces más rápidamente que los ensancha la dinámica de laderas. Por otro lado, favorece la ocurrencia de deslizamientos, que son relativamente frecuentes y muchas veces provocan obturaciones de los ríos. Otros procesos que tienden a canalizarse vertiente abajo, como coladas de lava, flujos piroclásticos, lahares o desprendimientos por simple gravedad también pueden tener consecuencias semejantes.

La coexistencia de la intensa incisión fluvial con los fenómenos que provocan obturaciones ha causado una secuencia cíclica de episodios de relleno y re-excavación del fondo de los valles que debe haberse sucedido con una frecuencia elevada desde el inicio del ciclo andino actual (Palacios y Klinck, 1988), Figura 28.

Dependiendo del volumen de materiales implicados y la profundidad y geometría del valle, los episodios de relleno pueden construir diques naturales que represan los ríos, formando aguas arriba lagos que en el pasado han alcanzado dimensiones considerables, como pone de manifiesto la presencia de depósitos lacustres en el valle alto del Colca (Gómez et al., 2004a).

Una vez constituidos esos embalses naturales pueden evolucionar de diferente manera. Si el levantamiento tectónico provoca una disección fluvial progresiva de los diques, el volumen represado se desagua tranquilamente alimentando el régimen ordinario del río. Sin embargo, si se produce una rotura catastrófica, por ejemplo como consecuencia de un sismo suficientemente severo, el resultado es el desencadenamiento de gigantescas avenidas hipersaturadas que tienen gran capacidad

erosiva y probablemente han desempeñado un importante papel en el encajamiento del río (Ticona et al., 2002).

El análisis de los depósitos presentes en los tramos inferiores del Colca demuestra que esos eventos pudieron haber sido relativamente frecuentes durante el Cuaternario. No obstante sus características sedimentológicas son muy parecidas a las que generan otros tipos de avenidas hipersaturadas, como los lahares, de manera que procesos con orígenes diferentes están registrados por formas y formaciones muy parecidas para distinguirlos con claridad (Gómez et al 2004b).

A diferencia de lo que sucede en las cabeceras de los ríos que disectan la cordillera y el altiplano, en los tramos inferiores que cortan la rampa que desciende hacia el Océano Pacífico, donde la morfología de los valles se ensancha y la pendiente se reduce, la red de drenaje responde al levantamiento de la cordillera formando llanuras o terrazas fluviales.

La aparición de una u otras formas depende de la relación que se establezca en cada caso entre el régimen tectónico y el déficit y el excedente sedimentario del río. Cuando la sedimentación predomina sobre el levantamiento se construyen amplias llanuras aluviales como las que aparecen en el fondo del Majes, pero cuando el balance resulta favorable al levantamiento, la respuesta a cada pulso tectónico es un episodio de excavación de la llanura aluvial, generando terrazas que finalmente quedan colgadas topográficamente sobre el nivel de base del río.

El valle del Colca ha sido sujeto a diversos procesos de geodinámica interna que ocurrieron durante el levantamiento andino. Es así que en la zona se dieron fuertes esfuerzos compresionales y tensionales que pliegan toda la secuencia mesozoica con ocurrencia de fallas que se dan durante la fase peruana, dando lugar a relieves accidentados de bloques monoclinales estructuralmente separados. Posteriormente los derrames lávicos y piroclásticos cubren toda el área ocultando las evidencias estructurales de las formaciones mesozoicas, que son solo observables en algunos casos a la acción erosiva del río Colca.

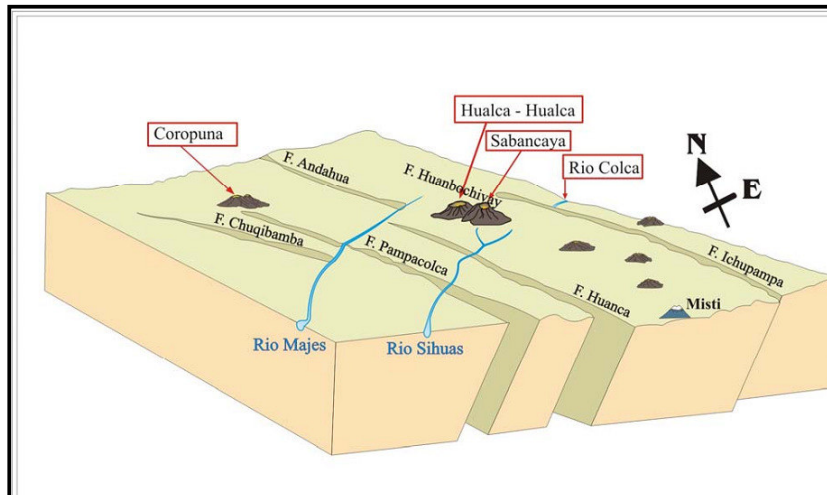


Figura 28. Esquema del marco geológico-tectónico que domina el altiplano en Perú, en particular a los complejos volcánicos Hualca Hualca y Coropuna

Los resultados de la tectónica regional se aprecian en la secuencia Mesozoica más no en el vulcanismo reciente a excepción de zonas locales como las que dieron origen a la mineralización en la zona de Madrigal. Se distinguen tres tipos de deformación:

- Deformación de la serie sedimentaria

Los esfuerzos compresivos de la Orogenia andina en sus dos fases (Fase Peruana y Quechua) dieron origen a la deformación de los depósitos sedimentarios del Grupo Yura, produciéndose fallamientos y plegamientos que han sido cubiertos en su mayor extensión por los depósitos volcánicos. Los afloramientos muestran que los esfuerzos compresivos dieron lugar a:

- Fallamientos

Como se dijo en el punto anterior la presencia de fallas ha sido oculta por los depósitos volcánicos, pero al oeste del pueblo de Madrigal se evidencian fallas normales que afectan la secuencia sedimentaria del Grupo Yura, así también en la zona de Lari en la ribera del río también se han encontrado evidencias de fallas normales en el Grupo Yura (Chávez, 2004).

En la zona de estudio la presencia de fallas se encuentran relacionadas principalmente a las que dieron origen a la mineralización a las vetas de la

Mina Madrigal, las Fallas Shiusha y Esperanza, con orientación NW - SE y un buzamiento al NE, ambas se encuentran localizadas al NW de Madrigal.

Regionalmente se puede citar al anticlinal "La Calera" de dirección axial N 100 el cual está afectado por dos hipotéticas fallas que dieron lugar a un Graben (Graben de Chivay). El Flanco Oriental expone una buena sección de esta serie en el cerro Huilcaña a la altura del poblado de Tuti, (Guillén, 1986).

- **Plegamientos**

Las mejores evidencias de estas estructuras se aprecian en el lecho del río Colca al SE del Madrigal donde se observa un pliegue anticlinal tumbado con un rumbo de N30°E y un buzamiento aproximadamente 20° al NW.

De manera regional el Grupo Yura se encuentra plegado formando el Anticlinal La Calera

- **Diaclasamientos**

Asociadas a las deformaciones anteriores tenemos todo un sistema de diaclasas que cruzan los planos de estratificación de las areniscas, estos sistemas de diaclasas se entrecruzan con dirección E-W, así como NW – SE y NE – SW aproximadamente.

También se observa diaclasamiento vertical en las areniscas producto de la incompetencia de estas rocas a los esfuerzos, estas diaclasas tienen un rumbo NE.

Las diaclasas difieren en tamaño, pueden tener desde centímetros hasta varios metros a lo largo del rumbo, el intervalo entre ellas en los verticales es de 2 a 4 cm, en cambio en los horizontales varía hasta en 1-2 metros.

- **Deformación de la serie volcánica**

Se encuentra asociada a los procesos orogénicos como consecuencia del levantamiento de la Cordillera de los Andes y a los procesos de mineralización asociado al vulcanismo a nivel regional (Huamán, 1995).

Las andesitas han sufrido un intenso fracturamiento formando bloques sueltos así como también se evidencia disyunción columnar característico de estos depósitos lo cual es observado en diferentes lugares del valle.

- **Deformación de la cobertura Cuaternaria**

En los depósitos aluvio-coluviales se presentan grietas y suturas relacionadas directamente con los deslizamientos que han ocurrido a lo largo del valle del río Colca los mismos que serán descritos más adelante.

En los depósitos lacustrinos hay algunos ejemplos de slumps que se desarrollan en los horizontes arcillosos y areno-arcillosos, que se tipifican como estructuras “sinsedimentarias” ya que se han plegado durante la etapa de sedimentación por movimientos oscilatorios, también se presentan estructuras de estratificación entrecruzada que afecta a horizontes limosos, arenas gruesas y horizontes de gravillas, algunos de los cuales presentan restos de diatomitas. Estas estructuras son producidas por efectos de movimientos de cambio de intensidad de corriente de depositación (Huamán et al, 1993).

En la región del Colca, desde que terminaron de depositarse los materiales lacustres, siempre ha estado en movimiento, habiendo ocurrido los más diversos tipos de inestabilidad de laderas, tales como: deslizamientos, solifluxiones, flujos plásticos, etc.

4.5 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En este ítem se describe la geomorfología y litología local del área estudiada.

4.5.1 Unidades morfológicas

Durante los procesos geomorfológicos se da origen a una variedad y complejidad de formas en la superficie terrestre a las que se denomina unidades geomorfológicas, modeladas de acuerdo a las condiciones existentes en la zona.

La identificación y clasificación de unidades geomorfológicas están condicionadas a la escala o extensión de la zona de estudio a la que se le aplicará un análisis geomorfológico. De acuerdo a la escala local de análisis de las geoformas, se clasifican en, Plano 05:

- **Unidad Laderas:** se subdivide en dos:
 - Laderas de Cadenas Montañosas: Son geoformas de carácter destructivo producidas a partir de los procesos erosivos a los que ha sido sujeto el Volcánico Barroso produciendo caída de material y generando a su vez la formación de laderas empinadas, Figura 29.

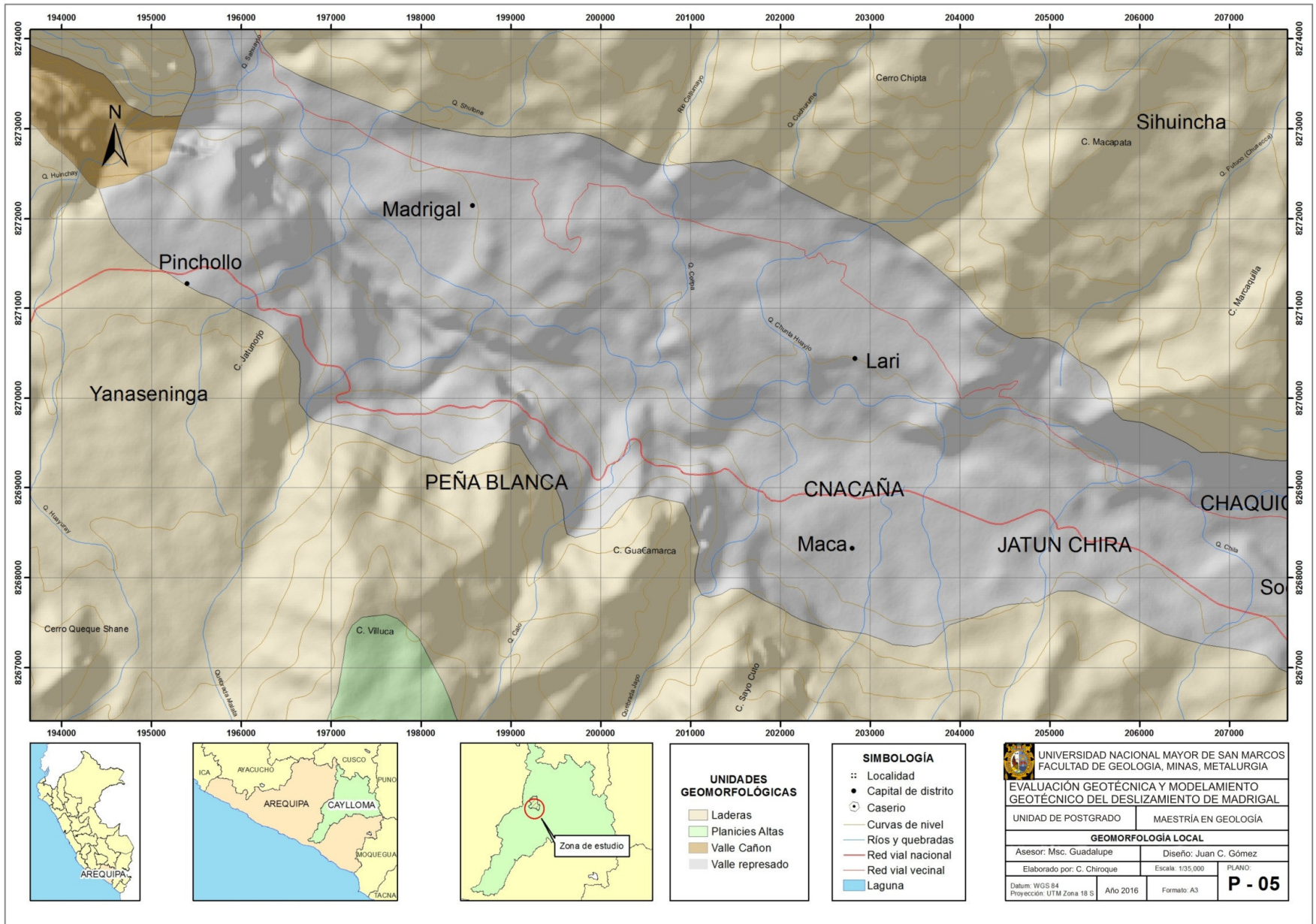




Figura 29. Laderas de montaña en las inmediaciones de Madrigal.

- Laderas: Este segundo tipo de laderas son relativamente más jóvenes que las antes mencionadas, se han formado por efecto de la acción conjunta de la geodinámica externa e interna más reciente.
- **Unidad Valle represado:** Abarca las localidades de Madrigal, Lari, Maca, Pinchollo, Peña Blanca entre otros caseríos, contiene las siguientes geoformas:
 - Zonas de Deslizamientos. Son laderas formadas por material deslizado de los movimientos en masa que han tenido lugar por efecto combinado de la geodinámica interna y externa.
 - Colinas: Se han originado por la depositación de un flujo de lodo Holocénico de composición volcánica, es una unidad morfológica con amplitudes menores a 100 metros y con pendientes menores a 15 %.
 - Morros: De acuerdo a sus características de relieve se les ha subdividido en 2 tipos:

- Morro Tipo I.- Moldeado en roca volcánica, presenta disyunción columnar, con crestas angulosas propios de la erosión ocasionada en material volcánico, los tipos de valle formado son cerrados y encajados.
- Morro Tipo II.- Difiere del Morro tipo I en su aspecto físico, presenta crestas más redondeadas, formando valles abiertos y bajas pendientes, se ha formado a partir de los procesos erosivos a los que han sido sometidos los depósitos lacustrinos
 - Llanura de Inundación: Son los depósitos dejados por el río Colca a lo largo de todo su cauce, se les considera como geoformas temporales por ser dependientes del comportamiento del río.
- Terrazas. Se han formado como parte del proceso de evolución del valle, las distintas crecidas de los ríos ocasionadas por las crisis climáticas ocurridas durante el Pleistoceno dieron como resultado la formación de varias generaciones de terrazas. De acuerdo a la pendiente en la que se encuentran localizadas se les ha subdividido en terrazas horizontales, terrazas de mediana pendiente y terrazas de fuerte pendiente, Figura 30.



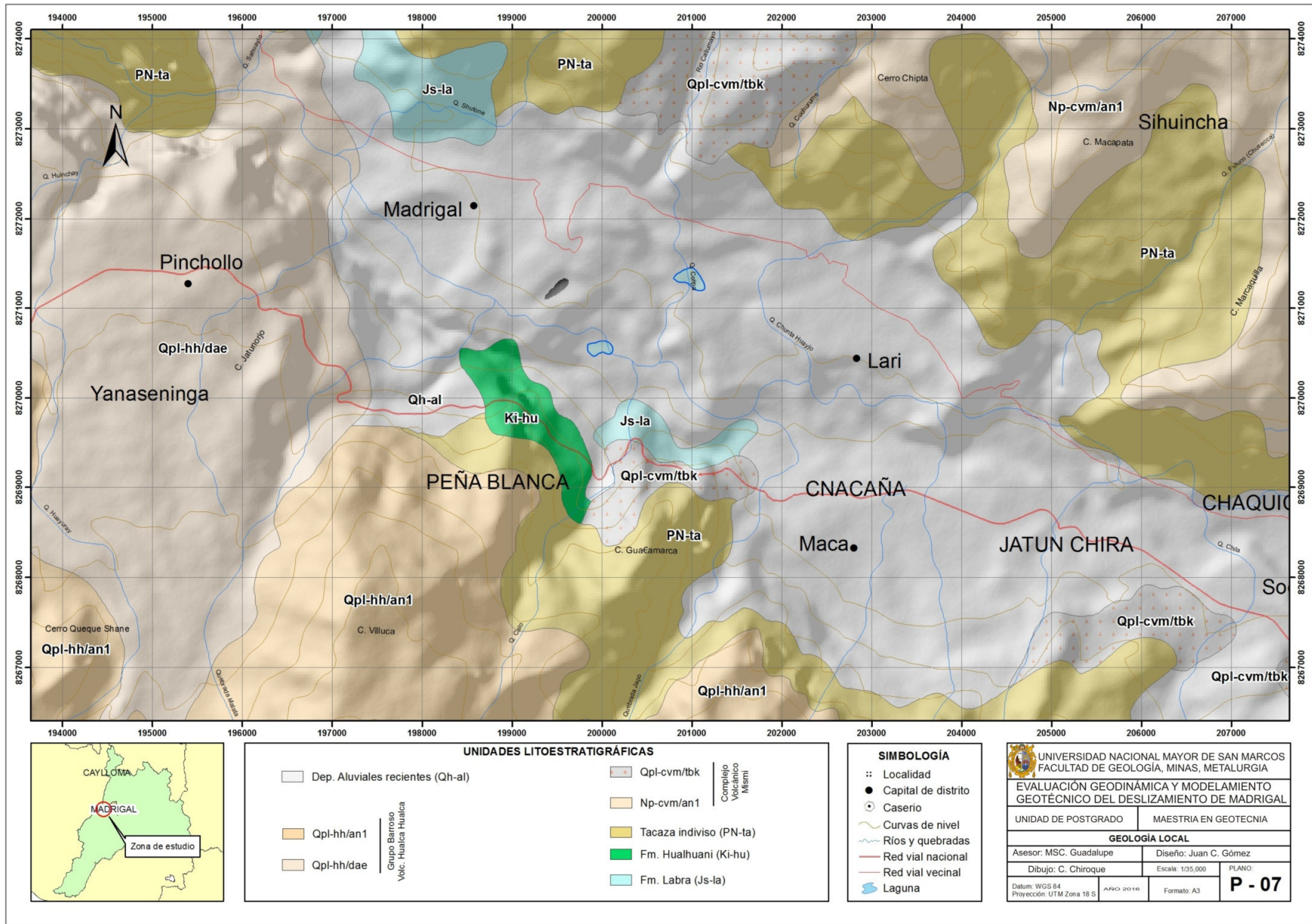
Figura 30. Zonas de terrazas aledañas al río Colca.

Unidad Planicies Altas: Esta geoforma se desarrolla por encima de los 3500 msnm en donde se ha formado una penillanura de erosión que limita con el valle represado.

Unidad valle cañón: Se desarrolla a partir del límite occidental de Madrigal que coincide con la Quebrada Sahuayco en dirección oeste, donde a la altura de Cabanaconde llega a un desnivel de hasta 1300 m entre la parte media del valle y el curso del río Colca.

4.5.2 Unidades litológicas

En base a los estudios de campo se han podido localizar tres grupos de afloramientos en el área de Madrigal y alrededores: rocas sedimentarias de edad Mesozoica, rocas volcánicas de edad Cenozoica y depósitos recientes, plano 07:



4.5.2.1 Rocas sedimentarias Mesozoicas

La conforman los depósitos sedimentarios del Grupo Yura, consistentes en bancos de areniscas grises blanquecinas con alto contenido de cuarzo intercaladas con lutitas marrones a gris oscuras en superficie fresca. Destacan los afloramientos de las formaciones Hualhuani y Labra. La primera aflora al SE de Madrigal en las inmediaciones de Piedra Blanca y la segunda aflora al NW de Madrigal en las inmediaciones de la mina del mismo nombre y también al SE por el caserío Chacaña, Figura 31.



Figura 31. Afloramientos de origen sedimentario del Grupo Yura en las inmediaciones del río Colca.

4.5.2.2 Rocas volcánicas Cenozoicas

En este grupo se encuentran los afloramientos del volcánico Tacaza indiviso que predomina en la zona, el Complejo Volcánico Mismi, que aflora en la parte alta de la margen derecha del río Colca y del Grupo Barroso los cuales conforman las laderas al norte del distrito de Madrigal.

Los afloramientos del Grupo Tacaza consisten en andesitas de color pardo rojizo en superficie intemperizada y gris oscura en superficie fresca, en tanto que el Grupo Barroso se denota en unos afloramientos hipovolcánicos al este de Madrigal con algunos fenocristales de plagioclasa, Figura 32.



Figura 32. Afloramientos del volcánico Tacaza indiviso en la parte media de Madrigal.

4.5.2.3 Depósitos Aluviales Recientes

Se agrupa bajo esta denominación a aquellas masas que no han sido consolidadas y que se encuentran en las terrazas del valle generalmente. En la zona de Madrigal a diferencia de Maca y Lari, existen depósitos de avalancha de escombros provenientes del Nevado Hualca Hualca, Figura 33.



Figura 33. Depósitos aluviales conformando terrazas bajas en Madrigal.

4.5.2.4 Depósitos de Avalancha de Escombros

Se encuentran en diferentes zonas de Madrigal y abarca hasta los límites con Lari. Se muestran bajo estructuras en hummocks y están constituidas con material arrastrado del otro flanco y que por la velocidad con la que se produjo han ascendido hasta el otro lado del valle. Debido a la distancia entre el volcán Hualca Hualca y el distrito de Madrigal los depósitos de avalancha presentan granulometría fina, Figura 34.

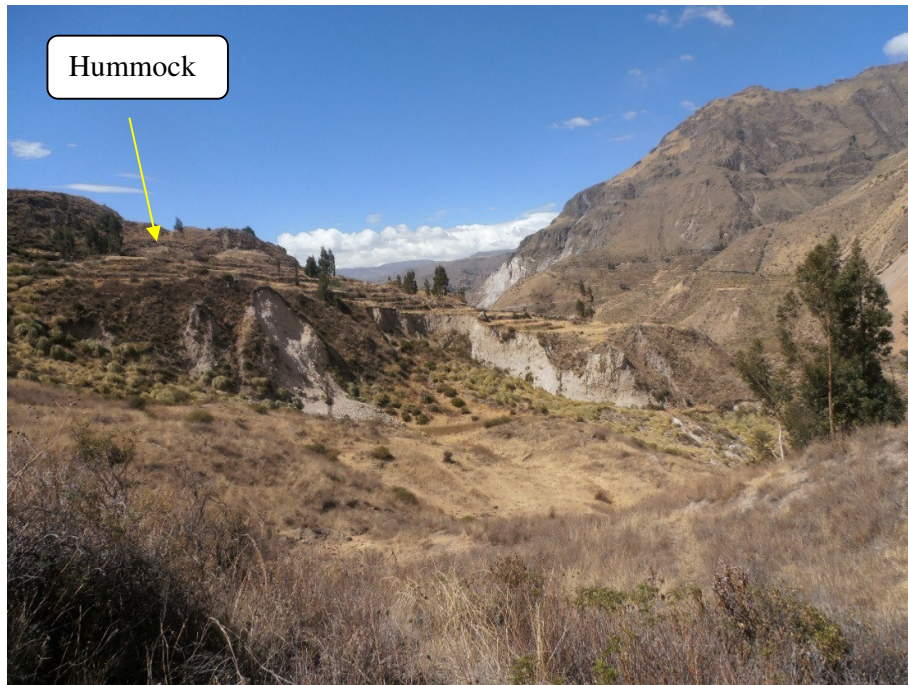


Figura 34. Depósitos de avalancha de escombros conformando colinas tipo hummocks en la parte media de Madrigal.

4.5.2.5 Depósitos Lacustrinos

Corresponden a la facie marginal del paleolago y consiste en una secuencia de gravas y arenas intercalados con capas de limos. La coloración es beige clara y aflora al este del pueblo de Madrigal, Figura 35.

La estratificación de este depósito es plano, paralela, con variedad de espesores. Esta facie indica que recibió aportes de agua provenientes de la quebrada Punco y podría estar dentro de un abanico fluvial.



Figura 35. Depósitos lacustrinos afloran parte baja de Madrigal en inmediaciones de río Colca.

CAPÍTULO V

GEODINÁMICA EXTERNA

La geodinámica en el distrito de Madrigal se evidencia por la presencia de los movimientos en masa que afectan la seguridad física de esta localidad.

5.1 AREAS AFECTADAS POR DESLIZAMIENTOS

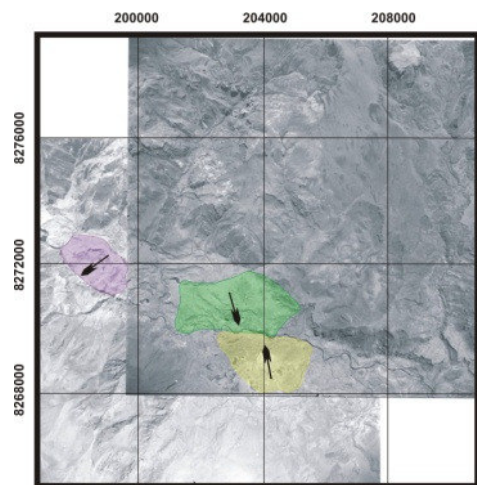
Para estimar las áreas afectadas por deslizamientos el IGP realizó un estudio para los tres deslizamientos activos en el valle del río Colca: Maca, Lari y Madrigal, mediante fotointerpretación de fotos aéreas multi-temporales (Gómez, 2010).

Para este fin se elaboraron mosaicos de fotografías aéreas multi-temporales de la zona de los deslizamientos activos de Lari, Maca y Madrigal.

Se utilizaron fotos aéreas 1/15,000 de vuelos PETT de 1997, también fotografías del año 1973 y 1955 del SAN (Servicio Aerofotográfico Nacional) a escala 1/30,000 y 1/60,000 respectivamente..

Previo al trabajo de fotointerpretación, las fotografías aéreas fueron ortorectificadas mediante el software ORTHOBASE de ERDAS IMAGINE, el cual requiere como punto de partida, las fotografías aéreas en formato digital (TIFF), un modelo de elevación digital de la zona y puntos de control en el terreno. Asimismo, se realizó la georeferenciación de las fotografías aéreas en coberturas temáticas que permitieron comparar sus áreas en las diferentes escalas de las mismas. Esto se realizó utilizando el programa SIG MAPINFO.

Del análisis realizado se determinó que el área total de deslizamientos se incrementó en 1.4 km entre 1955 y 1997, en el caso particular de Madrigal el incremento fue de 0.6 km², tal como puede observarse en la Figura 36.



Proyección Transversal Mercator UTM Zona 19.
Unidades: Metros.

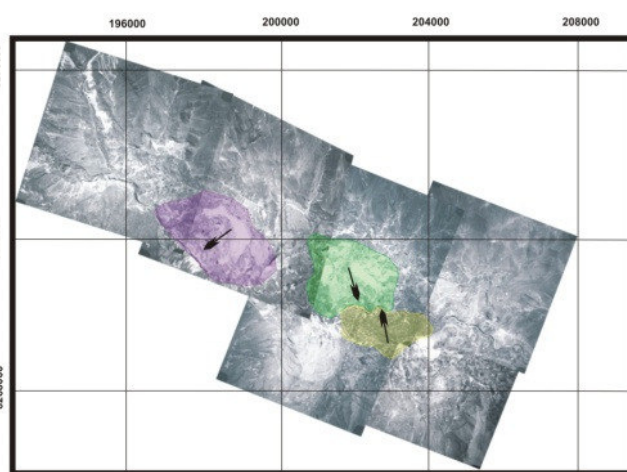


Año 1955

(A)

Deslizamiento Madrigal

Año	Perímetro (km)	Area (km ²)
1955	4.1	3.2
1973	4.5	3.5
1997	5.0	3.8
Variación 1955 - 1997	0.9	0.6



Proyección Transversal Mercator UTM Zona 19.
Unidades: Metros.

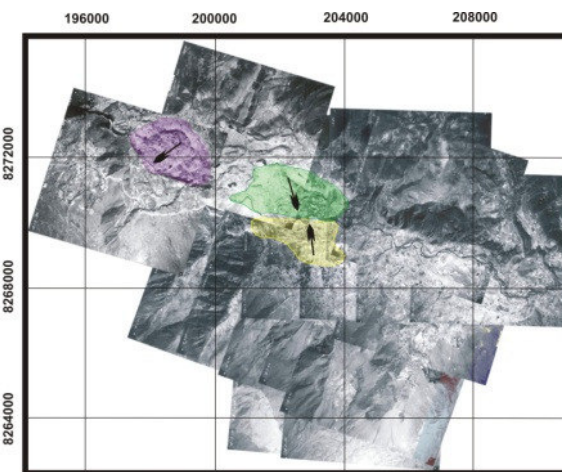


Año 1973

(B)

Deslizamiento Lari

Año	Perímetro (km)	Area (km ²)
1955	7.2	4.6
1973	7.6	4.8
1997	8.0	5.0
Variación 1955 - 1997	0.8	0.4



Proyección Transversal Mercator UTM Zona 19.
Unidades: Metros.



Año 1997

(C)

Deslizamiento Maca

Año	Perímetro (km)	Area (km ²)
1955	5.1	3.8
1973	5.4	3.9
1997	6.0	4.2
Variación 1955 - 1997	0.9	0.4

Figura 36. Fotointerpretación multi-temporal período 1955-1997 de los deslizamientos activos del Valle del Colca

5.2 ESTIMACIÓN DE ÁREAS INESTABLES

El 60% del área urbana-rural del distrito de Madrigal está afectado por los movimientos en masa activos que afectan la seguridad física de esta localidad.

5.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN MADRIGAL

Los procesos de remoción en masa en Madrigal se iniciaron, de acuerdo a investigaciones anteriores, en el año 1959, luego de un fuerte sismo, ocurrieron derrumbes en la escarpa principal del deslizamiento (García, 1966). En el año 2009, se reconoce en Madrigal grandes deslizamientos reactivados por sectores debido a las actividades antrópicas, como terrenos de cultivo y canales de regadío en el cuerpo del deslizamiento (Zavala et al. 2009).

6.3.1 Tipos de remoción en masas en Madrigal

Los dos deslizamientos cartografiados en el área del distrito de Madrigal: Ushina y Pullhuay son del tipo rotacional. Presentan un salto promedio de 20 a 25 m, son reconocibles en campo hundimientos en el terreno y agritamientos en materiales poco compactos. Ocupan un área de aproximadamente 120 has y la escarpa principal tiene 2100 m de longitud, Plano 7b.

5.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA EN MADRIGAL

Una de las características de estos deslizamientos es que su dinámica no es uniforme en toda el área desestabilizada. En la zona de desprendimiento se desarrollan movimientos en masa en dirección paralela a la escarpa principal. En la zona de acumulación, existe una dinámica de compresión, que se muestra en la gran cantidad de grietas existentes en el depósito del deslizamiento. Producto de estas actividades se desarrollan los slumps en dirección paralela a la escarpa del deslizamiento.



PLANO 7-B: Plano geodinámico de Madrigal

Las lagunas y oconales siguen una dirección paralela a la escarpa principal, resaltando que existe una zona de depresión entre la zona de desprendimiento y la zona de acumulación en el cuerpo del deslizamiento.

5.5 CAUSAS DE LA INESTABILIDAD

La presencia de depósitos lacustres inconsolidados, filtraciones y oconales, socavamiento del río Colca y mal uso del agua de regadío son los principales factores desencadenantes de la reactivación del movimiento, y al no haberse realizado obras de estabilización se determina que el problema es latente.

Por tanto son dos factores importantes que definen la inestabilidad en la zona de Madrigal: el factor sísmico y las actividades antrópicas.

CAPÍTULO VI GEODINÁMICA INTERNA

6.1 COMPLEJOS VOLCÁNICOS Y ACTIVIDAD SÍSMICA

El área de estudio se encuentra enmarcada por dos complejos volcánicos: La Cordillera Volcánica del Chila y el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca que pertenece al Arco Volcánico del Barroso; ambos forman parte de la Franja Volcánica Genozoica de la Cordillera Occidental.

6.1.1 Complejo volcánico del Chila

El complejo volcánico del Chila se encuentra ubicado en el margen derecho del río Colca aproximadamente a 20 km. del poblado de Maca, presenta una orientación general E - W y está conformado por los nevados Mismi, Quehuisha y Sepegrina; a diferencia del complejo Volcánico Hualca Hualca, este complejo volcánico llamado también Cordillera del Chila no presenta evidencias de actividades volcánicas recientes, pero si hay evidencias de actividades Holocénicas, en ese período el edificio volcánico del Chila fue casi totalmente destruido por la erosión del Pleistoceno antiguo y sobre todo de la segunda crisis climática.

6.1.2 Complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca

Este es uno de los mayores complejos volcánicos de la región sur del Perú, y está formado por los volcanes Nevado Hualca Hualca de 6020 m.s.n.m (Zona Norte), Sabancaya de 5976 m.s.n.m (zona centro) y Nevado Ampato de 6280 m.s.n.m (Zona Sur), todos distribuidos de Sur a Norte, entre las localidades de Huanca y Cabanaconde (provincia de Caylloma, departamento de Arequipa). Este complejo Volcánico se localiza a 80 Km. aproximadamente en dirección Nor - Oeste de la ciudad de Arequipa, siendo su actividad desde inicios de la llegada de los españoles (siglo XVI) así como consta en diversos manuscritos de la época. (Panitz, 2004)

Desde entonces, no se había tenido ninguna noticia de actividad volcánica hasta 1981, donde las primeras señales de reactivación del volcán fueron dadas por los habitantes de las localidades de Cajamarca y Huacachiguero, situados al pie del volcán. Posteriormente, en 1985 se incrementó la emisión de fumarolas y de ruidos que hasta entonces eran poco frecuentes, debido a ello los habitantes no le dieron mucha importancia hasta 1986.

A inicios de noviembre de 1986, el volcán Sabancaya, ubicado en la parte central del complejo volcánico, inicia una actividad fumarólica intensa con la consecuente emisión de gases que alcanzaron alturas de 500 y 1000 metros siendo visible a varios kilómetros, hecho que provocó alarma en los habitantes de Chivay y Cabanaconde. La actividad fumarólica fue disminuyendo paulatinamente hasta mediados de 1987, donde nuevamente se incrementó afectando a los habitantes de las localidades más cercanas con gases y fumarolas cada vez más frecuentes. Durante 1989, la actividad volcánica del Sabancaya se mostró menos frecuente y en Mayo de 1990, el volcán pasa una fase explosiva caracterizada por emisión de cenizas y caída de rocas que llegaron a cubrir un área de 10 km² acompañados de ruido y sismicidad local.

A partir de 1993, la erupción del Volcán Sabancaya decrece paulatinamente, llegando a presentarse únicamente emisiones de fumarolas en forma esporádica acompañadas con sismos de magnitudes bajas. Las emisiones esporádicas de fumarolas, pueden ser observadas hasta la actualidad.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA

Las características de la actividad sísmica ocurrida en la región del volcán Sabancaya (RVS), ha sido analizada y discutida principalmente por investigadores del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (IGUNSA). Para tal fin, el IGP utilizó información sísmica obtenida de tres redes sísmicas locales que operaron entre los años 1990-1995 y durante 15 días del mes de Julio del 2002. El IGUNSA realizó el análisis de la

actividad sísmica de la RVS a partir de información obtenida de 3 estaciones sísmicas portátiles que funcionaron esporádicamente durante los años 1990-1994.

6.2.1 Sismicidad histórica e instrumental

La vigilancia sísmica del volcán Sabancaya fue realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) de manera ininterrumpida durante los periodos comprendidos entre los años 1990-1992, 1993-1995 y durante 15 días del mes de Julio del año 2002 con 3 redes sísmicas locales. La primera red sísmica estuvo compuesta por 6 estaciones (1990-1992); la segunda por 3 estaciones (1993-1995) y la tercera por 4 estaciones respectivamente (2002).

Si se realiza una comparación con la distribución de los sismos ocurridos durante los períodos Julio-Setiembre de 1990 y Mayo-Junio de 1991, se observa que toda la sismicidad se ubica sobre Pampa Sepina; es decir, al NE del volcán Sabancaya. En las proximidades del volcán Sabancaya no se habría producido sismos. En función de la distribución espacial de los sismos, los autores sostienen que los epicentros describen una tendencia migratoria en el tiempo y que se iniciaría en Pampa Sepina (Figura 37a) para luego llegar frente a las localidades de Layuni, Huituhuasi y Visconaja (Figura 37b). Para explicar esta tendencia, los autores muestran la sismicidad en la zona de Pampa Sepina (Figura 37c).

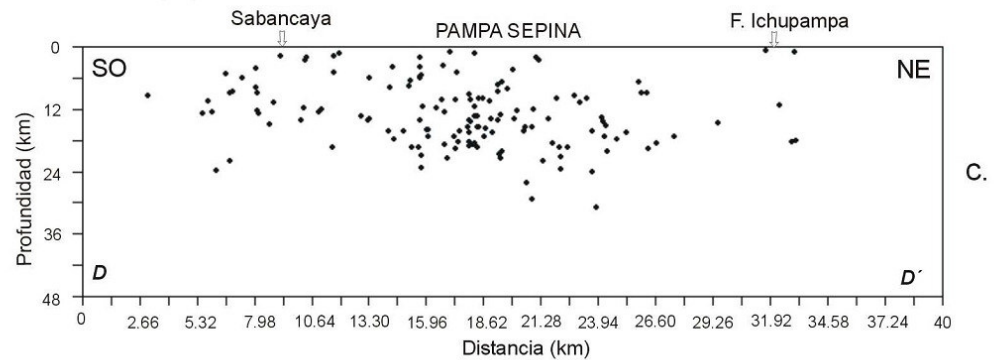
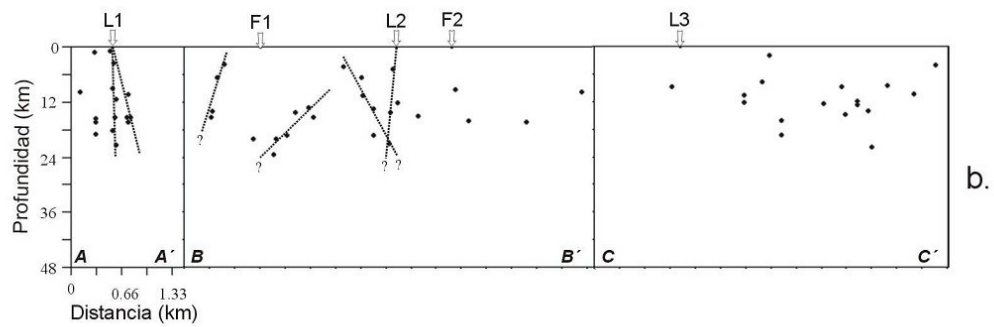
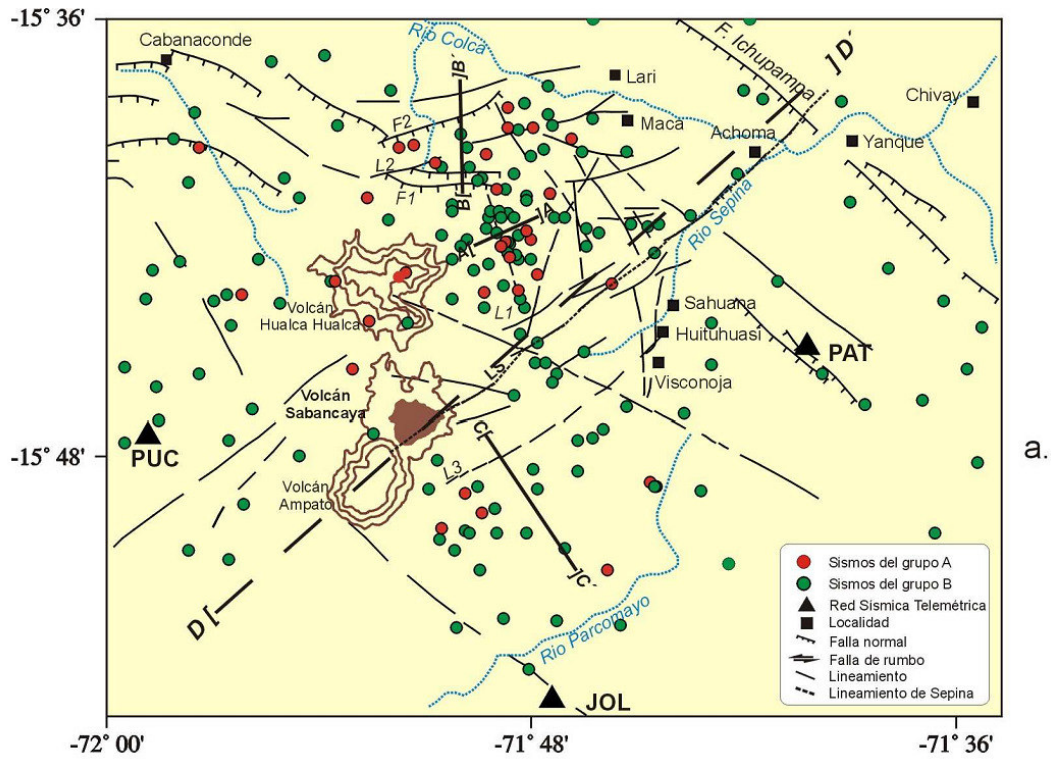


Figura 37. A) Caracterización tectónica del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y el valle del río Colca. B) Perfil sísmico mostrando alineamientos estructurales en profundidad. C) Distribución de epicentros en inmediaciones de Pampa Sepina.

6.3 EVALUACION DE PARÁMETROS SÍSMICOS

6.3.1 Aceleraciones máximas

En base al mapa de zonificación sísmica del año 1997, utilizado para la Norma Sismoresistente 030, indica que el área de estudio se ubica en la zona 3. Este mapa de zonificación sísmica considera las condiciones regionales de sismicidad que engloban a todos los parámetros sísmicos significativos como son la ubicación de los focos sísmicos, trayectoria de recorrido de las ondas, distancia epicentral y energía liberada, todos contenidos y definidos en términos de la aceleración del suelo producido por los sismos y que son medidos sobre roca o terreno firme; a lo que se agregan las amplificaciones que sufren las ondas sísmicas por las condiciones locales.

Según el mapa de zonificación, la zona 3 corresponde a aquellas áreas en donde el potencial sísmico es alto debido a que es afectada por la ocurrencia de sismos de magnitud elevada ($M > 7.0$) que producen aceleraciones mayores a 300 cm/seg². Estas aceleraciones máximas se esperan en la zona de estudio en caso ocurriera un sismo severo.

6.3.2 Coeficientes sísmicos (g)

La aceleración del suelo y su intensidad en un punto cualquiera, es función del tamaño del terremoto (magnitud o energía liberada), la distancia epicentral y del tipo de material o estructuras en las cuales las ondas sísmicas se propagan. Este último factor es caracterizado por los coeficientes de la ecuación de atenuación, siendo esta utilizada para estimar los valores de aceleración máxima en cualquier punto del área de interés. En el presente estudio se utiliza la ecuación de atenuación de la aceleración definida para el Perú por Casaverde y Vargas (1980), y que fuera obtenida a partir de registros de aceleración (componentes horizontales) de 10 sismos ocurridos en la zona de subducción de la región central y registrados en estaciones que estuvieron instaladas en Lima y alrededores (Alva 2005). Se trabaja con los valores de aceleración máxima

esperada en gals (cm/seg²) para 100, 150, 200 y 500 años en el punto medio de la zona de estudio, en este caso Madrigal, con un 10% de excedencia.

En general, en los diseños de ingeniería es necesario considerar que una estructura está sujeta a una aceleración efectiva la cual puede ser menor hasta en un 35-40% de la aceleración máxima. Por ejemplo, Huaco (1981) considera que la aceleración efectiva en un rango útil viene dada por la siguiente relación: $a_c = 0.63 a_{max}$ donde, a_{max} es la aceleración estimada en los estudios de peligro sísmico como en este caso. Sin embargo, esta reducción de la aceleración máxima es solo referencial ya que los valores reales de diseño deben ser decididos después del análisis detallado sobre las condiciones del suelo y características físicas de la obra. Los valores de aceleración estimados en este estudio para la zona de interés son coherentes con el alto nivel de sismicidad presente en el área de estudio. Para periodos de retorno menores a la centena de años, los valores de aceleración son menores a 300 cm/seg²; por lo tanto, de acuerdo a la Norma Técnica 030 para construcciones sismo-resistentes se ha considerado el valor de 0.23g para los análisis pseudoestáticos en la zona de estudio.

CAPÍTULO VII

INVESTIGACIONES EN EL SUBSUELO

El desarrollo de la investigación contempló la aplicación de métodos de geofísica aplicada, en particular, la resistividad eléctrica, con el objetivo de determinar la profundidad del nivel freático en la zona e indirectamente la estratigrafía del subsuelo. Estos son métodos indirectos no invasivos en el terreno del área estudiada.

7.1 INSTRUMENTAL

Se ha utilizado un resistivímetro de tierra PR1 AM, serie 34, de tecnología Suiza-Francesa del Instituto de Geofísica de la Universidad de Lausanne Suisse, que comprende un Miliamperímetro de precisión con un dispositivo de inversión periódica y automática de la corriente: un Milivoltímetro con un amplificador de impedancia de entrada elevada, complementado con un filtro de paso, que permite realizar medidas precisas de 0.1 a 1V, aún en condiciones de ruido elevado, Figura 38.

Las medidas de Intensidad de corriente (I) y las medidas de caída de Potencial ΔV se leen directamente del aparato.

Fuente de poder de corriente continua batería de 12 voltios

Cuatro carretes de cables , cinco electrodos de acero inoxidable, tres combas, brújula , GPS, winchas multitester, cintas aislantes, alicates, marcadores, pinzas cortantes y otros accesorios.



Figura38. Equipo de resistividad eléctrica utilizado en Madrigal

7.2 TRABAJO DE CAMPO

Los trabajos se programaron en base a la información geológica e hidrogeológica existente, aplicando el método de resistividades, previamente se realizó un reconocimiento geológico – geofísico de la zona de trabajo a fin de detectar anomalías superficiales.

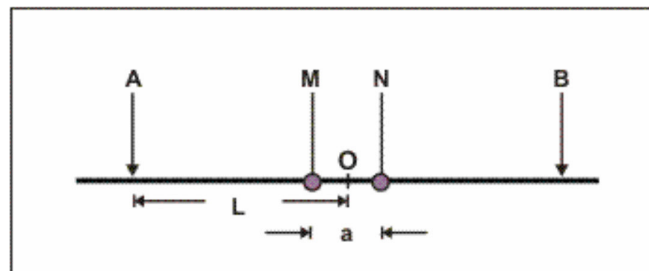


Figura 39. Dispositivo Schulemberger

La exploración geoelectrica se lleva a cabo por la técnica de S.E.V, para ello se utiliza los dispositivos simétricos denominados Schulemberger como se observa en la Figura 39.

En el dispositivo **SCHLUMBERGER** la distancia MN es pequeña en relación con AB, Figura 40.

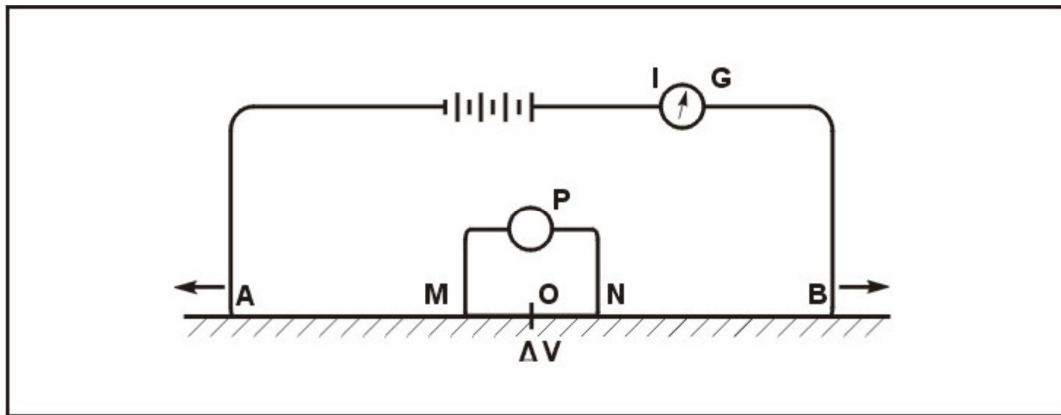


Figura 40. Dispositivo tetraédrico Schlumberger

Las separaciones $AB/2$ empleadas en el revelamiento de los S.E.V fueron los siguientes: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 50, 70, 70, 100, 125, 150, 200. m. Las separaciones de los electrodos MN de medida (caída de potencial) va de 0.5, 1, 5, 10, 20. Ver en la hoja de campo la distribución de las medidas de los electrodos.

7.3 OPERACIONES DE CAMPO

Se realizaron las pruebas de S.E.V, en cada punto asignado en estudio, se efectuó empleando la configuración electrónica del dispositivo Schlumberger que son dispuestos de manera simétrica y lineal respecto al centro de origen o estación del punto, los valores obtenidos de I , ΔV , son anotados y calculados de inmediato la resistividad aparente (ρ_a) que es graficado en una hoja bilogarítmica, llamada Hoja de campo, con el fin de seguir el desplazamiento suave de variación de la curva en forma ascendente, descendente, con la finalidad de evitar medidas falsas, se prosigue hasta que sea necesario la profundidad de investigación o falta de área accesible para desplazarse, Figura 41.

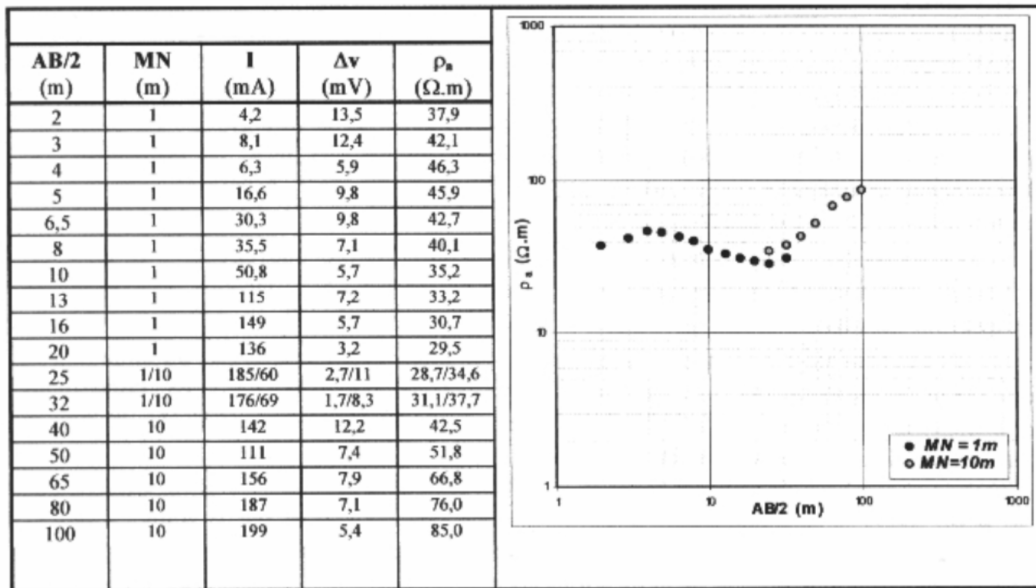


Figura 41. a) Variables para el cálculo de ρ_a b) Variación de ρ_a en función de AB/2

Los valores de resistividad aparente corresponde al eje de las ordenadas, y la distancia de AB/2 en el eje de las abscisas. Los ensayos de SEV están distribuidos de la siguiente manera, en los dos deslizamientos principales en Madrigal, Figuras 42 y 43 y Cuadros 4 y 5.

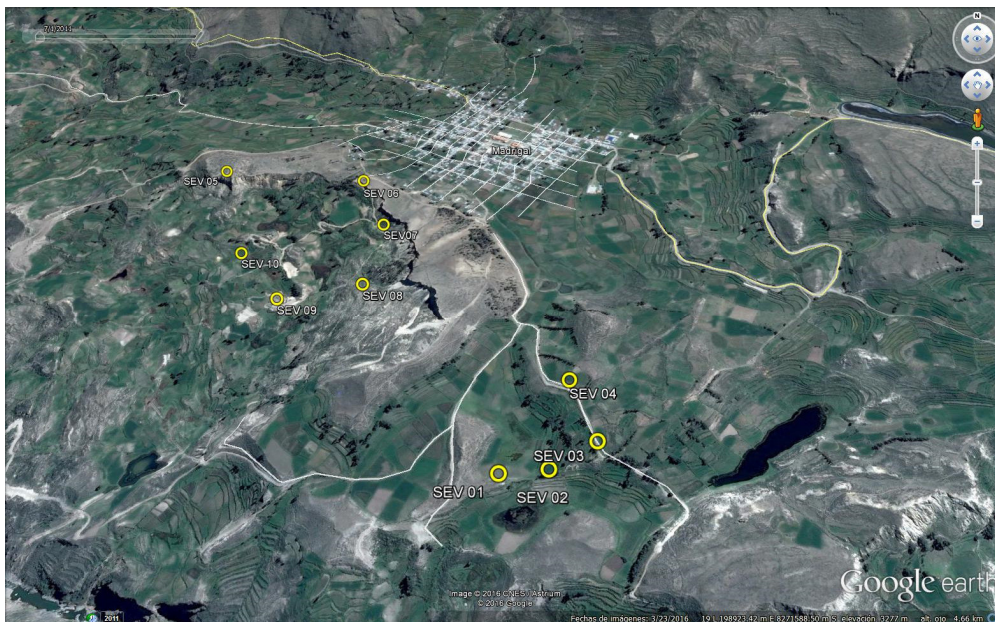


Figura 42. Ubicación de los 09 SEV realizados en Madrigal



Figura 43. Toma de datos de resistividad eléctrica en campo

Cuadro 4. Ubicación de SEV en Deslizamiento de Uchina

SEV	ESTE	NORTE	COTA
SEV 01	198916	8271090	3,264
SEV 02	199019	8271101	3,270
SEV 03	199121	8271159	3,302
SEV 04	199070	8271331	3,300
SEV 05	198060	8272255	3,276

Cuadro 5. Ubicación de SEV en deslizamiento de Pulhuay

SEV	ESTE	NORTE	COTA
SEV 06	198492	8272186	3,284
SEV 07	198575	8271981	3,256
SEV08	198548	8271731	3,249
SEV09	198319	8271716	3,209
SEV10	198175	8271919	3021

7.4 PROCESAMIENTO

El análisis de los datos obtenidos de los 10 SEV, se efectuó identificando tipos de curva obtenidos a fin de observar la variación lateral de estructuras y otras anomalías presentes.

Posteriormente se procedió al análisis cuantitativo, para lo cual se utilizó el software Ipi2win, desarrollado a partir de la teoría descrita.

La interpretación cuantitativa de las curvas de los SEV brinda como resultado el corte geoelectrico en cada punto investigado, se efectúa según la metodología antes indicada, obteniéndose como resultado final los modelos de gráficos de Interpretación de los SEV. Este análisis determina la resistividad verdadera y, los espesores de los diferentes horizontes que se logra determinar por el tipo de curva.

7.5 INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS

Los resultados son interpretados desde dos enfoques (Lakuboski y Likova, 1980):

- Interpretación cualitativa: Consiste en la comparación de sondajes por la forma de las curvas de pa y en la representación de las leyes espaciales de la distribución de sus diversas características en forma de mapas de isoresistividades que permitirán:
 - a) Obtener una idea general de la estructura geológica de la zona investigada, es decir de la localidad de Madrigal.
 - b) Caracterizar cualitativamente la conducta del horizonte eléctrico de apoyo y por consiguiente identificarlas formaciones desde un punto de vista práctico.
 - c) Obtener las características cualitativas de las variaciones de facies de los diversos horizontes dentro de los límites de las zonas investigadas (por ejemplo aumento de la fracción arenosa, zona de fracturación, etc.).

- Interpretación cuantitativa: Esta se realiza con el fin de determinar los parámetros del corte geoelectrico, espesores y resistividades de los horizontes que forman el corte, así como la profundidad a que yacen.

7.5.1 Interpretación Cualitativa

En el perfil AA' de los SEV01, SEV02, de acuerdo a los datos de campo, las resistividades aparentes de los SEV, muestran isoresistividades desde la superficie valores altos y a medida que se aumenta la distancia de AB/2, la isoresistividades disminuyen, la humedad se concentra en los 60 metros de profundidad, Figura 44.

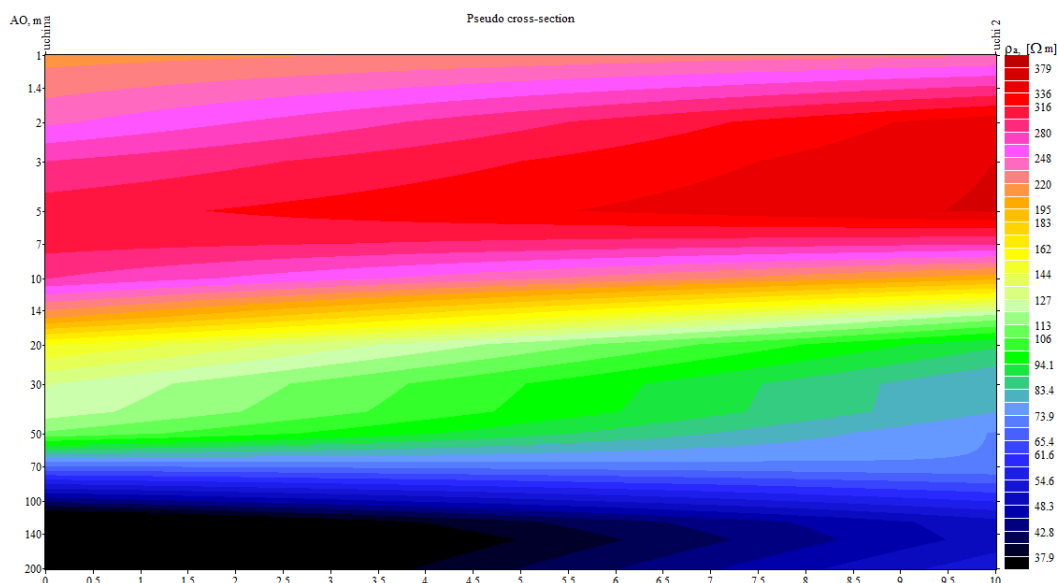


Figura 44. Sección Geoelectrica AA' Uchina, de Resistividades Aparentes, distribución de iso-resistividades en profundidad. Resalta las bajas resistividades en superficie (colores rojizos) y en profundidad alta resistividad por flujos subterráneos (colores azulados).

En este perfil geoelectrico BB', de la distribución de las iso-resistividades muestra un suelo de mayor conductividad a los 50 metros de profundidad, posible presencia de arcillas en formas de lentes, Figura 45.

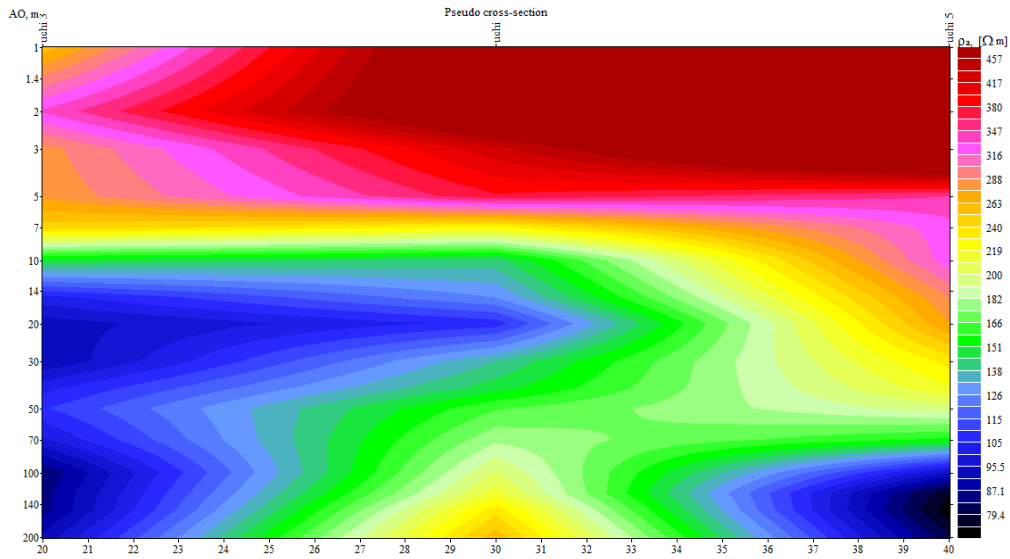


Figura 45. Sección Geoeléctrica BB' Uchina, de Resistividades Aparentes, distribución en profundidad. A diferencia de Sección AA' muestra valores medios de resistividad en profundidad (colores verdosos) por presencia de materiales arcillosos.

El perfil geoeléctrico C-C' muestra las isoresistividades de los tres SEV, se deduce que superficialmente son suelos de alta resistividad, varía a medida que se aumenta la profundidad determinando a los 40 metros de profundidad. Presencia de variación de sedimentos de lentes de arcillas la cual hace diferenciar los valores de isoresistividades de horizonte a horizonte, Figura 46.

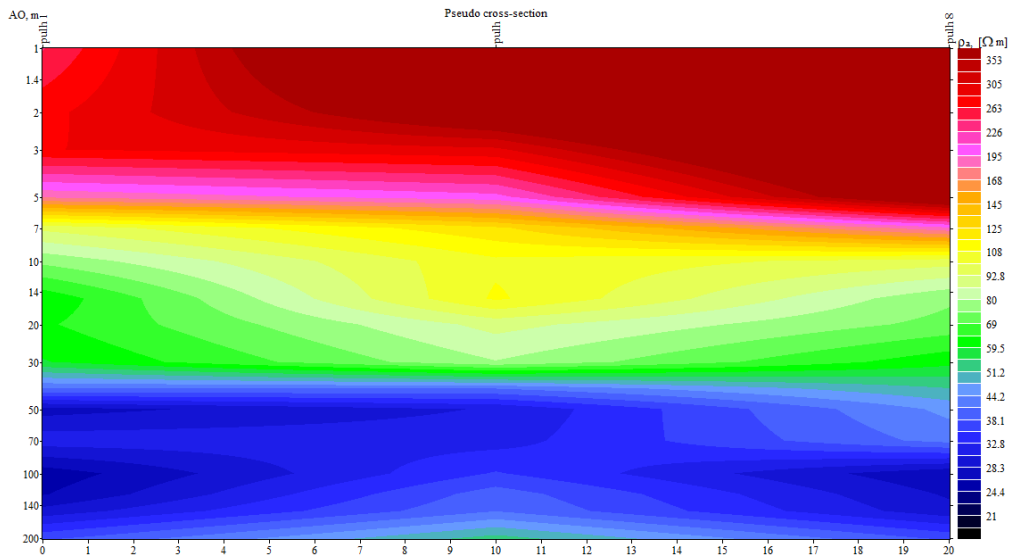


Figura 46. Sección Geoeléctrica C-C' Pulhuay, de Resistividades Aparentes, distribución en profundidad. Se resalta distribución gradual de resistividad de menor a mayor en profundidad.

En este segmento del perfil geoelectrico DD', muestra una distribución de las iso-resistividades de valores muy resistivos a conductivos a partir de los 20 metros de profundidad, Figura 47.

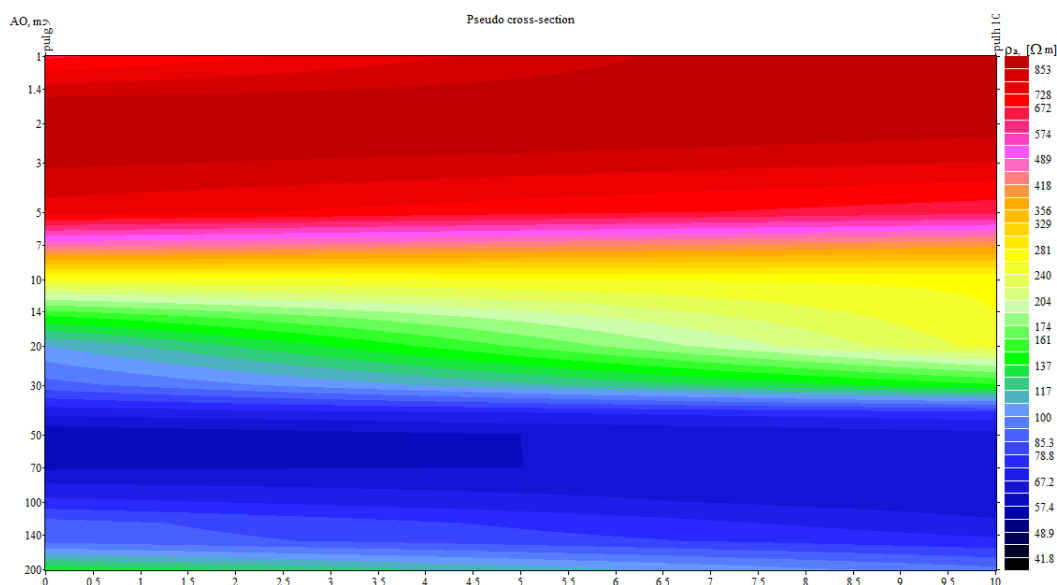


Figura 47. Sección Geoelectrica DD' Pulhuay, de Resistividades Aparentes, distribución en profundidad: Muestra condiciones similares a la sección C-C'.

7.5.2 Interpretación Cuantitativa

La interpretación cuantitativa de los SEV, realizados en el área de la zona de Uchina y Pulhuay, se obtiene de acuerdo a las propiedades y variaciones de los parámetros que se tienen en las diferentes capas u horizontes de los perfiles elaborados. Se obtiene de los resultados de la interpretación de cada perfil diferenciándose básicamente tres capas u horizontes que se describen en los Cuadros 6 y 7:

Cuadro 6. Valores de resistividad verdadera Uchina - Madrigal

N° SEV	TIPO DE CURVA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6	CAPA 7	Prof. Última capa	Nivel Freático
SEV 01	KHKH	P - 207 E - 1.25	P - 455 E - 4.13	P - 58.6 E - 5.79	P - 294 E - 12	P - 12.1 E - 76.8	P - 7.99 E - α		-100 m.	23.19 m.

SEV 02	KQHKHY	p- 163 E - 0.6	P - 1466 E - 0.65	P - 178 E - 4.32	P - 43.8 E - 5.79	P-96.1 E - 37.6	P -14.9 E - 48.4	P- 809 E - α	-97.28 m.	-48.92 m.
SEV 03	KHKH	P -243 E - 0.5	P -347 E - 3.72	P - 31.5 E - 5.15	P - 273 E - 13.5	P- 40.7 E - 61.8	P - 323 E - α		-84.66 m.	9.36 m.
SEV 04	KHKQH	p- 491 E - 0.82	P - 968 E - 1.01	P - 77.9 E - 2.63	P - 522 E - 5.79	P -70.1 E - 28.6	P -29.9 E - 63.4	P- 817 E - α	-102.8 m.	-39.45 m.
SEV 05	KHKQH	p- 539 E - 0.5	P - 2264 E - 0.45	P - 85.4 E - 0.90	P- 1067 E - 1.41	P -220 E - 38.8	P -17.1 E - 39	P- 692 E - α	-81.08 m.	-42.7 m.

P - resistividad geoelectrica en ohmios-metro $\rho(\Omega\text{- m})$

E - espesor de la capa u horizonte en metros.

Cuadro 7. Valores de resistividad verdadera Pulhuay - Madrigal

N° SEV	TIPO DE CURVA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3	CAPA 4	CAPA 5	CAPA 6	Prof. Última capa	Nivel Freático
SEV 06	QHKH	P-710.9 E - 0.6	P- 365 E - 3.9	P - 28.7 E- 5.07	P-708.3 E-13.29	P-24.89 E - 63.4	P-981.8 E - α	-86.3 m.	4.5 m. 22.9 m.
SEV 07	KHKH	p- 184 E - 0.62	P -949 E - 066	P - 13.9 E - 1.78	P -277 E - 20.7	P- 22.7 E - 59.4	P - 887 E - α	83.18-m.	1.27- m. 23.77- m.
SEV 08	KHKH	P -401 E - 0.6	P -787 E - 2.15	P - 29.4 E- 5.72	P - 156 E - 10.1	P- 20.7 E - 77	P - 731 E - α	-95.5 m.	-2.75 m. 18.54 m.
SEV 09	KHKH	p- 588 E - 0.6	P - 1034 E - 2.13	P - 32.5 E - 1.88	P - 261 E - 22.2	P -29.4 E - 56.4	P -614 E - α	-102.8 m.	-39.45 m.
SEV 10	HKH	p- 991 E - 3.13	P - 33.4 E - 3.06	P - 215 E - 37.5	P- 28.6 E -52.7	P -912 E - α		-96.39 m.	-3.13 m. -43.65 m.

P - resistividad geoelectrica en ohmios-metro $\rho(\Omega\text{- m})$ E - espesor de la capa u horizonte en metros.

7.5.2.1 Perfil Geoelectrico AA': Uchina

Este perfil representado por los SEV01, SEV02, realizados en los terrenos de Uchina que presenta el resultado según las variaciones en profundidad y lateral.

- Horizonte H1 0 capa superior Superficial

Este horizonte H1, suelo superficial constituido por suelos residuales, orgánicos, de ligera humedad, teniendo resistividades de 163 - 1466 Ω -m y espesores que varían de 5.3 – 5.5 metros.

- Horizonte H2

Este horizonte representada por suelos aluvionales, diferenciados en dos Sub capas:

Sub capa 1: Suelos aluvionales, húmedos a saturados, cuyas resistividades de 43.8 – 58.6 Ω -m, y espesores de 5.79 metros

Sub capa 2: Suelos aluvionales, de ligera a húmedos, cuyas resistividades de 96.1 - 294 Ω -m, y espesores de 12 – 37.6 metros

- Horizonte H3

Este horizonte conformada por suelos aluvionales de húmedos a saturados, cuya resistividad presenta de 12.1 – 14.9 Ω -m y de un espesor de 48.4 – 76.8 metros, en este horizonte se estima nivel freático a los 23.19 metros de profundidad.

- Horizonte H4

Este horizonte conformada por materiales rocosos inalterados de resistividad de 799 - 809 metros, y de espesor indefinido.

7.5.2.2 Perfil Geoelectrico BB' Uchina

Ese perfil representado por los SEV03, SEV04, SEV05 nos permite visualizar los diferentes horizontes o capas debido a las variaciones paramétricas.

- Horizonte H1 o capa superior Superficial

Horizonte H1, es la cobertura superficial, constituido por suelos residuales, orgánicos, de ligera humedad, teniendo resistividades de 243 - 2264 Ω -m y espesores que varían de 0.95 – 3.85 metros.

- Horizonte H2

Este horizonte representada por suelos aluvionales, diferenciados en dos Sub capas:

Sub capa 1: Suelos aluvionales, húmedos a saturados, cuyas resistividades de 31.5 – 85.4 Ω -m, y espesores de 31.5 – 85.4 metros

Sub capa 2: Suelos aluvionales, de ligera a húmedos, cuyas resistividades de 70 - 273 Ω -m, y espesores de 13.5 – 38.8 metros

- Horizonte H3

Este horizonte conformada por suelos aluvionales de húmedos a saturados, cuya resistividad presenta de 17.1 – 40. Ω -m y de un espesor de 39 – 63.4 metros. Se estima el nivel freático a los 42 metros de profundidad.

- Horizonte H4

Este horizonte conformada por materiales rocosos alterados de resistividad de 323 - 692 metros, y de espesor indefinido.

7.5.2.3 Perfil Geoelectrico CC' Pulhuay

Este perfil está representado por los SEV06, SEV07, SEV08 nos permite visualizar los diferentes horizontes o capas debido a las variaciones paramétricas.

- Horizonte H1 o capa superior Superficial

Corresponde a la cobertura superficial constituido por suelos residuales, orgánicos, de ligera humedad, teniendo resistividades de 365 - 787 Ω -m y espesores que varían de 1.27 - 4.5 metros.

- Horizonte H2

Este horizonte representada por suelos aluvionales, diferenciados en dos Sub capas:

Sub capa 1: Suelos aluvionales, húmedos a saturados, cuyas resistividades de 13.9 – 29.4 Ω -m, y espesores de 1.78 – 5.72 metros

Sub capa 2: Suelos aluvionales, de ligera a húmedos, cuyas resistividades de 156 - 708 Ω -m, y espesores de 10.1 – 20.7 metros

- Horizonte H3

Este horizonte conformada por suelos aluvionales de húmedos a saturados, cuya resistividad presenta de 20.7 – 24.89 Ω -m y de un espesor de 59.4 - 77 metros, nivel freático se estima a los 22.0 metros de profundidad.

- Horizonte H4

Este horizonte conformada por materiales rocosos alterados de resistividad de 731 - 981 metros, y de espesor indefinido.

7.5.2.4 Perfil Geoelectrico DD' Uchina

Ese perfil representado por los SEV09, SEV10, nos permite visualizar los diferentes horizontes o capas debido a las variaciones paramétricas.

- Horizonte H1 o capa superior Superficial

Corresponde a la cobertura superficial, constituido por suelos residuales, orgánicos, de ligera humedad, presenta resistividades de 588 – 10.34 Ω -m y espesores que varían de 2.7 – 3.13 metros.

- Horizonte H2

Este horizonte representada por suelos aluvionales, diferenciados en dos Sub capas:

Sub capa 1: Suelos aluvionales, húmedos a saturados, cuyas resistividades de 32.5 – 33.4 Ω -m, y espesores de 1.88 – 3.06 metros

Sub capa 2: Suelos aluvionales, de ligera a húmedos, cuyas resistividades de 215 - 261 Ω -m, y espesores de 22.2 – 37.5 metros

- Horizonte H3

Este horizonte conformada por suelos aluvionales de húmedos a saturados, cuya resistividad varia de 28.6 – 29.. Ω -m y de un espesor de 52.7 56.4 metros, se estima nivel freático a los 27 metros de profundidad.

- Horizonte H4

Este horizonte conformada por materiales rocosos alterados de resistividad de 614 - 912 metros, y de espesor indefinido.

7.5.3 Resultados

En los perfiles de resistividad eléctrica se delimitaron cuatro horizontes similares, diferenciados por los parámetros físicos, que se resumen a continuación:

- . Horizonte H1: Una cobertura superficial de materiales residuales, orgánicos, con poca humedad, suelos constituidos por limos arenas, arcillas y gravas, generalmente cubiertos superficialmente de vegetales.
- . Horizonte H2: Este horizonte se subdivide en dos capas, la capa 1 presenta mayor humedad, conformado por materiales aluvionales, mientras que la capa 2, son suelos con menor contenido de humedad, con lentes de arcillas, por lo que presentan resistividades bajas.
- . Horizonte H3: Este horizonte se encuentra más profundo, constituido por suelos aluvionales con de lentes de arcilla, saturados de agua. Con resistividades de 20 Ω -m, alberga el nivel freático en la zona.
- . Horizonte H4: Corresponde al basamento rocoso alterado, sobreyacen a este horizonte los horizontes descritos anteriormente.

CAPÍTULO VIII

GEOTECNIA

En la localidad de Madrigal se han llevado a cabo estudios geotécnicos que consistieron en la elaboración de calicatas y ensayos de densidad de campo. Asimismo, de las calicatas se extrajeron muestras de suelo para en el laboratorio practicarles ensayos geotécnicos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad portante de los suelos, a continuación se detallan los mismos:

Las evaluaciones geotécnicas se rigieron por las normas estandarizadas internacionales de la ASTM, donde se codificaron las muestras de suelos y el logueo de la estratigrafía de acuerdo a la Clasificación internacional SUCS.

El análisis de estabilidad de taludes se realizó de acuerdo a la Norma Sismoresistente Nacional 030 vigente.

8.1 UBICACIÓN DE EXPLORACIONES GEOTECNICAS

Para ello se han elaborado 09 fichas de descripción de calicatas, las mismas que se adjuntan en los anexos de geotecnia. Las excavaciones realizadas se localizan en las siguientes coordenadas UTM, Cuadro 8, **Plano 08**.

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	SUCS
MAD-01	197534	8271772	3114	1.20	SM
MAD-02	197808	8271659	3108	3.20	SP
MAD-03	197789	8272052	3178	2.90	GP
MAD-04	198480	8272452	3271	2.60	GM
MAD-05	197992	8271255	3147	2.80	SP
MAD-06	198776	8271119	3255	3.30	SP
MAD-07	198765	8271373	3265	2.80	GW
MAD-08	198241	8271869	3211	3.40	GP
MAD-09	198907	8272244	3276	3.15	GP

Cuadro 8. Ubicación de calicatas

Cabe mencionar que, las profundidades varían porque en algunos suelos se encontró materiales compactos y difíciles de excavar como clastos de origen volcánico, entre otros, Figuras 48, 49 y 50.



Figura 48. Calicata MAD-01



Figura 49. Calicata MAD-02



Figura 50. Calicata MAD-03

8.1.1 Muestreo de suelos

El procedimiento de campo incluyó las siguientes actividades:

- Reconocimiento de la zona de estudio: Se realizó un análisis visual de las características del terreno, evaluando la accesibilidad y lugares apropiados donde ubicarlas.
- Excavaciones: Estas tuvieron las siguientes dimensiones: 1.5 x 1.5 m y aproximadamente 3.5 m de profundidad.
- Logueo: Proceso de extracción de la muestra del subsuelo y la descripción de las características físicas que presenta el corte estratigráfico.

8.1.2 Resultados de laboratorio

De los ensayos geotécnicos realizados se tienen los siguientes resultados:

- Ensayos de corte directo (Norma ASTM D-3080)

Las 05 muestras extraídas de las calicatas se enviaron al laboratorio de la UNALM para dicho ensayo, cuyos resultados del ensayo se adjuntan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Valores obtenidos del ensayo de corte directo.

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m ²)	Densidad natural (gr/cm ³)
MAD01	30	0.10	1.95
MAD02	25	0.00	1.95
MAD03	22	0.10	1.88
MAD04	20	0.10	--
MAD05	25	0.20	--

De los resultados obtenidos anteriormente se evidencia que, presentan cohesión baja y los valores del ángulo de fricción interna superan los 20°, característico de suelos de grano medio mal gradados con contenido de gravas.

Se hace mención que, resultados de capacidad de carga de los 05 sitios analizados se presentan en el Cuadro 9, **Plano 09**.

Ademas, los suelos en la localidad de Madrigal fueron calculados para una profundidad de cimentacion de 1.20 m y ancho mínimo de cimentación de 1.00 m, los mismos que se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Capacidad de carga de las cinco (05) muestras extraídas en la localidad de Madrigal

MUESTRA	Capacidad de carga ultima (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
MAD01	137.21	2.43
MAD02	161.65	2.79

MAD03	80.08	1.67
MAD04	57.74	1.22
MAD05	54.95	1.13

Cuadro 11. Rango de capacidad de carga admisible

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm²)	DENOMINACION
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

De los resultados obtenidos y citados en Cuadro 11 se pueden diferenciar los suelos según su capacidad de carga en, Plano 09:

- **Capacidad Portante Baja:** De rangos 1.00 - 2.00 kg/cm², se consideran suelos medianamente compactos. Representan el 9% del área de estudio y sobre este tipo de suelos se encuentra asentada el asentamiento humano Veracruz Chica y el Instituto Valle del Tambo.
- **Capacidad Portante Media:** Presenta rango de 2.00 - 3.00 kg/cm², considerados suelos moderadamente compactos. Representan el 6% del área de estudio y sobre este tipo de suelos se encuentra asentada el asentamiento humano Alto Veracruz.
- **Capacidad Portante Alta:** Presenta rango mayor a 3.00 kg/cm², se consideran suelos compactos. Representan el 85% del área de estudio y sobre estos suelos se asienta el Molino Virgen de la Asunción y pueblo joven Túpac Amaru.

8.2 TIPOS DE SUELOS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas realizados en la localidad de Madrigal, los resultados obtenidos de los

ensayos granulométricos y de plasticidad realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional La Agraria (UNALM) y la inspección visual del terreno se ha identificado 04 tipos de suelo, los mismos que han sido agrupados haciendo uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), Cuadros 9.3 Y 9.4 y **Plano 08:**

- Suelo tipo GW

Grava arenosa bien graduada con bajo contenido de material fino (6%), el contenido de humedad es de 3.10 %, constituyen suelos semi-compactos no presenta plasticidad, tienen capacidad de carga admisible de 3.87 Kg/cm². Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 21 % del terreno de la localidad y se han reconocido en la calicata 07, parte inferior de Madrigal extremo oriental.

- Suelos tipo GP-GM

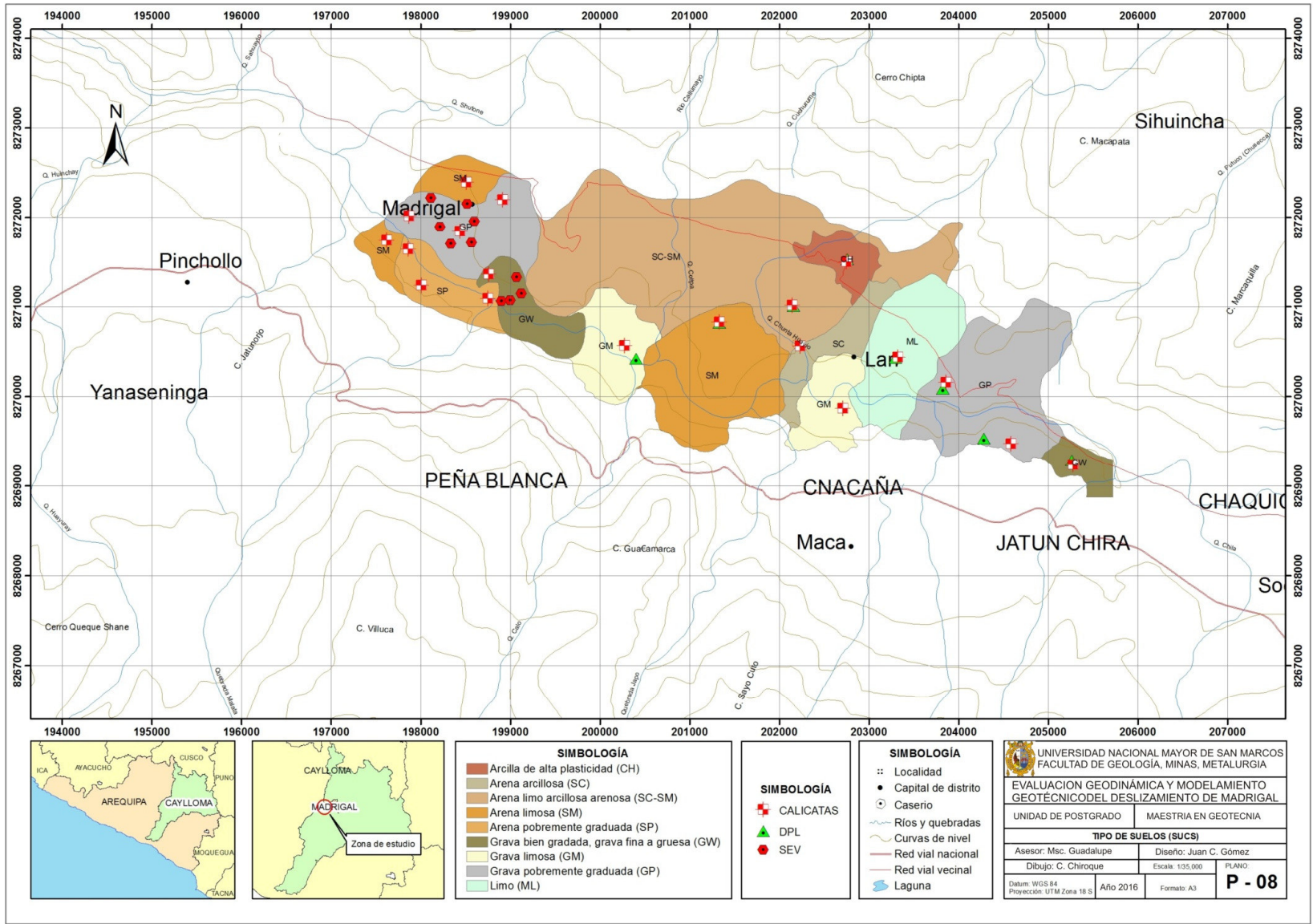
Están conformados por gravas arenosas mal graduadas, presentan material granular mayor a 59%, el contenido de humedad es de 3.80 % a 5.60 %, se consideran como suelos compactos, no presenta plasticidad, su capacidad de carga admisible fluctúa entre 4.12 y 4.64 Kg/cm², ocupan el 42 % de los suelos de la localidad y han sido identificados en sectores contiguos a la parte céntrica del poblado.

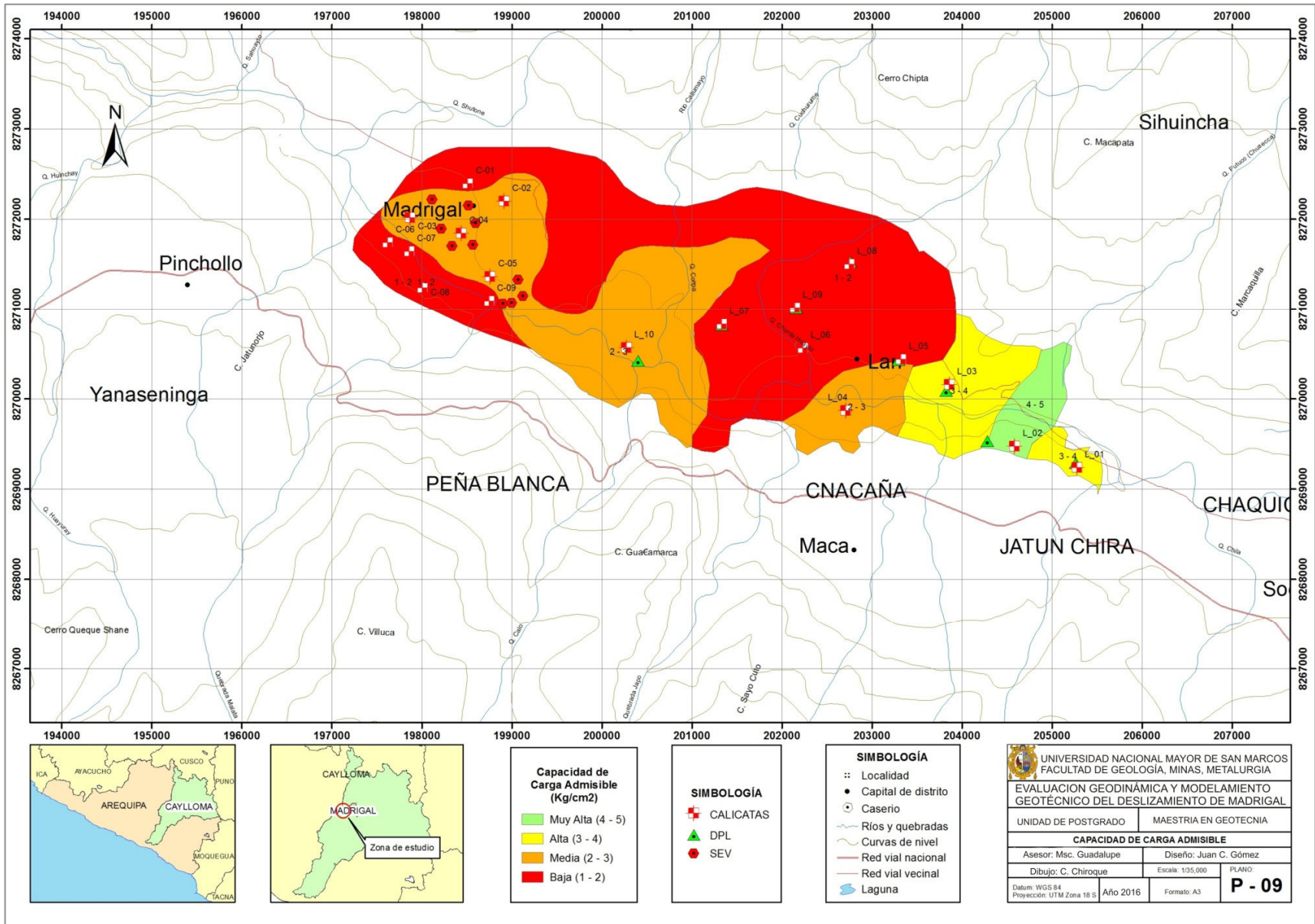
- Suelos tipo SM

Corresponden a suelos areno-limosos con valores de cohesión de 0.1 TN/m² y densidad natural de 1.95 gr/cm³. Presenta una capacidad de carga de 2.4 kg/cm². Estos suelos predominan en la parte media-alta, extremo oeste de Madrigal.

- Suelos tipo SP

Este tipo de suelos se encuentran en la parte central y baja de Madrigal, son suelos arenosos con poca gradación y presenta una capacidad de carga de 1.5 kg/cm².





CAPITULO IX

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

9.1 GEOMETRÍA DEL TALUD EN MADRIGAL

El talud del deslizamiento de Madrigal presenta la típica configuración de un deslizamiento rotacional, es decir el plano de falla es del tipo circular, Figura 51.

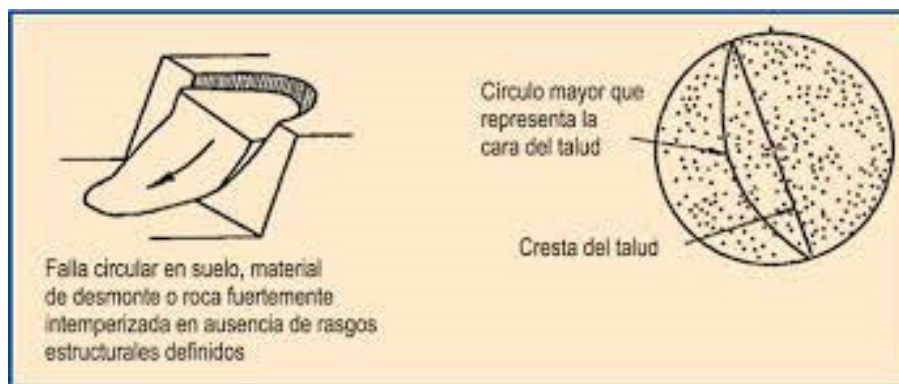


Figura 51. Tipo de falla circular en un deslizamiento rotacional

9.1.1 Modelo de falla

El modelo de falla del deslizamiento de Madrigal, corresponde a los originados en materiales del tipo suelos, por lo tanto de forma circular, de acuerdo a la teoría del equilibrio límite, Figura 52.

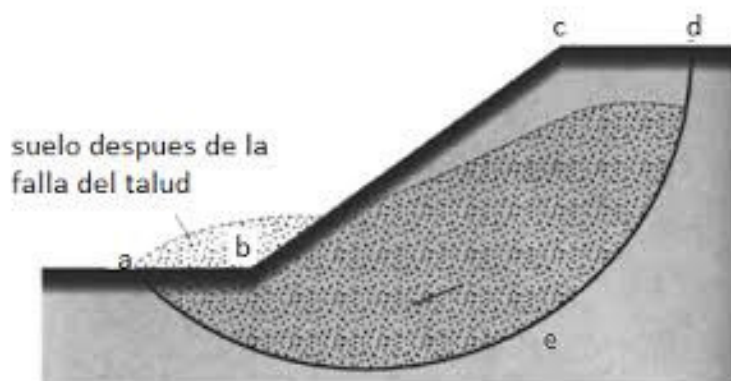


Figura 52. Tipo de superficie de falla circular en suelos.

9.1.2 Características físicas de los materiales

La caracterización geotécnica de los materiales involucrados en el análisis de estabilidad del deslizamiento de Madrigal ha sido efectuada en base de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para el presente estudio, donde se definieron los valores de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que intervienen en este análisis. En el Cuadro 12 se consignan estos valores:

Material	Densidad Natural (KN/m3)	Cohesión (KN/m2)	Fricción (°)
CL con clastos	20	0.1	20
GC con clastos	22	10	20
Substrato rocoso con matriz areno-limosa	19	15	30
Substrato rocoso poco fracturado	20	18	35

Cuadro 12. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales del talud

9.1.3 Modelo Bishop

Para el análisis estático y presudo-estático se ha utilizado el método de equilibrio límite de Bishop simplificado, cuyo algoritmo de cálculo está contenido en el programa SLIDE que permite hacer este análisis.

9.1.4 Análisis de estabilidad estático

El análisis estático evalúa la estabilidad física de la ladera, en donde las únicas fuerzas desestabilizantes están constituidas por el peso propio de los materiales y las presiones de poros que pudieran existir en el interior de la ladera.

9.1.5 Análisis de estabilidad pseudoestático

El análisis pseudoestático constituye una forma simplificada de evaluar la estabilidad física de la ladera en caso de la ocurrencia de un sismo.

En base a los estudios sísmicos que se han realizado para la zona se tomó como valor de aceleración 0.23 g para el análisis pseudoestático.

Finalmente, para evaluar las condiciones de estabilidad física de la ladera inestable en Madrigal se elaboraron dos secciones transversales al río Colca: A-A' y el B-B', las mismas que desde el punto de vista de su geometría interna, como por su ubicación en planta constituyen secciones representativas del área de estudio. Estas secciones de análisis se presentan en las Figuras 53, 54, 55, 56 y 57.

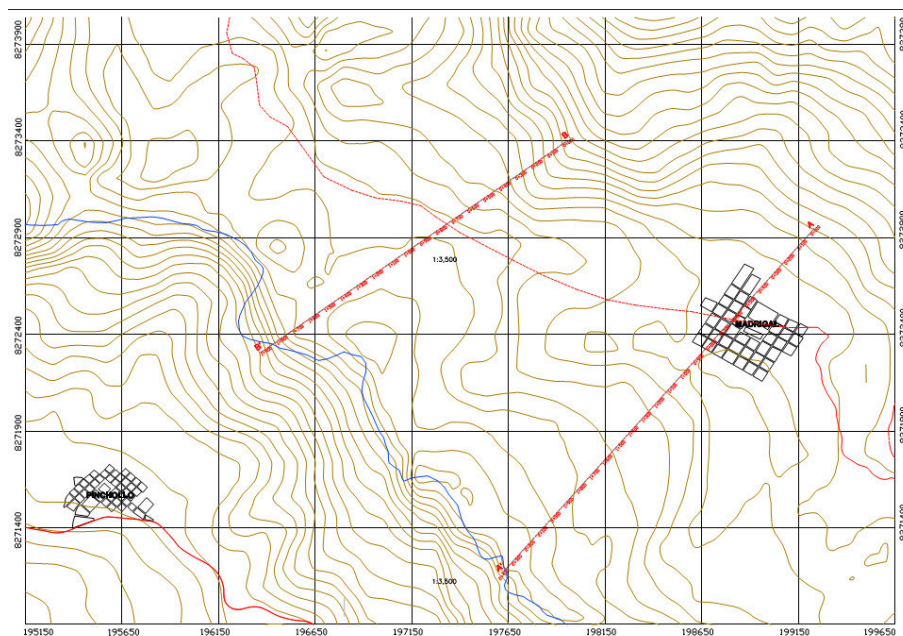


Figura 53. Ubicación de las secciones A-A' y B-B' en Madrigal.

El resultado de los análisis de estabilidad en las dos secciones analizadas confirman la inestabilidad de la ladera con presencia

de deslizamientos, así la sección A-A' en estado estático arroja un F.S. = 0.913 y asumiendo una aceleración sísmica de 0.23g arroja en el análisis pseudoestático un F. S. de 0.412.

Para el caso de la sección B-B' el valor del F.S. en estático arroja F.S. = 0.843 y en pseudoestático F.S. = 0.528.

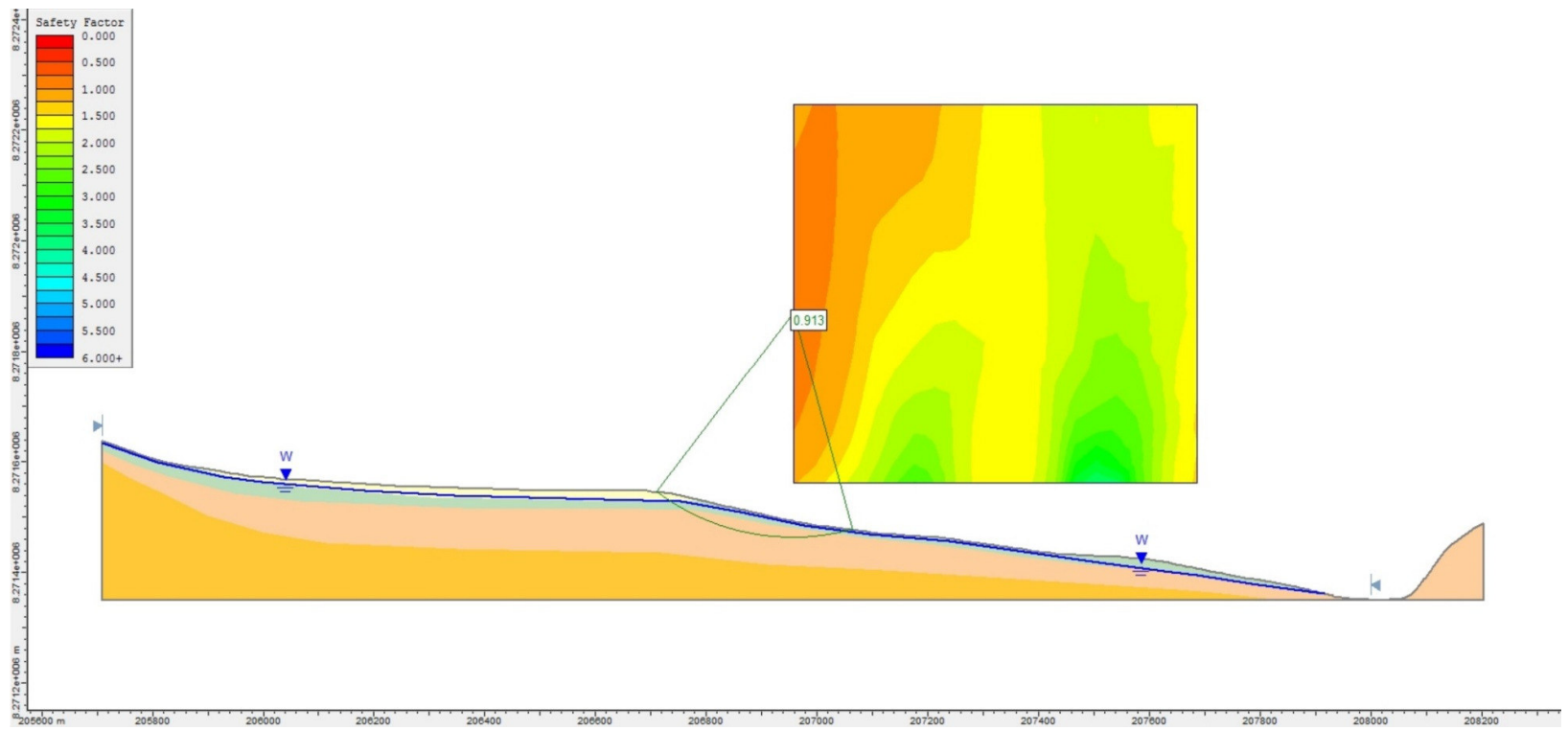


Figura 54: Sección A-A' análisis estático.

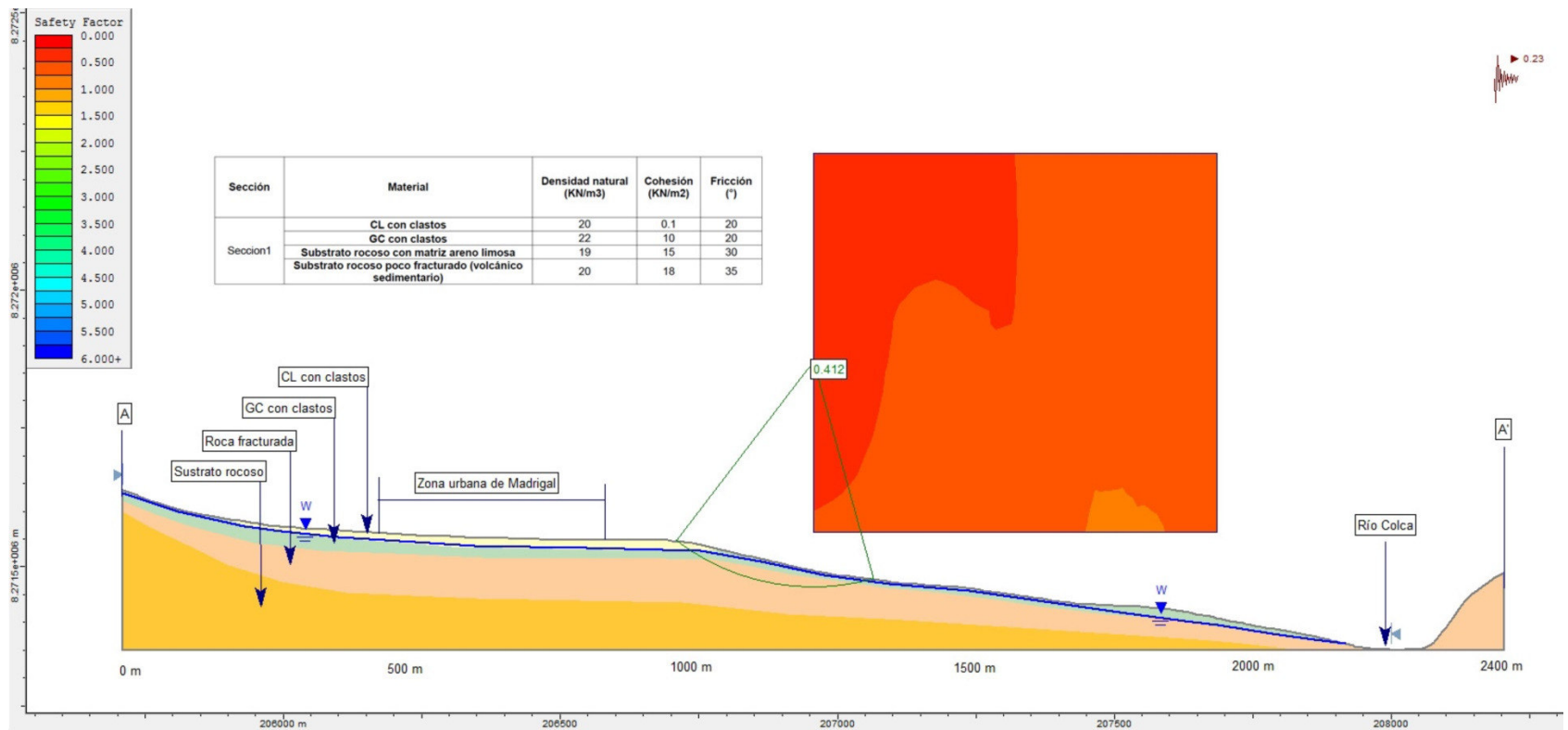


Figura 55. Sección A – A' análisis pseudo estático

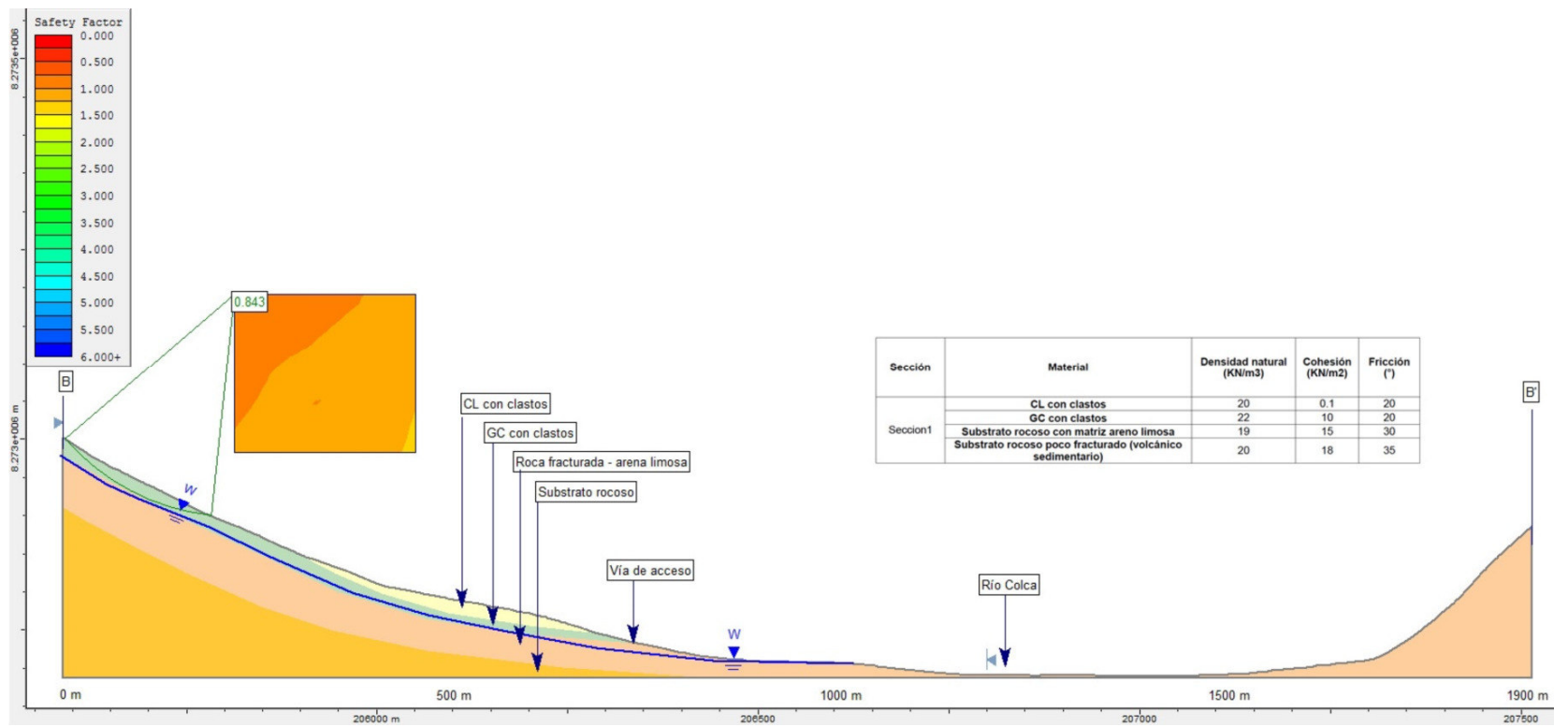


Figura 56. Sección B-B' análisis estático.

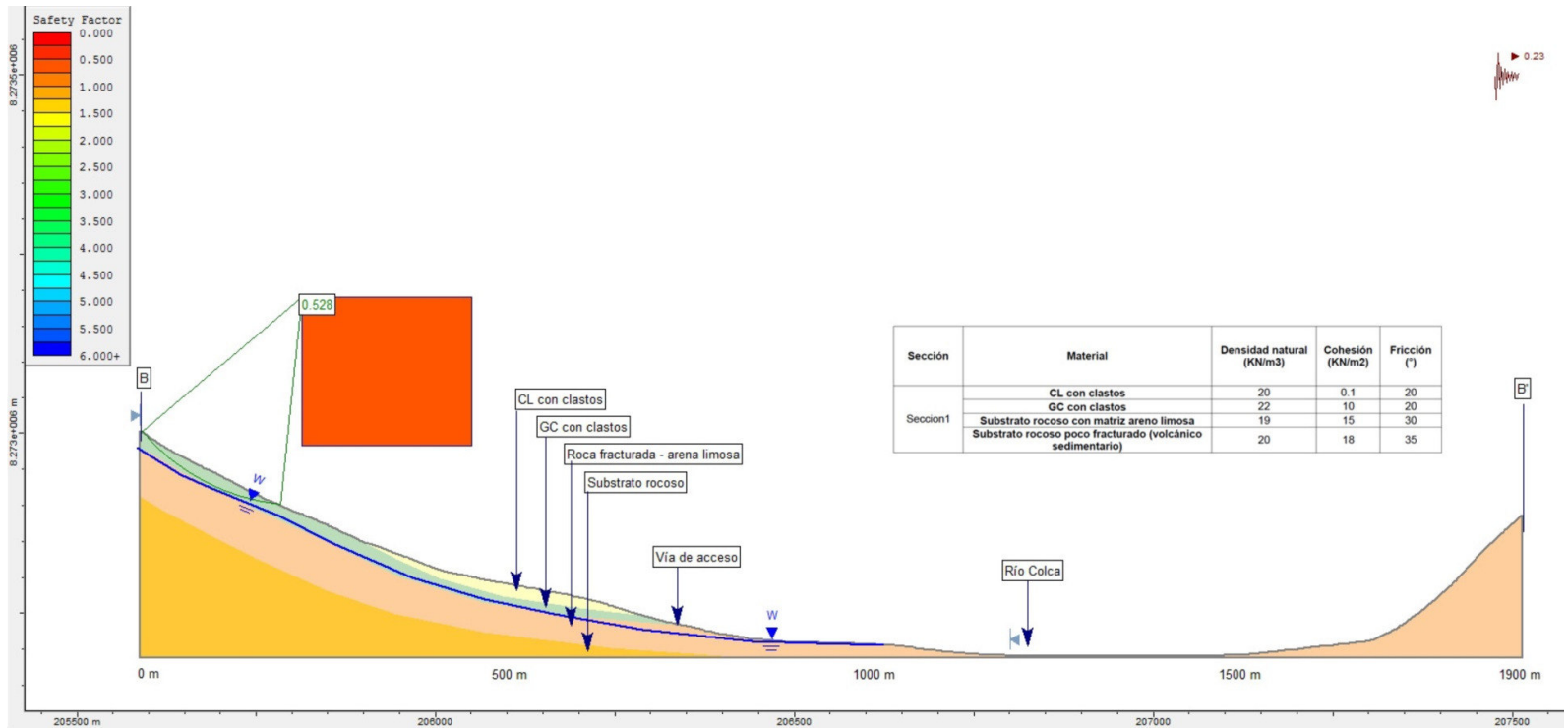


Figura 57. Sección B-B' análisis pseudo estático.

9.2 MODELADO NUMÉRICO DEL DESLIZAMIENTO DE MADRIGAL

En esta primera parte del trabajo de investigación, se realizó la estructura inicial para el desarrollo del modelo numérico. Se aplicó modelos matemáticos para el cálculo de los parámetros matemáticos de un modelo digital de terreno (MDT) y se procedió con el cálculo de las pendientes del MDT, se realizó el mallado del modelo digital y se plotearon distintas gráficas producto del resultado del análisis numérico y computacional realizado a través del lenguaje Octave, bajo la plataforma de MatLab.

El objetivo de esta parte es desarrollar un modelo numérico computacional para la simulación de deslizamientos.

Como objetivos específicos del modelamiento con métodos numéricos estuvo:

- Analizar la mecánica de los deslizamientos para conocer el comportamiento dinámico de estos eventos.
- Discretizar las ecuaciones de gobierno de los deslizamientos para el desarrollo de la solución numérica.
- Calibrar el modelo a partir de un evento de deslizamiento estudiado para la validación del modelo numérico computacional. En este caso el deslizamiento de Madrigal.

De las investigaciones obtenidas referente a la modelización de deslizamientos, se pudo obtener las siguientes investigaciones: Elena González (2003) y Bouchra Haddad (2007), quienes proponen el uso de los modelos GeoFlow y SHP respectivamente para la modelización de deslizamientos; y Víctor Olaya (2004), quién realiza un compendio de los principales métodos utilizados para el modelamiento tanto de deslizamientos como de flujos y explica el fundamento teórico en lo cual se basan estos métodos.

De acuerdo con estas fuentes de referencia del tema abordado se optó por seguir la siguiente metodología:

En primer término, es necesario conocer las ecuaciones de gobierno de los deslizamientos, con esto se podrá simular su dinámica y explicar la mecánica de formación del evento. Para ello se deben discretizar las ecuaciones de gobierno para dar una solución analítica, después se deben aplicar métodos numéricos para la solución numérica y finalmente se procederá con la aplicación de técnicas computacionales para el desarrollo del modelo.

Con el modelo desarrollado se realizó la calibración con información de deslizamientos ocurridos, y posteriormente se validó con la aplicación del modelo a un evento activo por ocurrir.

La investigación se inicia con el armado de la estructura del modelo. Se importó los datos de un modelo digital de terreno en formato de lista (x,y,z). Con esta lista de datos se convirtió de lista a una matriz espacial. Esto se logró generando 3 matrices, la matriz espacial de datos con coordenadas X, Y y Z. Posterior a ello se ploteó la matriz Z georreferenciadas con sus coordenadas X e Y de la matriz espacial. Se comprobó la gráfica ploteada con otra gráfica realizada con otro software similar. Luego se generó el mallado de la matriz espacial y se ploteó un modelo digital de terreno que fue comparado usando otro software. Posterior a ello se realizó el cálculo de los parámetros matemáticos para este modelo digital de terreno el cual sirvió para los posteriores procesos. Se calculó las pendientes utilizando la ecuación de Evans y este producto final también fue comprobado de la misma manera.

La recopilación de información del uso de comandos y librerías fue realizado con el lenguaje Octave, Utilizando la plataforma Matlab.

En base a lo anterior, se pudo obtener los siguientes resultados:

- La estructura base para el modelo numérico que se muestra en la Figura 58:

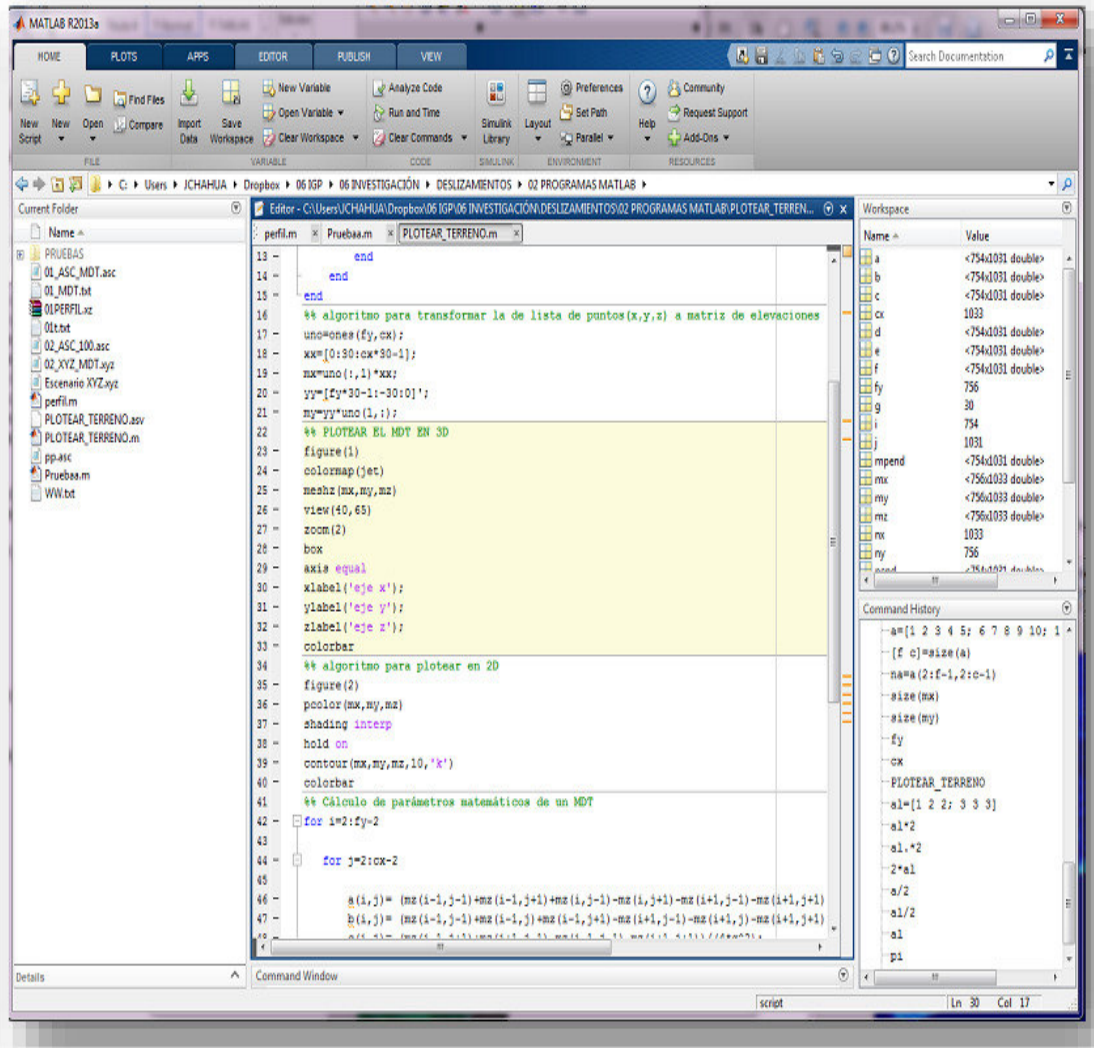


Figura 58. Algoritmo del programa usando lenguaje Octave bajo la plataforma Matlab

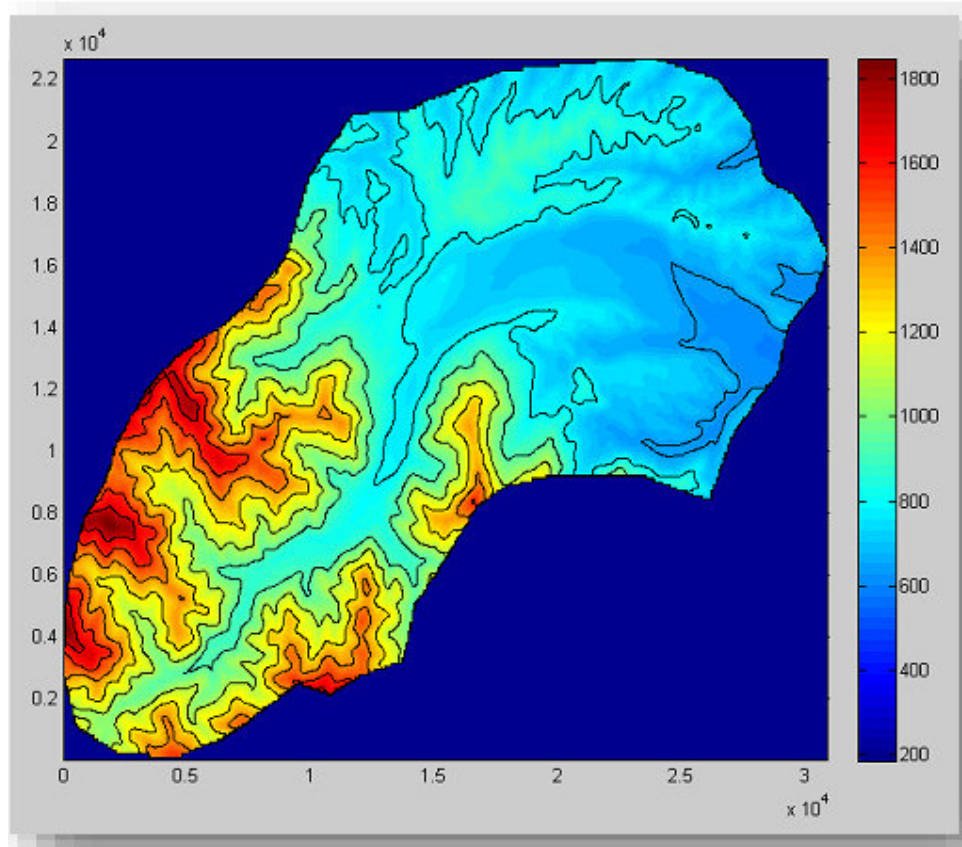


Figura 59. Representación gráfica de un Modelo Digital de Terreno

- Se realizó la comparación del modelo digital de terreno generado con Octave y otro realizado con un software SIG. El MDT fue generado con ArcGIS, Figura 8. También se generó el MDT con Matlab y Global Mapper (Figuras 59, 60, 61 y 62).

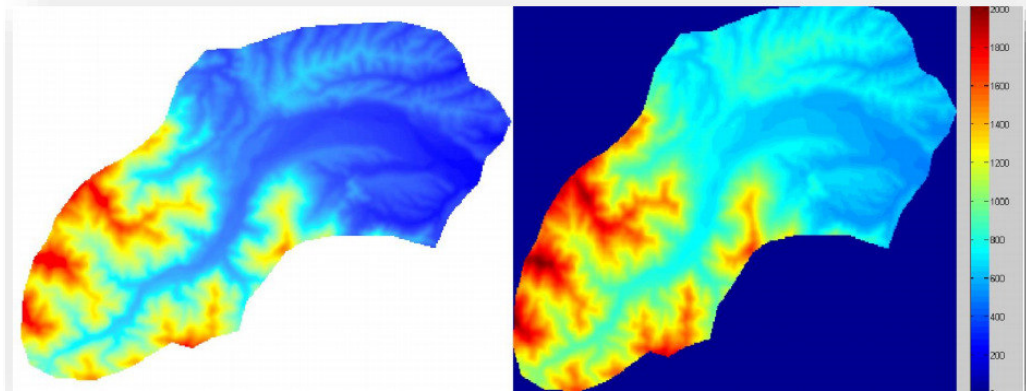


Figura 60. Gráficas comparativas de los MDT generados con diferente fuente.

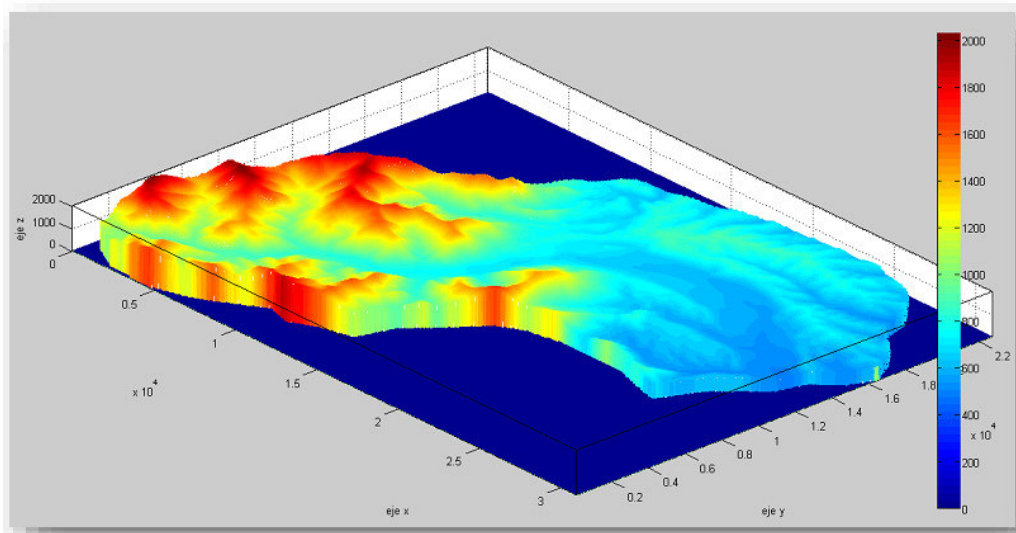


Figura 61. MDT generado con el programa Matlab

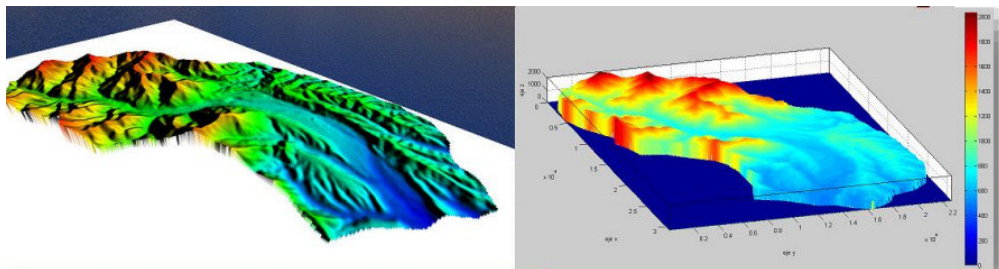


Figura 62. Gráficas comparativas usando Global Mapper y Matlab

Con los cálculos realizados para la obtención de los parámetros matemáticos de un modelo digital de terreno se generó las

pendientes del MDT que son semejantes a lo elaborado con el software ArcGIS, Figuras 63 y 64.

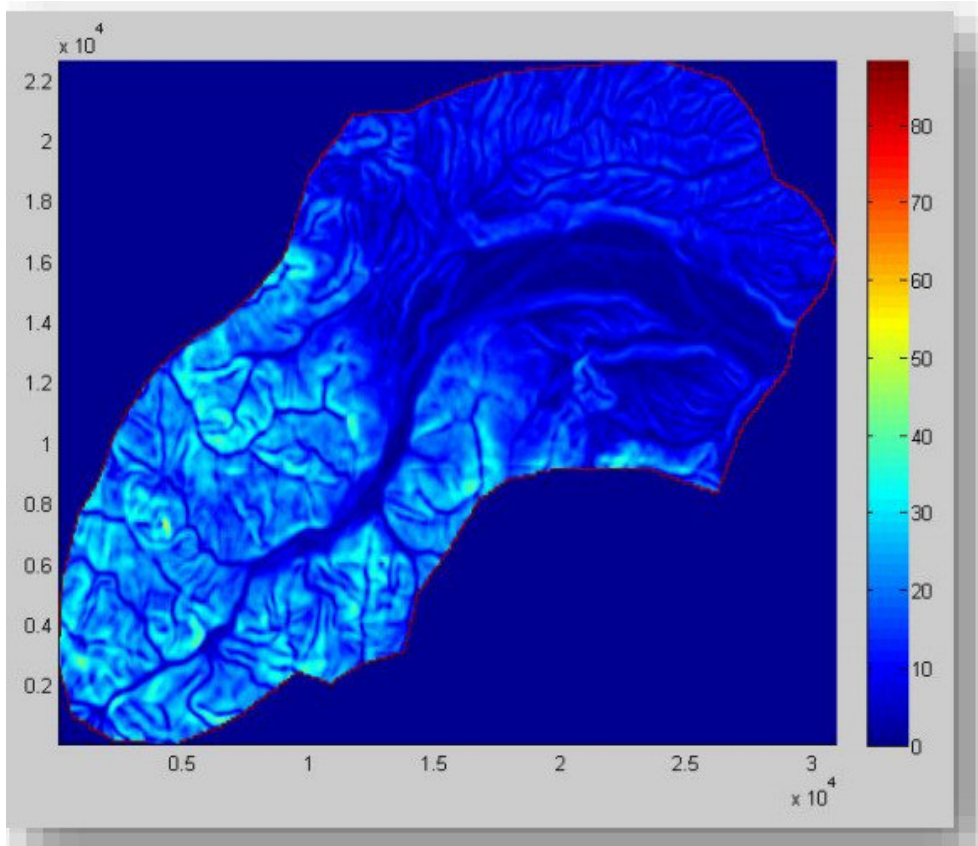


Figura 63. Gráfico de pendientes obtenidas con Matlab

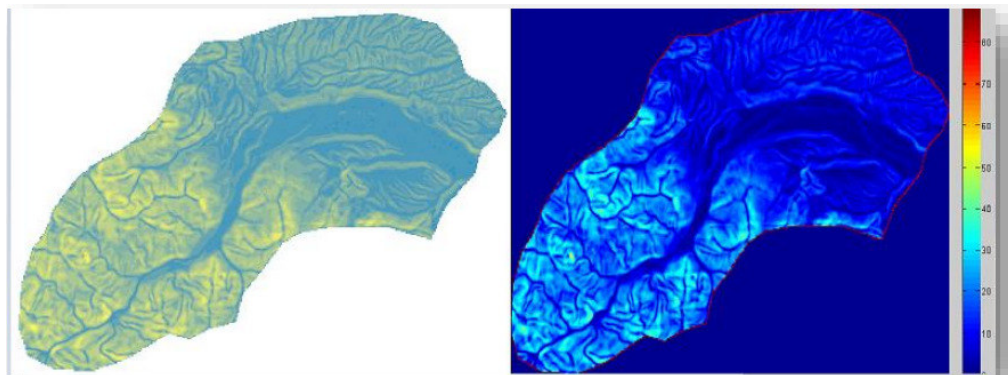


Figura 64. Gráficas comparativas utilizando ArcGIS y Matlab respectivamente

De las investigaciones referidas a la modelización de deslizamientos, González (2003) y Bouchra Haddad (2007) y DeBlasio (2001), explican

las ecuaciones fundamentales a los cuales están regidos estos deslizamientos.

De acuerdo con estas referencias del tema abordado se optó por seguir la siguiente metodología:

Para el desarrollo del modelo se tuvo que identificar las ecuaciones y leyes físicas que rigen en un movimiento de deslizamiento rotacional y las características físicas que presenta el material deslizado, tales como energía potencial gravitatoria, energía potencial cinemática, ecuación reológica del flujo deslizado, ángulo de fricción interna, coeficiente de rozamiento, etc.

Con las ecuaciones identificadas y las características físicas del material deslizado se procede a discretizar estas ecuaciones mediante soluciones analíticas (solución matemática) y posterior a ello dar una solución numérica (técnicas computacionales) aplicando métodos diferencias finitas, integración numérica, elementos finitos, etc.

Con la solución numérica se procede a desarrollar el modelo en un lenguaje de programación, tales como Octave, Python, R, Fortran, etc.

Este proceso se realizó comenzando de ecuaciones básicas para modelos conceptuales (Energía, cantidad de movimiento), e ir avanzando con ecuaciones de análisis dinámico (modelos reológicos, integración vertical) posterior a la programación se calibró el modelo con estudios de movimientos en masa como es el caso del deslizamiento de Madrigal.

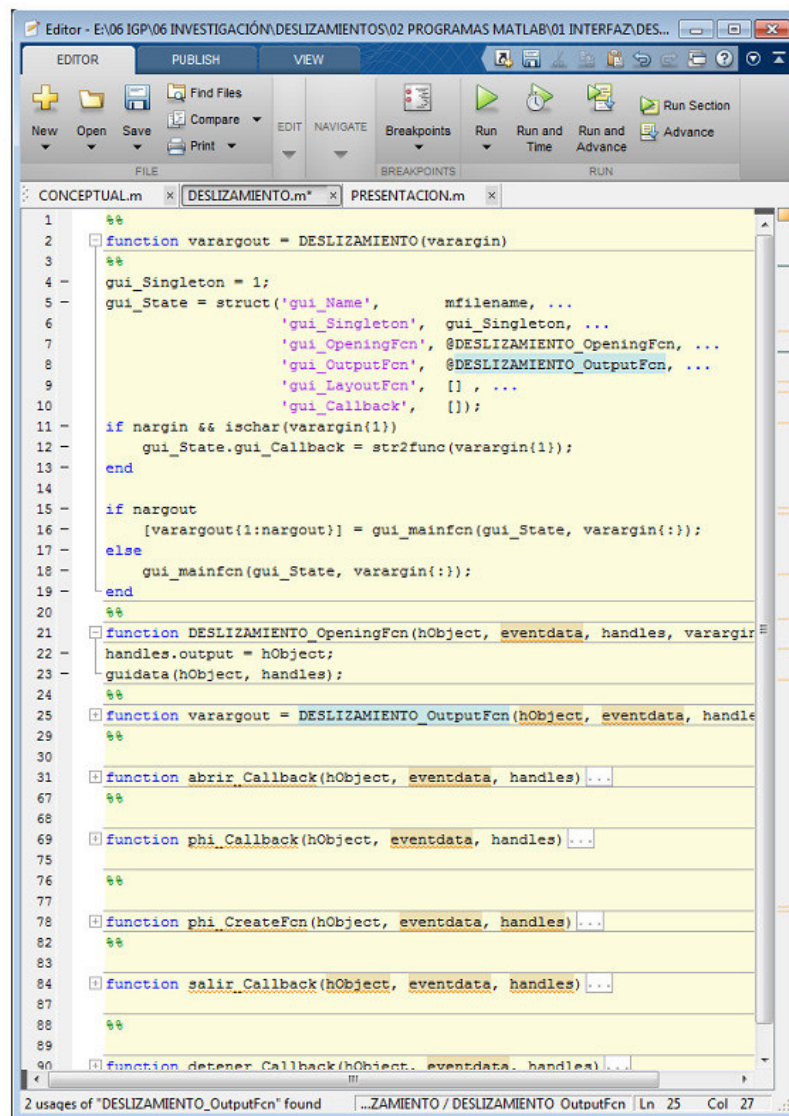
En primer término, se realizó un modelo conceptual con ecuaciones básicas las cuales están regidas en un deslizamiento traslacional, en este caso las ecuaciones utilizadas fueron: la ecuación de Energía potencial gravitatoria; energía potencial cinemática; y la ecuación de cantidad de movimiento.

El principio físico elemental en la que se basa el modelo es el principio de conservación de energía. En este caso consiste en el material deslizado con energía potencial gravitatoria inicial (E_{Go}), pierde equilibrio y se desliza a una cierta distancia, en este trayecto la E_{Go} se

transforma en energía cinética (E_c) y otra parte en pérdida por fricción con el suelo (F_r), hasta llegar a un equilibrio y el material se detiene.

Estas ecuaciones fueron programadas en el lenguaje Octave bajo la plataforma de MathLab, y posterior a ello se realizó un interfaz gráfica para su fácil uso.

En la Figura 65 se observa el esquema principal de la interfaz gráfica creada en el lenguaje Octave.



```
1  %%
2  function varargout = DESLIZAMIENTO(varargin)
3  %%
4  - gui_Singleton = 1;
5  - gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
6  -                 'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
7  -                 'gui_OpeningFcn', @DESLIZAMIENTO_OpeningFcn, ...
8  -                 'gui_OutputFcn',  @DESLIZAMIENTO_OutputFcn, ...
9  -                 'gui_LayoutFcn',  [], ...
10 -                 'gui_Callback',    []);
11 -
12 - if nargin && ischar(varargin{1})
13 -     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
14 - end
15 -
16 - if nargin
17 -     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
18 - else
19 -     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
20 - end
21 - %%
22 - function DESLIZAMIENTO_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
23 -     handles.output = hObject;
24 -     guidata(hObject, handles);
25 - %%
26 - function varargout = DESLIZAMIENTO_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
27 - %%
28 -
29 -
30 -
31 - function abrir_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
32 - %%
33 -
34 -
35 -
36 -
37 -
38 -
39 -
40 -
41 -
42 -
43 -
44 -
45 -
46 -
47 -
48 -
49 -
50 -
51 -
52 -
53 -
54 -
55 -
56 -
57 -
58 -
59 -
60 -
61 -
62 -
63 -
64 -
65 -
66 -
67 -
68 -
69 -
70 -
71 -
72 -
73 -
74 -
75 -
76 -
77 -
78 - function phi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles) ...
79 - %%
80 -
81 -
82 -
83 -
84 - function salir_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
85 - %%
86 -
87 -
88 -
89 -
90 - function detener_Callback(hObject, eventdata, handles) ...
91 - %%
```

Figura 65. Esquema conceptual principal del modelo: Estructura del programa

Se eligieron las secciones A-A' y B-B', para el análisis numérico. Estas secciones presentan un menor factor estático y pseudo-estático y por lo tanto se les considera críticas.

Se considera la información topográfica, parámetros geotécnicos estáticos de los materiales y condiciones inferidas del nivel freático en función de los resultados de la geofísica aplicada.

9.2.1 Geometría de los modelos

Algunos aspectos geométricos de los modelos originales de las secciones mencionadas, con lo que se generó la malla de elementos finitos más simple y de esta forma evitar dificultades numéricas de cálculo.

La Figuras 66 muestra la geometría de los modelos de las condiciones iniciales de las secciones A-A' y B-B' respectivamente.

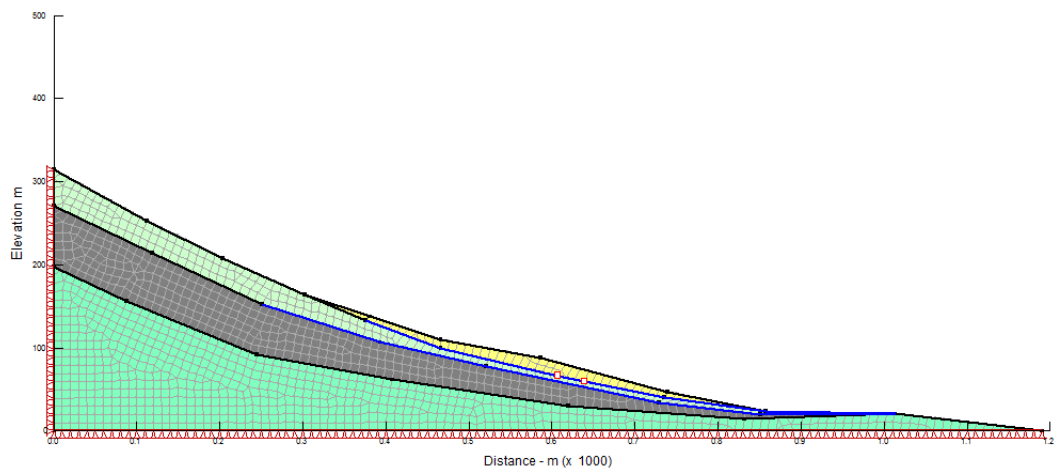


Figura 66. Malla establecida para la corrida del modelo numérico.

Para confirmar la validez de los modelos se realizó un análisis estático de estabilidad de los mismos, con la topografía simplificada. Se obtuvieron valores similares en términos de F.S. analizados en ítems

anteriores. Así para el caso del perfil B-B' se obtuvo en estático F.S.= 1.17 y en pseudoestático F.S. = 0.68, Figuras 67 y 68.

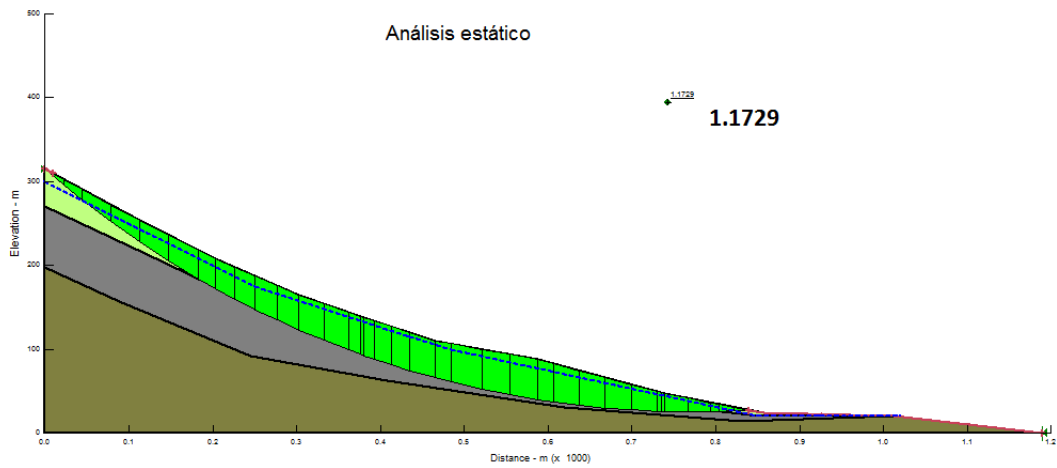


Figura 67. Análisis de estabilidad en estático perfil B-B'.

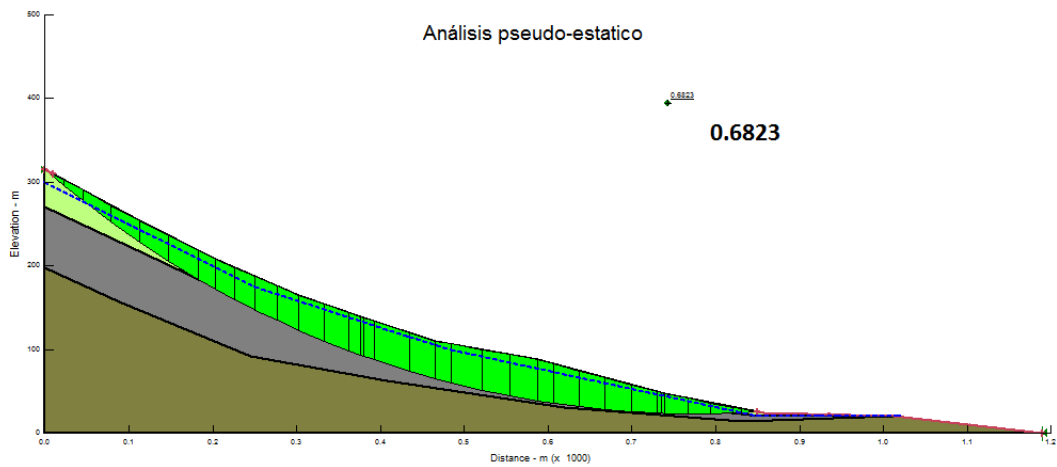


Figura 68. Análisis de estabilidad en pseudoestático perfil B-B'.

9.2.2. Parámetros geotécnicos de los materiales

El peso unitario y los parámetros geotécnicos de resistencia de los materiales que conforma el subsuelo de la ladera inestable en Madrigal han sido utilizados para el análisis de estabilidad con SLIDE descritos en el ítem anterior y se presentan en el Cuadro 9.5.

En la Figura 9.14 se hace un análisis de presión de poros teniendo en cuenta las propiedades y parámetros geotécnicos incluidos en el Cuadro 9.5, Figura 69.

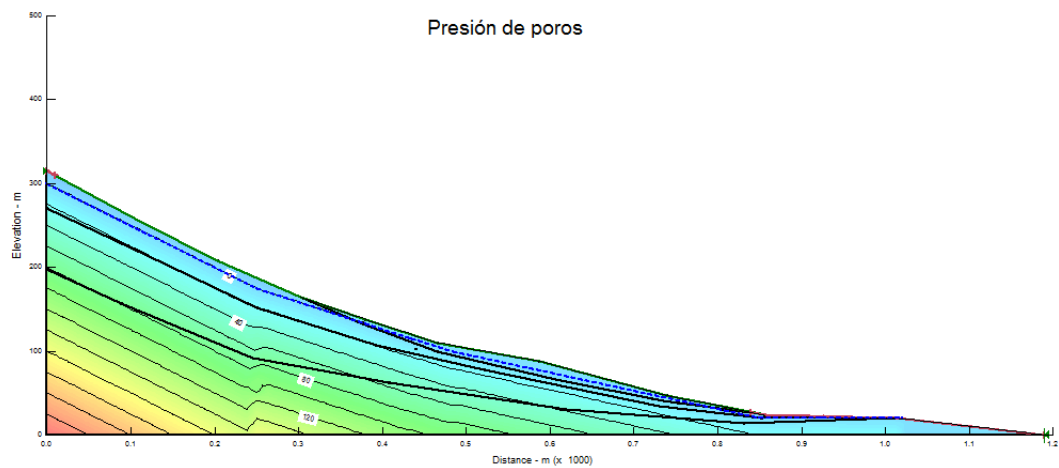


Figura 69. Distribución de las presiones de poro en el perfil B-B´.

9.2.3 Condiciones de frontera en Modelo de elementos finitos

Las condiciones de frontera se establecen de forma similar a como lo usan los programas de este tipo, caso el QUAKE, es decir, condiciones de frontera de desplazamiento nodal (restricción de desplazamiento en ciertos nodos) restringen el movimiento según lo requiera el tipo de análisis realizado, ya sea estático o dinámico. A continuación se describe cada una de estas condiciones:

- Condiciones de frontera en análisis estático: Se considera la restricción del movimiento horizontal en los nodos de las caras

laterales del modelo y restricción del movimiento horizontal y vertical de los nodos en el extremo inferior del modelo.

- Condiciones de frontera en análisis dinámico: Se considera la restricción del movimiento vertical en los nodos en las caras laterales del modelo.

Se tiene en cuenta el análisis de la variación de las aceleraciones que soporta la masa inestable a través del tiempo y esto traducido en esfuerzos en ese lapso de tiempo, esto se ingresa al programa en función a los datos sísmicos de la zona (Catalogo Sísmico), tal como se muestra en la Figura 70.

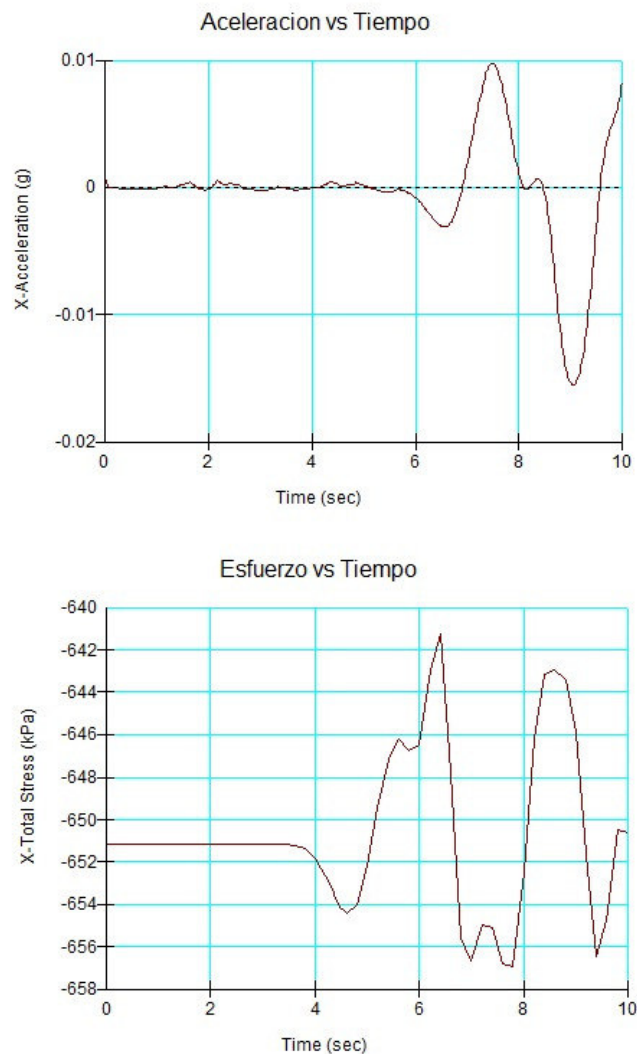


Figura 70. Gráfica de esfuerzos y aceleraciones

9.2.4 Análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos

Se considera en esta parte dos tipos de análisis: en estático y en dinámico.

- Análisis estático: El primer paso para determinar los esfuerzos generados a causa de un sismo en el modelo, es obtener los esfuerzos iniciales estáticos generados a causa del peso del talud inestable. Esto es posible realizando análisis de estabilidad con algún método de equilibrio límite.
- Análisis dinámico: Con los esfuerzos estáticos iniciales se aplicó el sismo al modelo (aceleración: 0.23g). De esta forma se generaron distribuciones de esfuerzos en la masa inestable para cada tiempo del registro aplicado. El programa aplicado permite graficar las deformaciones de ciertos nodos a través del tiempo.
- Análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos: Para realizar esto, se incluyó la distribución de esfuerzos generados en el modelo a causa de la acción horizontal y vertical de un sismo. Una vez hecho esto se evalúa diferentes superficies de falla que se generan con el programa de simulación y seleccionar las más críticas.

9.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Son dos los tipos de resultados que se pueden obtener al final del análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos: la variación del factor de seguridad durante el sismo y la deformación permanente que sufrirá la masa inestable, ambos para cada una de las superficies de falla analizadas. De todas las superficies de falla generadas en los modelos se eligieron 2, consideradas críticas, para analizarla variación del factor de seguridad y la deformación en la falla. Los criterios para seleccionarlas superficies de falla críticas fueron: la falla que presente menores factores de seguridad a lo largo de todo el sismo y otra que abarca aproximadamente la mitad del talud, Figuras 71-A, 71-b, 71-c y 71-d y 71-e.

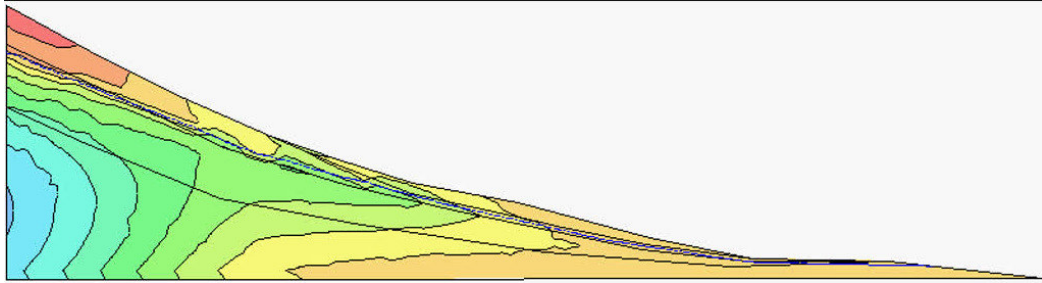


Figura 71-A: Estadío inicial: El color rojo y rosado indica la zona de deformación previa en la parte alta del deslizamiento en la zona de la escarpa principal. La zona intermedia de color amarillo

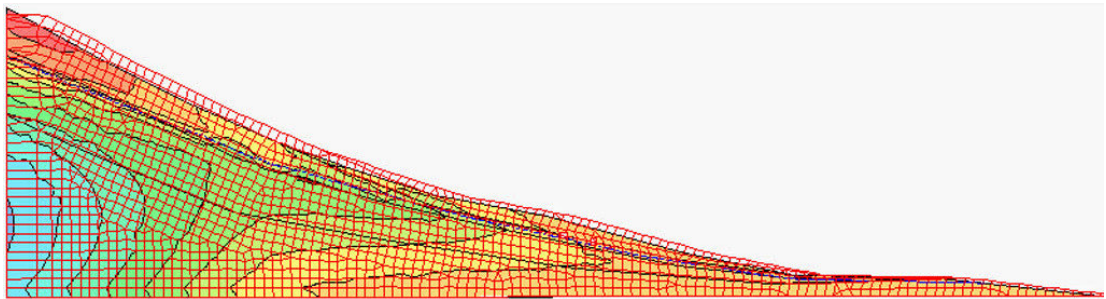


Figura 71-B: En la malla color rojo generada con elementos finitos se observa la deformación de la ladera afectada por la dinámica del deslizamiento.

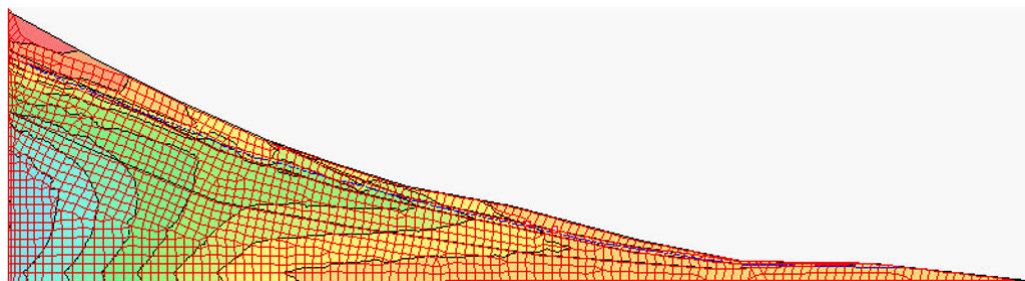


Figura 71-C. Deformación de la parte media

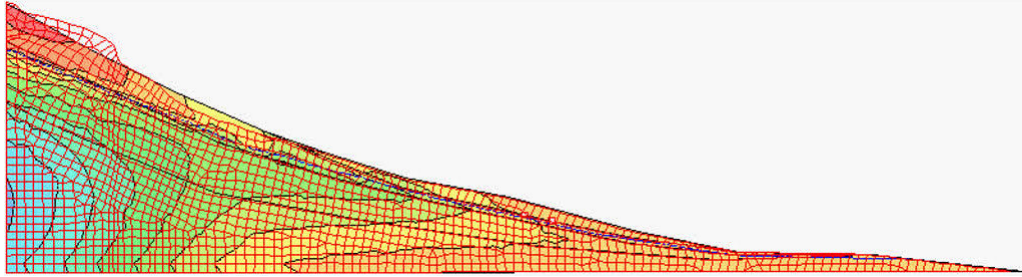


Figura 71-D: Deformación de la parte alta y baja.

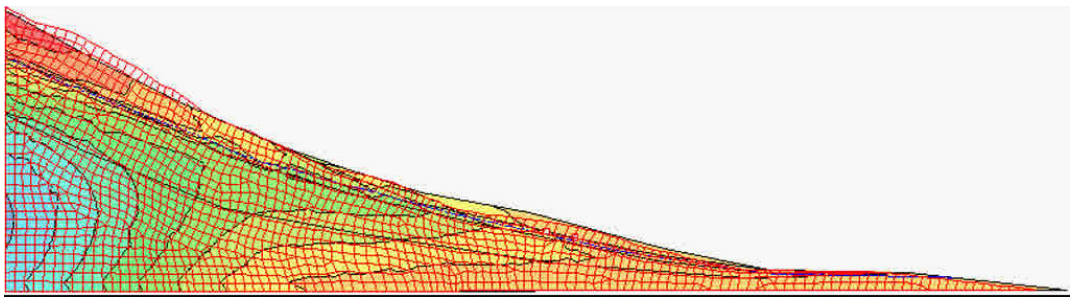


Figura 71-E: Estadío final.

CAPÍTULO X

MONITOREO GEODÉSICO DEL DESLIZAMIENTO

10.1 REDES DE MONITOREO GEODESICO: GPS Y EDM

Las observaciones geodésicas satelitales en nuestro país, relacionados al movimiento de las placas corticales, fueron iniciadas por Norabuena y otros en el año 1998, donde determinaron tasas de deformación de la placa continental con respecto a la placa oceánica.

Esta misma técnica geodésica satelital se utiliza para la vigilancia de deslizamientos activos en el valle del río Colca, que se ha realizado en dos etapas: En la primera mediante instrumentación geodésica satelital para determinar las trayectorias y tasas de movimiento de los deslizamientos desde el año 2000 al 2004. Del 2005 a la actualidad se estableció una red EDM utilizando mediciones en puntos de control dentro del deslizamiento mediante un distanciómetro electrónico.

El IGP inició la vigilancia geodésica satelital de los principales deslizamientos activos en el valle del río Colca (Maca, Lari, Madrigal) en el año 2000. Una segunda campaña se realizó en el año 2001, después del terremoto del 24 de Junio que afectó el sur de Perú.

En cada localidad se ubicaron 4 puntos de control, de los cuales uno constituye la base signado con el código 0 y los subsiguientes en la parte alta, media y baja del deslizamiento signados con los códigos 1, 2 y 3.

Los datos de campo se adquirieron con receptores GPS TRIMBLE (modelo 4100SS1) de doble frecuencia. El procesamiento de la información se ejecutó con el software GAMIT (MIT-USA).

En el año 2004 se realizó una nueva campaña GPS en los tres deslizamientos, pero optando una nueva metodología, utilizando un único punto de base (MAD0). Se requiere una nueva campaña utilizando similar metodología para el cálculo de las tasas de movimiento actual de los tres deslizamientos.

Las acciones de monitoreo se efectúan con la finalidad de conocer el fenómeno, evaluar su evolución en el tiempo y de esta forma tener herramientas para poder predecir los efectos del fenómeno.

Debido a la complejidad de los fenómenos de remoción en masa como los deslizamientos, se hace difícil tener un conocimiento del comportamiento del evento y así establecer las acciones de mitigación a corto plazo para reducir el riesgo.

10.1.1 Métodos Taquimétricos

Se utilizan diferentes métodos para la vigilancia de deslizamientos:

- **Topografía.** El control topográfico es realizado a través de mediciones de desplazamientos relativos de ciertos puntos de control superficial, identificados en campo, los cuales se determinan respecto de unos mojones construidos en terreno estable (fuera del área de influencia de los deslizamientos) que servirán de puntos de referencia, y otros puntos ubicados dentro del deslizamiento para evaluar el desplazamiento y la dirección que se produzca en el sitio de medición. Existen muchos métodos para la medida del desplazamiento. En la zona de Madrigal se emplearon:
 - **Medición electrónica de distancias.** Mediante el uso de instrumentos electrónicos como la estación total que es un teodolito con un distanciómetro que efectúa automáticamente el cálculo de coordenadas del punto visado, Figura 72 y Cuadro 13.

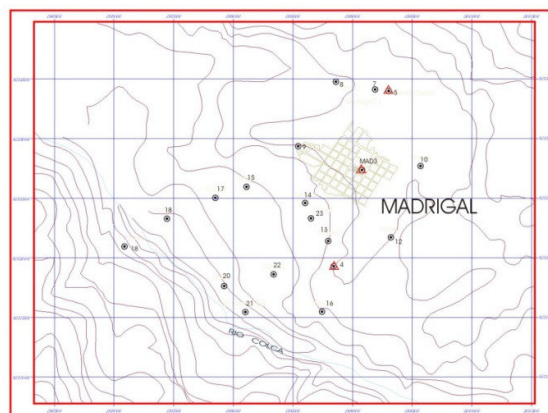


Figura 72. Ubicación de los Puntos de Control topográficos para el estudio del deslizamiento de Madrigal

Punto	X	Y	Elevación
5	199207.595	8272945.471	3374.571
4	198580.636	8271770.526	3320.250
12	198912.027	8272083.845	3275.574
16	198585.240	8271427.244	3309.055
14	198261.005	8272164.470	3290.125
15	197804.602	8272146.770	3301.434
17	197596.970	8272042.354	3259.786
18	197304.564	8271790.775	3226.497
19	197075.736	8271484.275	3127.154
20	197855.609	8271406.150	3150.050
21	198051.774	8271267.849	3159.053
22	198180.548	8271582.524	3192.322
23	198311.512	8272058.208	3258.081
A	199207.927	8273549.527	3281.890
7	199284.923	8272965.963	3357.171
8	199593.697	8273001.377	3348.457
9	199704.296	8273533.609	3272.533
10	198818.033	8273387.611	3293.450

Cuadro 13. Puntos de control con estación total obtenidos en la zona de estudio

Esta red de puntos taquimétricos se estableció por primera vez en el año 2005, donde se realizaron mediciones periódicas con una frecuencia inter- anual.



Figura 73. Base EDM desde el flanco de enfrente a Madrigal.



Figura 74. Punto de control EDM parte baja de Madrigal

Los resultados se muestran en la Figura 75.

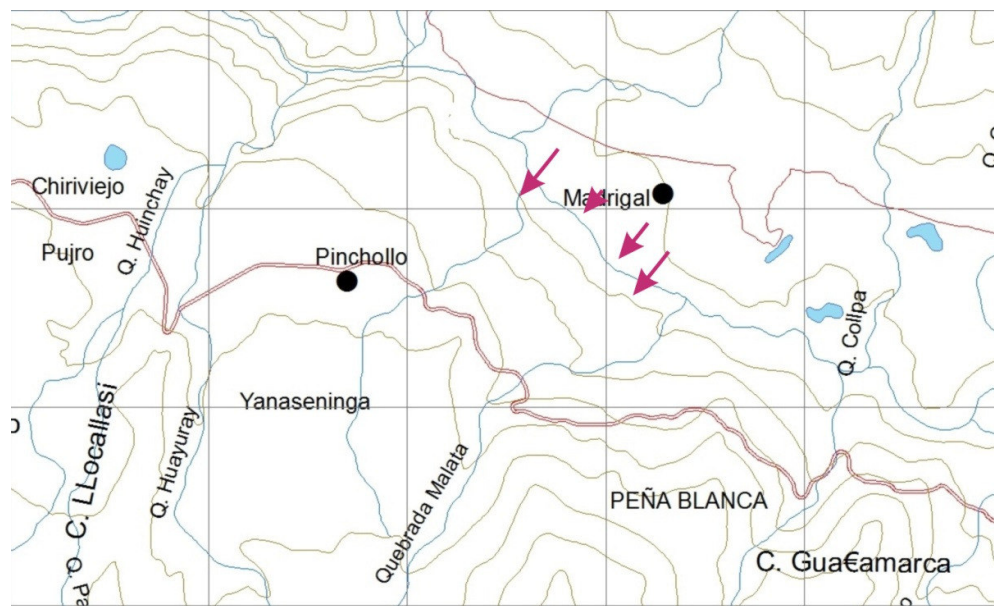


Figura 75. Las flechas en color rojo indican las tasas de desplazamiento del terreno en dirección al río Colca entre 0.40 a 0.70 m en el período 2007-2011.

- **Medición con GPS.** Se usa el método diferencial para mejorar la precisión del sistema GPS mediante la determinación de un error de posición dado desde la plataforma satelital a una estación fija conocida y

la transmisión posterior del error determinado, o factores de corrección, para las otras estaciones GPS rover que operan en el área.

En la zona de Madrigal se colocaron 5 puntos de control GPS tratando de cubrir así las principales partes del deslizamiento. Estos puntos están ubicados como se muestra en las Figuras 76 a 80.

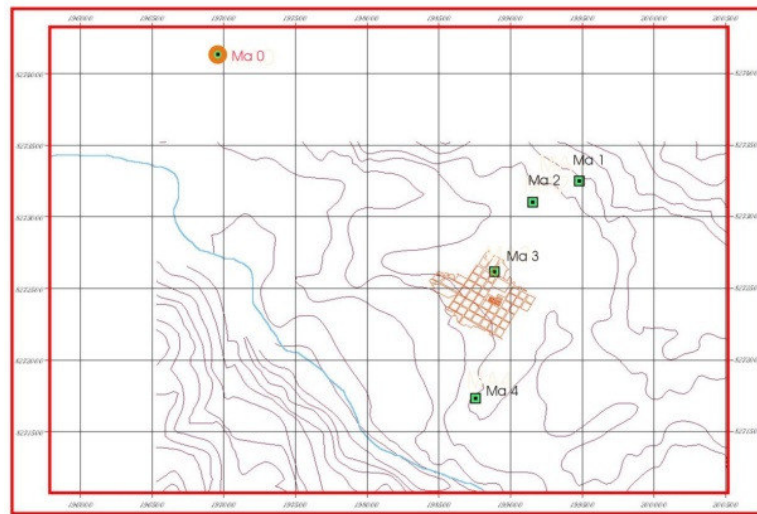


Figura 76. Ubicación de Puntos de control GPS en la zona de estudio



Figura 77. Sitio GPS MAD4 parte baja escarpa principal deslizamiento Ushina



Figura 78. Sitio GPS MAD3 parte media en inmediaciones a río Colca



Figura 79. Sitio GPS MAD 01 Ubicado en reservorio parte alta de Madrigal



Figura 80. Sitio GPS MAD02 ubicado en plaza de armas de Madrigal

Los resultados de la vigilancia GPS de los deslizamientos, datos de los años 2000 y 2001, muestran que se evidenciaron tasas de movimiento de los tres deslizamientos en promedio de 0.5 m en la componente horizontal y 0.30 m en la componente vertical, Figura 81.

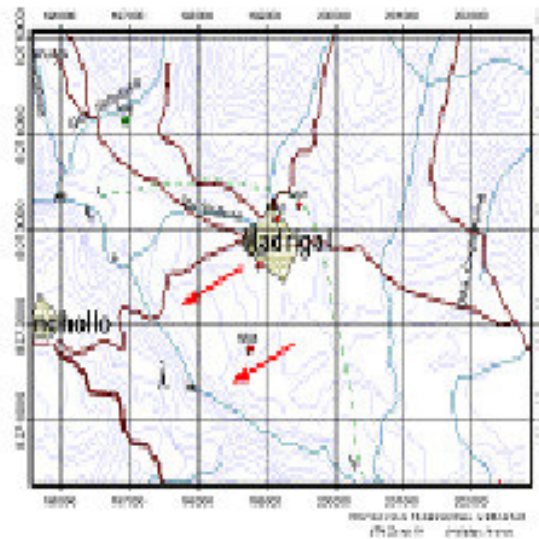
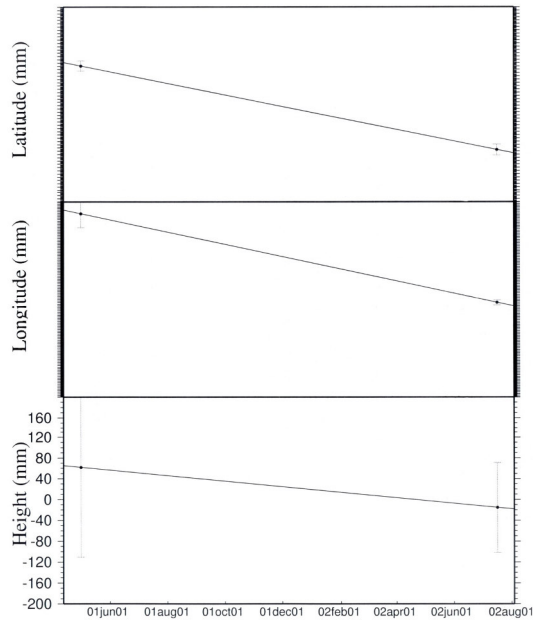


Figura 81. Flechas en color rojo muestra los vectores de desplazamiento del deslizamiento de Madrigal en promedio 0.5 m en dirección Sur.

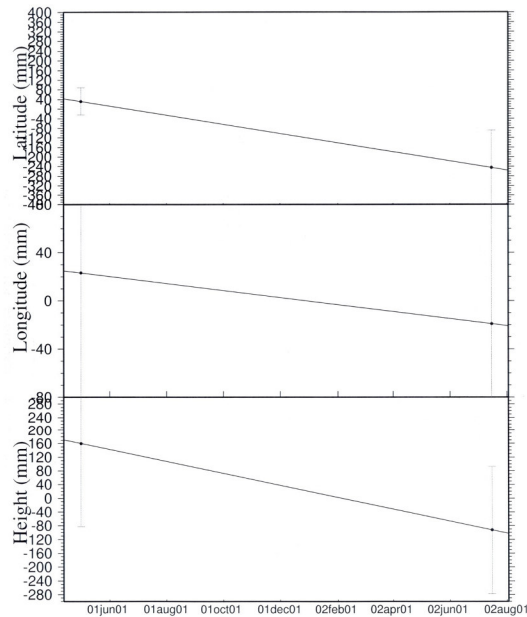
MAD4 Geographical Coordinates



GMT 2003 Jan 10 16:48:02 UM GeodesyLab

Figura 82. Punto de Control MAD4 en la parte baja del deslizamiento muestra en las 3 componentes una variación descendente que confirma el avance de la masa hacia el río.

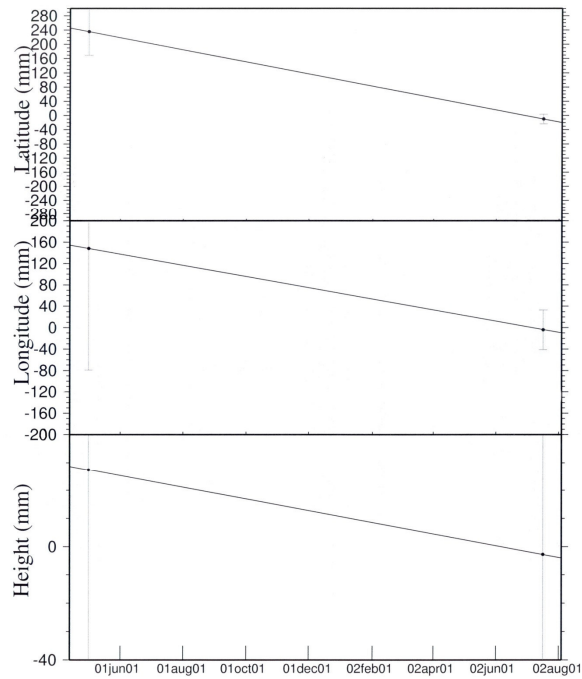
MAD3 Geographical Coordinates



GMT 2003 Jan 10 16:47:27 UM GeodesyLab

Figura 83. Punto de control MAD 3 muestra comportamiento similar a MAD4.

MAD1 Geographical Coordinates



GMT 2003 Jan 10 16:46:43 UM GeodesyLab

Figura 84. Punto de control MAD1 situado en la parte alta de Madrigal similar a los dos anteriores.

CAPÍTULO XI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis, interpretación y discusión de resultados se ha descrito ampliamente en los capítulos 4 al 10, sobre los principales datos e interpretación realizada:

- La hidrología general de la zona tiene como principal colector al río Colca que nace a 4886 msnm en las inmediaciones de Condorama (límite Arequipa-Cusco) y desemboca en el Océano Pacífico donde toma el nombre de río Ocoña.

Se analiza el parámetro de precipitación como uno de los desencadenantes de los movimientos en masa que ocurren en el valle del río Colca, denotándose que la precipitación promedio en el período 2012-2015 en la estación meteorológica en Madrigal es de 346 mm anuales, siendo los meses más lluviosos de octubre a marzo.

Los principales agentes modeladores del relieve actual en el valle del río Colca es la actividad glaciaria en la parte alta de la cuenca, zona de montañas, los procesos gravitatorios en zonas de alta y moderada pendiente y el agua en las zonas de quebradas y el colector hidrológico principal de la cuenca que es el río Colca. Estos agentes junto a la geodinámica activa de la zona han dado lugar a un paisaje agreste y complejo en la zona como son terrazas, colinas de acumulación, zona de valle represado y valle cañón, entre las principales geoformas identificadas.

- En la geomorfología y geología de la localidad de Madrigal, destacan las unidades litológicas reconocidas cuyas edades de emplazamiento van desde el Mesozoico hasta el Cuaternario Reciente. Así se tiene afloramientos del Grupo Yura: Formaciones Labra y Hualhuni durante el Jurásico y Cretáceo, ya en el Cenozoico predominó el emplazamiento de cuerpos volcánicos donde destacan los afloramientos del Grupo Tacaza, Mismi, Barroso y Colca, este último en el Cuaternario y ya en el período Reciente los depósitos aluviales, fluviales y coluviales.

En relación a la geomorfología se describen básicamente cuatro unidades geomorfológicas diferenciadas: unidad laderas, planicies altas, valle represado y valle cañón.

- La geodinámica interna de la zona de estudio incluye el análisis del vulcanismo y la sismicidad asociada a este y en general al proceso de subducción que ejerce la placa de Nazca sobre la Sudamericana.

Regionalmente el área estudiada está enmarcada por dos complejos volcánicos: Cordillera Volcánica del Chila en la margen derecha del río Colca y el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca en la margen izquierda, ambos forman parte de la Franja volcánica Cenozoica de la Cordillera Occidental.

Desde el año 1981 el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca presenta actividad sísmica recurrente cuyos focos sísmicos se distribuyen desde Pampa Sepina, extremo norte del Volcán Hualca Hualca a la altura de los poblados de Achoma y Yanque hasta las inmediaciones de Cabanaconde en el extremo occidental de esta parte del valle del río Colca. Los sismos registrados en el período 1986-1996 por el IGP reporta eventos de magnitud de hasta 6.2 Ms, uno de estos eventos en el año 1990 afectó severamente a la localidad de Maca y alrededores.

- Se utilizó el método de prospección geofísica: resistividad eléctrica, con el objetivo de determinar la profundidad del nivel freático en la zona que es la causa de la sobresaturación de los materiales y pérdida de resistencia que da lugar a la ocurrencia de los movimientos en masa que afectan Madrigal. Como resultados se obtuvo que la napa freática en Madrigal se encuentra a una profundidad promedio de 12-13 m y que en el subsuelo se diferenciaron hasta 4 capas: material de cobertura, suelo areno arcilloso, suelo gravoso y bloques fracturados como probable basamento.
- Los parámetros geotécnicos en la zona de Madrigal se obtuvieron en base a una campaña de excavaciones (calicatas) realizadas en la zona. Se realizaron 9 calicatas distribuidas en toda la localidad de Madrigal con el objetivo de conocer el tipo de suelo de cimentación, sus propiedades físicas y capacidad portante de los mismos.

En lo que respecta al análisis de estabilidad de taludes se aplicó lo utilizado para modelo de falla circular en suelos, de acuerdo a la teoría de equilibrio límite. Se utilizó el modelo de Bishop simplificado cuyo algoritmo de cálculo se encuentra dentro de las librerías del programa SLIDE que permite hacer este tipo de análisis en modo estático y pseudoestático.

Se utilizaron dos secciones transversales a los deslizamientos de Ushina y Pullhuay: A-A' y B-B' respectivamente, donde se obtuvieron valores del Factor de Seguridad en modo estático y dinámico menores a 1, lo que ratifica la condición de inestable de estas laderas.

En base al análisis de estabilidad de los taludes y las propiedades físicas y dinámicas de los suelos de cimentación en Madrigal se elaboró un modelo numérico mediante la técnica de elementos finitos que incluye previamente la elaboración de un modelo digital del terreno y el cálculo de las pendientes con el MDT elaborado, todo esto utilizando el lenguaje Octave, bajo la plataforma Matlab, obteniendo un modelo similar a lo que se obtiene con el programa QUAKE, que al final permite hacer un análisis dinámico de la estabilidad de taludes por elementos finitos, obteniéndose la variación del factor de seguridad durante un sismo y la deformación permanente que sufrirá la masa inestable, ambas para cada una de las superficies de falla analizadas. La simulación numérica arroja como resultados una deformación del talud en la parte superior, en la parte media de las lagunas también aumenta la zona de acumulación, en cambio en la parte baja muestra la deformación del terreno en función a los agrietamientos que se presentan.

- Se realizó un monitoreo geodésico realizado en el deslizamiento de Madrigal, el cual se utilizó el método geodésico satelital (GPS) y las mediciones con distanciómetro electrónico (EDM).

Las mediciones con GPS se realizaron en el período 2001-2004 con 4 puntos de control dentro del deslizamiento mediante GPS Trimble de doble frecuencia, mostrando desplazamientos de 0.5 m en promedio en las tres componentes (norte-sur, este-oeste y vertical).

Las mediciones con EDM se hicieron en el período 2007-2011, en 20 puntos de control desde dos bases localizadas en la otra margen del río

Colca (fuera del deslizamiento) obteniéndose un movimiento promedio entre 0.40 a 0.70 m.

- La vulnerabilidad física de Madrigal y las medidas de mitigación que deben realizarse para la reducción de la vulnerabilidad en esta localidad. Las alteraciones de la naturaleza por el uso territorial y la actividad antrópica son factores importantes en el análisis de la gestión del riesgo de desastres en esta localidad.

Uno de los factores de la alta vulnerabilidad de Madrigal son los suelos de cimentación sobre los que se asienta este poblado, que son heterogéneos que varían entre arenas limosas y conglomerados provenientes de depósitos aluviales y lacustres con baja capacidad portante. A esto se suma la profundidad del nivel freático a unos 12-13 m de profundidad que genera sobresaturación y pérdida de resistencia de estos suelos.

Los procesos antrópicos son también parte importante de este análisis de la vulnerabilidad, puesto que los inadecuados sistemas de riego en la zona generan una infiltración importante en los suelos de cimentación que afectan su resistencia.

Como medidas de mitigación se proponen de dos tipos: estructurales y no estructurales:

Entre las medidas de mitigación estructural se propone lo siguiente: Realizar un drenaje de coronación de 500 m. de longitud, a la altura de la cota 3340m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3235 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja con base en la zona aledaña al cauce del río Colca, en la cota 2650 msnm.

Entre las medidas de mitigación no estructural se propone lo siguiente: Capacitación en gestión de riesgo de desastres de la población de Madrigal a cargo de las entidades conformantes del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo (SINAGERD) tal es el caso del CENEPRED, INDECI, INGEMMET, IGP, entre otras.

11.2 PRUEBAS DE HIPÓTESIS

La evaluación geodinámica en el distrito de Madrigal ha permitido hacer una caracterización geológica detallada del deslizamiento de tipo rotacional que afecta la seguridad física de esta localidad. De esta forma se ha cartografiado las partes del deslizamiento desde la escarpa principal en la cabecera del evento que presenta un salto de 20 a 25 m y una longitud de 2100 m ocupando un área de 120 has.

La dinámica del deslizamiento no es uniforme en toda el área desestabilizada, así en la zona de desprendimiento junto a la escarpa principal los movimientos en masa son paralelos a la escarpa principal, en cambio en la zona de acumulación en la parte baja del deslizamiento, existe una dinámica de compresión que se evidencia por la gran cantidad de agrietamientos. También se destaca en la parte media del deslizamiento la presencia de lagunas y bofedales.

Siguiendo la estructura de la investigación, me ha permitido proponer el modelo geotécnico del deslizamiento de Madrigal que se ha obtenido en base a una simulación numérica utilizando elementos finitos, teniendo como base el análisis de estabilidad de taludes con el método de Bishop obteniéndose los factores de seguridad tanto en estático como en dinámico con valores menores a 1, es decir, se mantiene inestable la ladera en las condiciones actuales, cumpliéndose la hipótesis planteada en la presente investigación.

La simulación numérica arroja como resultados una deformación del talud en la parte superior, en la parte media de las lagunas también aumenta la zona de acumulación, en cambio en la parte baja muestra la deformación del terreno en función a los agrietamientos que se presentan.

En base a lo descrito líneas arriba, ha permitido proponer las siguientes medidas de mitigación estructural que permitirá reducir la vulnerabilidad física de la localidad de Madrigal, por lo tanto se ha cumplido la prueba de hipótesis planteada:

Realizar un drenaje de coronación de 500 m. de longitud, a la altura de la cota 3340m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3235 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja con base en la zona aledaña al cauce del río Colca, en la cota 2650 msnm.

11.3 RESULTADOS

11.3.1. Aspectos geológicos y geotécnicos

La geodinámica externa de Madrigal fue abordada mediante el análisis por fotointerpretación de fotografías aéreas multitemporales entre 1955 y 1997 que permitió estimar que el área inestabilizada en Madrigal se incrementó en 0.6 km². Asimismo, es de destacar que el área inestabilizada afecta el 60% del área urbano-rural de Madrigal.

La geodinámica de los movimientos en masa en Madrigal está gobernada principalmente por el deslizamiento rotacional que afecta la seguridad física de esta localidad. De acuerdo a las investigaciones revisadas desde el año 1959, luego de un fuerte sismo se reactivó este deslizamiento ocurriendo derrumbes en la escarpa principal, luego también tuvo reactivaciones luego de los sismos de 1990 y 2001. Cabe resaltar que, actividades antrópicas también han generado reactivaciones del deslizamiento, como son riego por inundación en terrenos de cultivo y canales de regadío no impermeabilizados.

Se han delimitado dos deslizamientos rotacionales el de Pullhuay que se localiza en la parte baja de Madrigal y el de Ushina en el extremo oeste de la localidad. El evento principal por afectar a la parte urbana de la localidad es el de Pullhuay que presenta un salto promedio de 20 a 25 m, ocupan un área de 120 has aproximadamente y la escarpa principal tiene una longitud aproximada de 2100 m.

Geotécnicamente se diferenciaron en Madrigal cinco tipos de suelos: GP-GC, SC y ML principalmente, los granulares en las inmediaciones del río Colca, los limosos en las zonas agrícolas y los arenos arcillosos en las inmediaciones de la parte urbana. Las capacidades portantes de los suelos varían entre 1.13 a 2.79 kg/cm².

De acuerdo al mapa de zonificación sísmica del Perú del año 1997, que utiliza la norma sismoresistente 030, la zona estudio se encuentra en la zona 3 que caracteriza a aquellas áreas en donde el potencial sísmico es alto debido a la ocurrencia de sismos de magnitud elevada que producen aceleraciones mayores a 300 cm/seg².

11.3.2. Vulnerabilidad física de Madrigal

Las alteraciones de la naturaleza introducidas por el uso territorial y la actividad antrópica y/o tecnológica son factores importantes en la evaluación de los peligros naturales. Estos factores, se reflejan en el incremento de la peligrosidad de algunos fenómenos naturales como: Desestabilización de material geológico en pendientes, creación de zonas inundables, alteración del comportamiento del terreno por variación de presión de poros, deforestación, cortes en terrenos blando o inconsolidados, etc.

Son notables los efectos de desestabilización causados por cortes y rellenos en carreteras, la conversión de forestas en terrenos agrícolas, alteración de la presión de poros por irrigaciones en terrenos porosos y en pendientes, obstáculos en cursos de agua, los efectos de los relaves mineros, la sobrecarga de terrenos sueltos, los efectos y modificaciones de los desarrollos residenciales y ocupación poblacional de terrenos sin planificación.

Por otro lado, un uso racional del territorio resulta en aumento de la estabilidad de zonas peligrosas disminuyendo, por ejemplo, la velocidad de erosión de los terrenos por agentes naturales, o protegiendo zonas inundables, etc.

En el caso específico del área de estudio, los cortes de carreteras, los desechos mineros y algunos canales de irrigación constituyen un factor que incrementa la peligrosidad a la ocurrencia de fenómenos geológicos superficiales. Por otro lado, el Valle del Colca es un ejemplo de protección de las pendientes contra la erosión hídrica por el extraordinario desarrollo de terrazas o andenes de cultivo, los cuales guían el curso del agua en terrenos nivelados. Además, los árboles y arbustos cultivados ayudan parcialmente a la estabilidad del material geológico en las pendientes del terreno. Sin embargo, la conservación actual del sistema de andenes, en particular en el área de Madrigal es deficiente, por lo que no funcionan adecuadamente.

El poblado de Madrigal como se explica en párrafos anteriores se asienta sobre depósitos fluvio-lacustrinos compuestos por areniscas, limolitas y conglomerados constituyen los terrenos y suelos de cimentación. El basamento está conformado por conglomerados fluviales y limolitas lacustrinas del Grupo Colca.

En el deslizamiento retrogresivo activo de Madrigal, los materiales inconsolidados, los afloramientos y filtraciones de agua son los principales peligros del pueblo del mismo nombre, por lo que presenta un alto grado de vulnerabilidad física, en base a los elementos expuestos de la localidad.

En la localidad de Madrigal se han identificado alrededor de 40 viviendas, 2 puentes carrozables, dos vías de comunicación, una escuela, 35 parcelas agrícolas, una línea eléctrica de conducción de media tensión y el cementerio, como elementos expuestos vulnerables a los deslizamientos activos.

11.3.3 Medidas de mitigación estructural y no estructural para la reducción de la vulnerabilidad

Para tratar y controlar la dinámica de los deslizamientos y otros fenómenos de remoción en masa es necesario conocer la: geometría del deslizamiento, su estructura geológica, el comportamiento hidrogeológico y el grado de estabilidad del talud.

En el caso del deslizamiento de Madrigal, los aspectos físicos se describieron en los capítulos anteriores, lo que permite plantear las medidas correctivas, técnica y económicamente adecuadas.

Entre las medidas de mitigación estructural se debe considerar las siguientes:

11.3.3.1 Tratamiento de la superficie del talud

El cambio de la forma del talud y su pendiente es el modo más natural para su estabilización. Así por ejemplo, los Incas utilizaban las pircas o andenerías, logrando un factor de seguridad adecuado.

Para el caso del deslizamiento de Madrigal una de las soluciones a recomendar para estabilizar el pie del deslizamiento es utilizar estructuras denominados rellenos estabilizadores al pie del talud, tal como se grafica en la Figura 85.

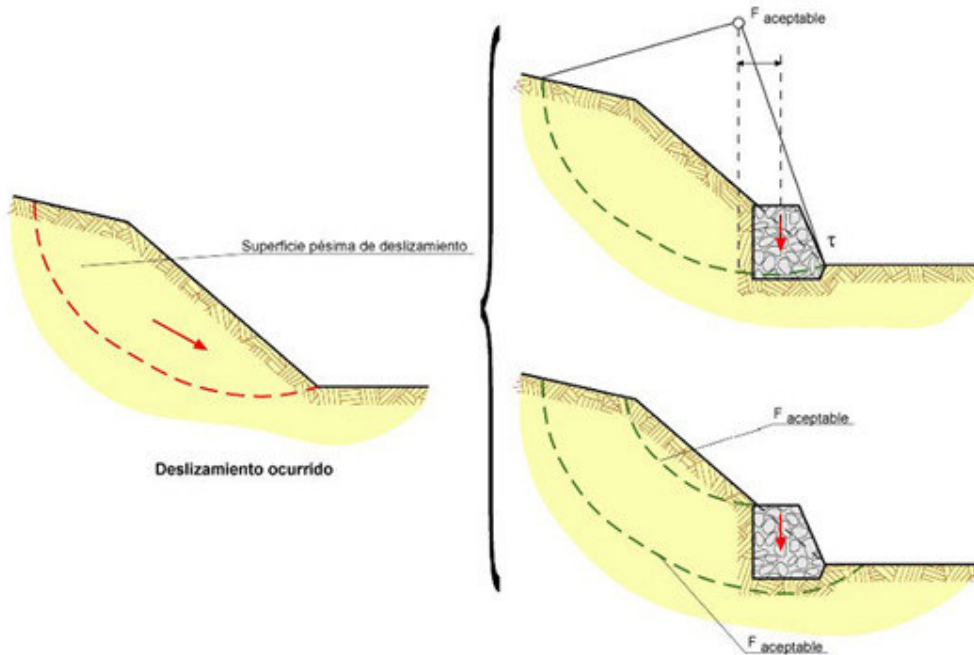


Figura 85. Rellenos estabilizadores al pie del talud.

11.3.3.2 Estructuras de sostenimiento

Este tipo de estructura debe diseñarse en Madrigal para el sostenimiento de la masa deslizante, generalmente son estructuras rígidas de concreto armado, gaviones y otros materiales de similar resistencia al empuje del deslizamiento. Deben ubicarse tanto en la parte inferior del deslizamiento o en posiciones intermedias a fin de controlar pequeños deslizamientos dentro de una masa deslizante mayor. Se suelen denominar como: contrafuertes, muros de sostenimiento o contención, pilotes aislados o muros pilotes, etc, Figuras 86 y 87.

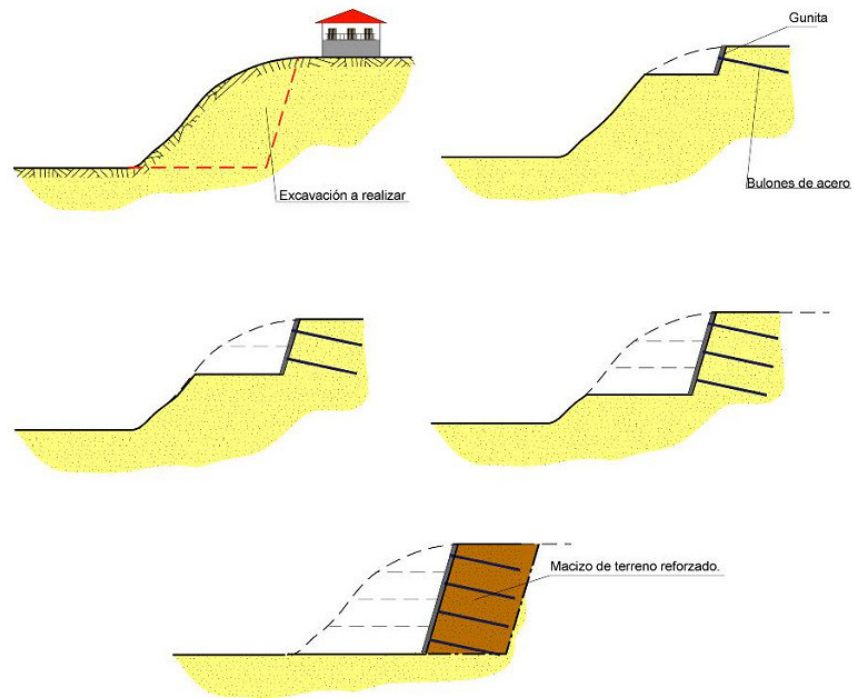


Figura 86. Esquema de estructuras de mitigación en la cabecera del deslizamiento de Madrigal.



Figura 87. Estructura tipo gaviones adecuadas para estabilizar zonas de escarpas de deslizamientos con su respectivo sistema de drenaje en talud. Este tipo de infraestructura se propone utilizar en Madrigal.

11.3.3.3 Zanjas de drenaje

Asimismo se deben proyectar zanjas de drenaje en la parte alta de Madrigal que reduzcan el área de infiltración.

11.3.3.4 Sistema de riego por goteo

Las parcelas agrícolas situadas en la parte media-baja del poblado se han venido regando por un sistema de gravedad, es decir, inundación de la zona agrícola, generando una mayor infiltración del agua en el subsuelo, la cual afecta la estabilidad de los terrenos en la parte baja.

Desde el año 2004 ya se viene implementando un sistema de riego más tecnificado: por goteo y aspersion. Un 30% del área agrícola se riega de esta forma, falta mayor apoyo técnico para elevar ese porcentaje y reducir la infiltración de las aguas de escorrentía.

Los canales de derivación del agua para riego que viene de aguas arriba, debe cementarse para evitar se filtre en el subsuelo, aumentando la sobrecarga en los terrenos circundantes al río Colca.

No se deben utilizar los terrenos desestabilizados como parcelas agrícolas, deben primeramente realizar movimientos de tierra para hacer terraplenes con drenajes que permitan derivar las aguas al río.

11.3.3.5 Otras medidas

Otras medidas que influyen de manera significativa a mantener la estabilidad de los taludes naturales son:

- Se debe reducir y controlar la filtración en todas las zonas susceptibles a deslizar, mediante el uso de membranas impermeabilizantes. También se pueden utilizar tuberías de desviación de las aguas de infiltración.

- Debe fomentarse el sembrío de árboles de raíces profundas en las masas deslizantes de poca profundidad. Estos servirán a la vez como indicadores del movimiento que pueden experimentar los terrenos.

En base a la descripción de los párrafos anteriores, se propone el diseño de la siguiente infraestructura para la reducción de la vulnerabilidad física del poblado: Realizar un drenaje de coronación de 500 m de longitud, a la altura de la cota 3290 m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3090 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja con base en la zona aledaña al cauce del río Colca y terrazas con drenaje en la parte media para disminuir la carga hidráulica.

De esta forma, en la figura 88 se muestra la Sección A-A' que atraviesa Madrigal hasta el río Colca y cuya sección como se analizó anteriormente sin intervención (sin las medidas de mitigación estructural propuestas) se tiene un talud con $FS = 0.913$, figura 89A y con la intervención y modificación del talud se obtiene un $FS = 1.371$, es decir un talud estable, Figura 89B.

La Figura 90 gráfica la sección A-A' con talud estable mostrando el detalle de la infraestructura propuesta, como son: drenaje de coronación en la parte alta de Madrigal, terracedo en la zona de escarpa principal con banquetas y drenaje y finalmente en la parte baja junto al río Colca infraestructura de defensa ribereña.

Entre las medidas de mitigación no estructural se tienen las siguientes:

- Capacitación en gestión de riesgo de desastres de la población: Las entidades que conforman el SINAGERD (sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre) vienen desarrollando talleres participativos con la

población de Madrigal y localidades aledañas informándoles sobre los peligros naturales en su localidad y como coexistir con éstos.

Desde el año 2001 se vienen impartiendo talleres de difusión por parte de los organismos técnicos-científicos que en ese año pertenecían al SINADECI y actualmente al SINAGERD, que consisten en talleres participativos en colegios e institutos del distrito.



Figura 88. Vista de la sección A-A' que atraviesa perpendicularmente Madrigal y la zona de deslizamiento hasta el río Colca

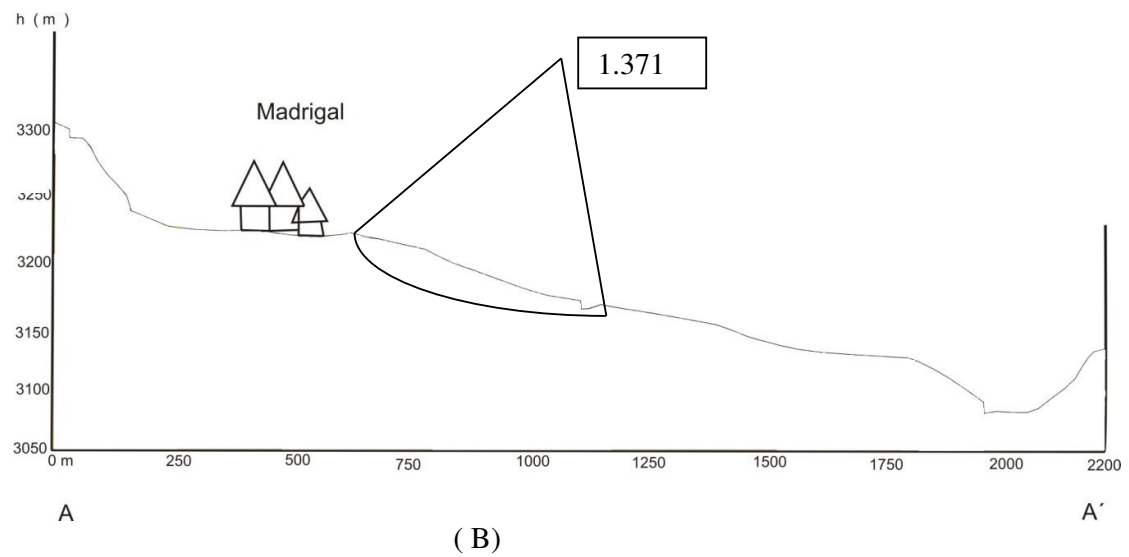
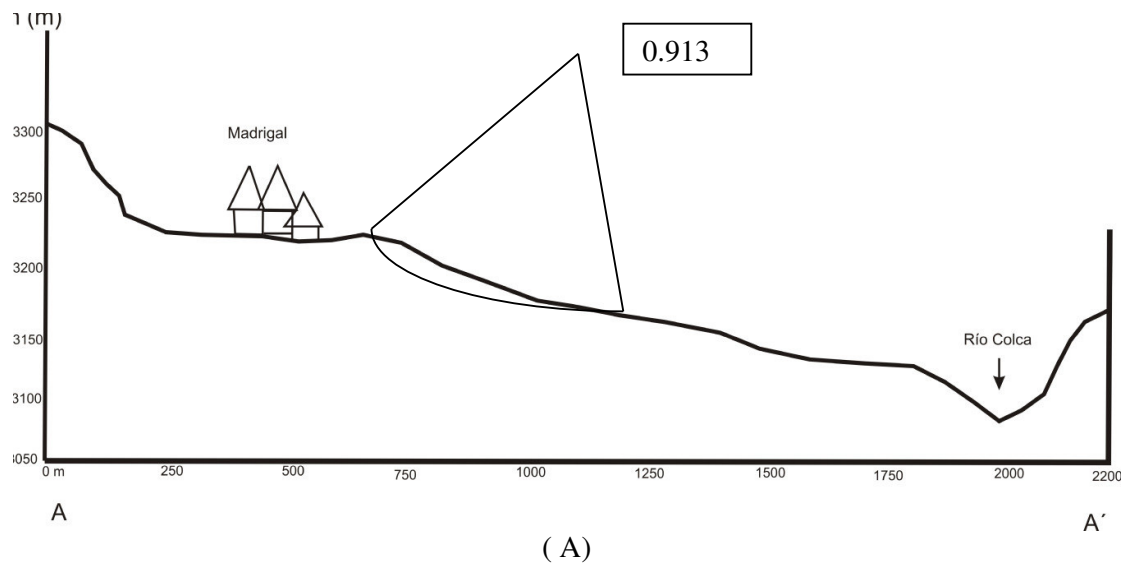


Figura 89. (A) Sección topográfica actual donde el factor de seguridad calculado es 0.93 (Inestable) (B) Sección topográfica intervenida donde mejora el F.S. = 1.3 (Estable).

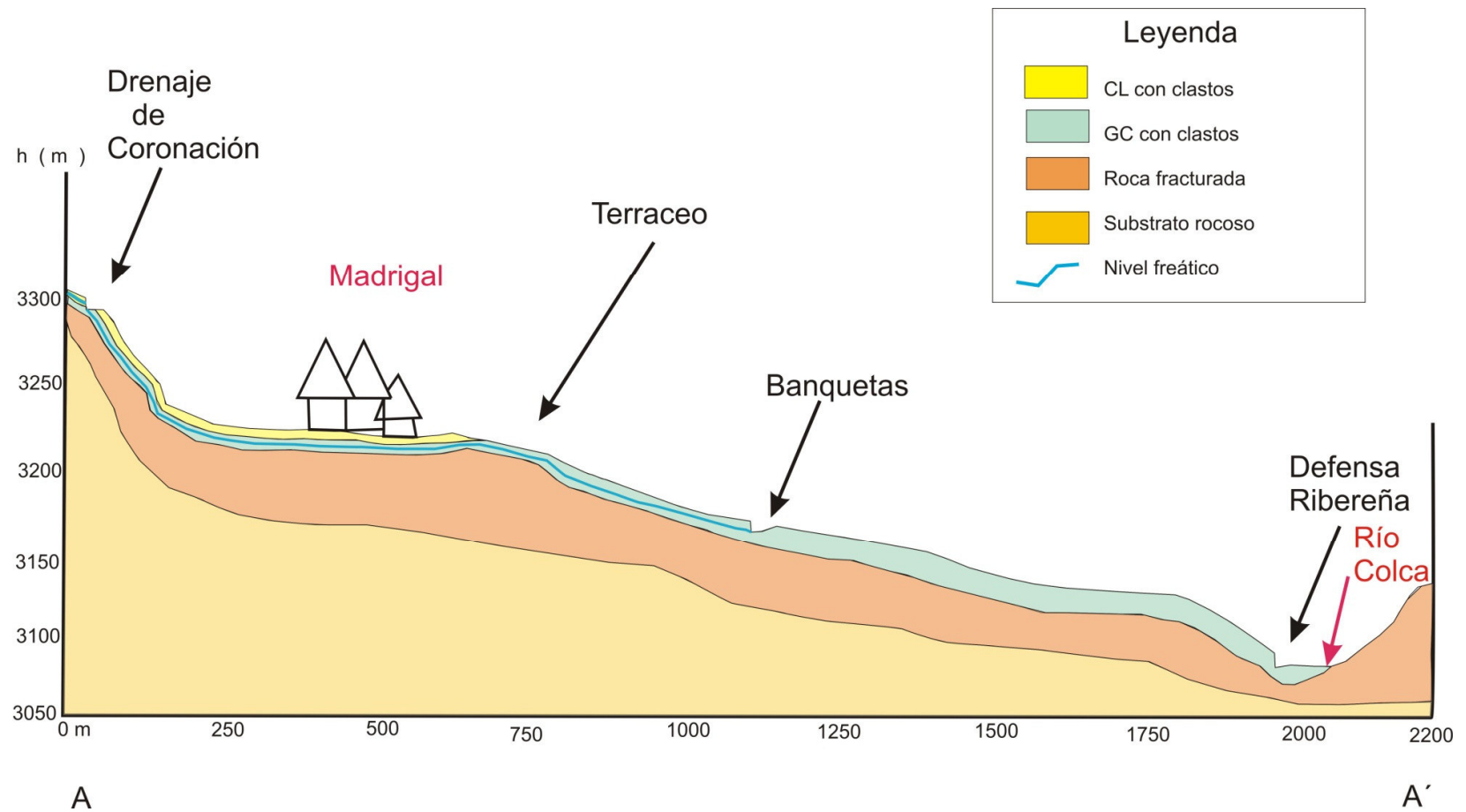


Figura 90. Perfil transversal de Madrigal y zona de deslizamiento donde se muestra la infraestructura propuesta para la reducción de la vulnerabilidad de esta localidad a los deslizamientos activos.

CONCLUSIONES

- La geodinámica en la localidad de Madrigal tiene como antecedente la ocurrencia de un evento geológico extremo que cambió la configuración morfológica del valle del río Colca, la avalancha de escombros por el colapso de la ladera Norte del volcán Hualca Hualca, este evento represó las aguas del río Colca y conformó un gran paleolago, luego de la desaparición de este, quedaron como evidencia los depósitos lacustres, que conforman los suelos de cimentación de esta localidad. Sobre estos suelos se han originado deslizamientos recurrentes, de tipo rotacional. La escarpa principal muestra un salto promedio de 20 a 25 m y una longitud aproximada de 2100 m.
- Los estudios geofísicos realizados en Madrigal fueron utilizando el método de resistividad eléctrica que permitieron delimitar la napa freática a una profundidad promedio de 12-13 m y en el subsuelo delimitar hasta 4 capas: cobertura, suelo areno arcilloso, suelo gravoso y bloques fracturados como probable basamento.
- El análisis de estabilidad del deslizamiento de Madrigal en base a las investigaciones geotécnicas y los estudios geofísicos arrojó que en estado estático resultó un FS de 0.8 y en estado pseudoestático un FS de 0.5 en promedio.
- El modelado geotécnico basado en el método de elementos finitos arroja como resultado una deformación del talud en la parte superior entre la cota 3265 y 3250 m, en la parte media de las lagunas también aumenta la zona de acumulación entre las cotas 3210 y 3180 m, en cambio en la parte baja muestra la deformación del terreno en función a los agrietamientos que se presentan entre las cotas 3145 y 3080 m.
- La geología local en la zona la conforman una cobertura superficial conformada principalmente por depósitos Cuaternarios de origen fulvio-aluvial, con un substrato rocoso volcánico de naturaleza traquiandesítico del Grupo Colca y Tacaza principalmente.

- La geomorfología en las inmediaciones de Madrigal la conforma un sistema de terrazas, la zona próxima al cañón (laderas empinadas) y la zona de montañas y la zona de valle represado.
- Las investigaciones geotécnicas (calicatas) permitieron diferenciar cinco tipos de suelos: GP-GC, SC y ML principalmente, los granulares en las inmediaciones del río Colca, los limosos en las zonas agrícolas y los areno arcillosos en las inmediaciones de la parte urbana.
- Se realizaron dos tipos de monitoreos geodésicos en el deslizamiento de Madrigal: El primero con GPS de doble frecuencia en el período 2001-2004 con desplazamientos de hasta 0.50 m en las componentes N-S, E-W y vertical. El segundo utilizando distanciómetro electrónico en el período 2007-2011 con tasas de movimiento entre 0.4 a 0.7 m.

RECOMENDACIONES

- Como actividades de mitigación estructural se propone diseñar drenes de coronación en la cabecera de las principales quebradas que colindan con Madrigal (Sahuayco y Callumayo) y canales secundarios en el poblado y parte baja, para evitar la saturación de los suelos blandos.
- En el pie del río Colca se deben diseñar gaviones para evitar la erosión de las terrazas bajas.
- La Municipalidad distrital de Madrigal en coordinación con el IGP deberá continuar con los monitoreos geodésicos en la zona desestabilizada para corroborar que las medidas de mitigación estructural que se deben realizar contribuyan a estabilizar la zona en el corto y mediano plazo.
- Se recomienda mejorar los sistemas de riego de las parcelas agrícolas, actualmente el sistema de riego, principalmente, es por inundación. Debe usarse la técnica de riego por aspersión, algunos agricultores ya lo utilizan pero debe masificarse este uso.
- Los canales de derivación del agua para riego que viene de aguas arriba, deben cementarse o impermeabilizarse con geomembranas, para evitar se filtre en el subsuelo, aumentando la sobrecarga en los terrenos circundantes al río Colca.
- No utilizar los terrenos desestabilizados como parcelas agrícolas, deben primeramente realizar movimientos de tierra para hacer terraplenes con drenajes que permitan derivar las aguas al río.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albalagan R. (1992). Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, USA. pp 861-871.
- Alva, J. (1994) Análisis de estabilidad de taludes. Curso de Postgrado. CIP-Lima.
- Alva, J. (2005) Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú. Simposio Internacional de Geotecnia. UNI-Lima.
- Antayhua Y., H. Tavera, I. Bernal, H. Palza, y V. Aguilar. (2002). Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1988) Región del volcán Sabancaya (Arequipa). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, vol. 93, p63-72.
- Antayhua Y. y H. Tavera. (2004). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa). Monografía. Instituto Geofísico del Perú. Centro Nacional de Datos Geofísicos, Lima-Perú.
- Bevis M. and Isaacks L. (1984) Hypocentral trend surface analysis: probing the geometry of Beniof zones. J. Geophys. Res., 89, 6153-6170.
- Bouchra Haddad (2007), Tesis doctoral "Modelización numérica mediante elementos finitos y SHP de los geomateriales fluidificados: Aplicación a los deslizamientos rápidos de ladera". Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Bulmer M.H., Johnston A. K., Engle, F.C. and Salas G.(2002) Seismically Triggered Slope Failures in Colca Valley, Southern Peru, Center for Earth and Planetary Studies. National Air and Space Museum.
- Campbell R.H., D.J. Varnes, R.W. Fleming, M.A. Hampton, E.E. Brabb, D.R. Nichols, D.B. Prior, and D.A. Sangrey. (1984). Landslide classification for identification of mudflow and other landslide hazards. USGS Open File Report 84-760.

- Casaverde, L. y Vargas, J. (1980) Zonificación sísmica del Perú, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-resistente, OEA-PUCP, Lima.
- Chávez J. E. (2004) Contribución al conocimiento de la geodinámica de Lari. Tesis de Ingeniero geólogo. UNSA-Arequipa.
- Deblasio F. V. (2001) Numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flow. *Landslide Hazard and Risk Bull.*
- Espinoza y Niño (2001) Métodos de elementos finitos. Notas de Curso de modelación Numérica en Ingeniería. Facultad de Ingeniería. UNAM-México.
- Figueroa G. (2009). Estudio geotécnico para reservorios de Anangaya – Chivay. Tesis. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- García, W. (1966) Deslizamiento en el Cerro Quehuisa en los distritos de Laria y Madrigal. Boletín No. 13 Serie Comisión Carta Geológica Nacional, INGEMMET. Compilación de Estudios Geológicos, pág. 88-95.
- Gómez J., J.L. Macías, C Siebe. Y L Ocola. (2004^a). Secuencias Lacustrinas en el Valle del Colca-Arequipa: Paleolagos Colca y Canocota. Resúmenes Extendidos XII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial No. 6. pp. 451-454. Lima.
- Gómez J., J. L. Macías, C. Siebe y L. Ocola. (2004b). Delimitación y Análisis Sedimentológico de la Avalancha de Escombros del Volcán Hualca Hualca, Valle del Colca-Arequipa, Perú. Resúmenes Extendidos XII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial No. 6. pp 451-454. Lima.
- Gómez J. (2010) Mediciones GPS en el deslizamiento de Madrigal, Valle del río Colca – Arequipa. Publicación interna IGP.
- González Gómez E. (2003), Tesis doctoral “Aspectos geomecánicos de los deslizamientos rápidos: Modelización y diseño de estructuras de contención”. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Guillén J. (1986). Geología aplicada al canal de la Toma Tuti. Tesis. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

- Huaco, D. (1981). Peligro sísmico para la zona del Proyecto Olmos. Instituto Geofísico del Perú, Reporte Interno, 45 p.
- Huamán-Rodrigo D., J. Chorowicz, R. Guillande, A. Antallaca, R. Cáceres, A. Aguilar. (1993). Remote sensing contribution on seismotectonic hazard in active volcanic area (Nevado Sabancaya, southern Perú). Communication Second International Symposium on Andean Geodynamics. Oxford, UK. Sept. 93
- Huamán D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (Región del Colca, Arequipa, Perú).
- Huamán R., David (1996) New data on the geodynamics of southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics* 259. 153-169. Elsevier.
- INGEMMET (2014) Estudio Geoambiental en la cuenca del río Colca. Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica No. 57. Pág. 222.
- Kaneoka, I., & Guevara, C. (1984) K/Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean Volcanic rocks, Southern Perú. *Geochemical Journ.* 18, 233-239.
- Klinck B.A., R.A. Allison, M.P. Hawkins, O. Palacios, J. De La Cruz y N. De La Cruz. (1993). Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca – sur del Perú. INGEMMET. Boletín N°42, Serie A. Lima, Perú
- Lacroix P.(2014) Caracterización de los procesos sísmicos y gravitacional sobre el deslizamiento de Maca (Colca). XV Congreso Peruano de Geología. Pág. 88-91
- Lakubovski V. & Liajov L. (1980) Exploración geoelectrica. 3ra. Edición. Editorial Reverté. España.
- Medina, J. (1991) Fenómenos Geodinámicos: Estudio y medidas de tratamiento. Soluciones Prácticas (ITDG), Lima. 85p.
- Mena V., (1966) Reconocimiento Geológico Preliminar del Valle del Colca entre Yanque, Achoma, Maca y Lari, FGGF – UNAS-Arequipa (Tesis de Bachiller)

- Norabuena E., G.L. Leffler, A. Mao, T. Dixon, S. Stein, IS. Sacks, L. Ocola, M. Elis. (1998). Space geodetic observations of Nazca- South América convergence across the central Andes. *Science* 279, 358-362.
- Núñez N. (1992). Estudio de las reservas de la mina Madrigal. Tesis. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Ocola L., J. C. Gómez, J. L. Macías, C. Siete y F. COF. (2004). INFORME FINAL: Paleo eventos geológicos en el Sector Medio del Valle del Colcha - Arequipa (entre Cipayo y Cabanaconde) y peligros geológicos asociados. Proyecto No. 075-CONCYTEC-IGP. Instituto Geofísico del Perú y CONCYTEC, Lima, Perú.
- Ocola L. y Gómez J. (2005a). Size and magnitude scales for surface geological phenomena hazard assessment: An exercise in the Colca Valley.
- Ocola L. y Gómez J. (2005b) Memorias sobre el Peligro Geológico en el valle del río Colca- Arequipa. Publicación interna IGP.
- Olaya Ferrero, V. (2004), "Hidrología computacional y modelos digitales del terreno". <http://heart.sf.net/textos>.
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). (1973). Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa: cuenca de río Camaná-Majes. Lima, Perú.
- Pacheco E. (1976) Geología del Valle del Colca entre Madrigal y Coporaque. Tesis de grado para título Ing. Geólogo. Universidad Nacional San Agustín- Arequipa.
- Palacios O. y B. A. Klinck. (1987). Evidencias de embalse volcánico en el Valle del Colca. VI Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. Lima, Perú
- Palacios D. y Gómez J. (2008) Caracterización de avalanchas de escombros en los valles de los ríos Colca y Cotahuasi – Arequipa. Sociedad Geológica del Perú. Resúmenes extendidos Congreso de Geología. Lima.
- Panitz J.S.P. (2004) Geología, geotecnia y geomecánica de la localidad de Maca. Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Geológica Facultad de Geología y Minas, UNSA Arequipa 204 p.

- Peñaherrera, Carlos. (2004). Enciclopedia Temática del Perú: Geografía. Vol V. Empresa Editorial El Comercio. Lima, Perú.
- Quispevana y Navarro P. (2001) Mapa geológico de Chivay actualizado. INGEMMET.
- Sebrier M., J.L. Mercier, F. Megard, G. Laubacher, E. Carey-Gailhardis. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of South Perú. *Tectonics*, Vol. 4(7), pp739-780.
- Skinner, B.J. & Porter, S.C. (1992): *The Dynamic Earth: an introduction to physical geology*. II edition, John Wiley & Sons, Inc. New York. 570 p.p.
- Stauder (1975) Subduction of the Nazca Plate under Perú as evidenced by focal mechanisms and seismicity. *J. Geophysical. Res.* 80, 1053-1064.
- SENAMHI (2015) Registros de temperatura y lluvia de la red nacional de hidrometeorología. Boletín en línea: www.senamhi.gob.pe
- Suárez D.J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Santa Fé, Colombia.
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. En: A. Udías y E. Buforn (ed.). *Sismicidad y sismotectónica de Centro y Sudamérica*. Física de la Tierra, UCM., N°10, 187-219.
- Ticona, P., Sánchez, A., Romero, D. & Cruz, M., 2002. El cañón del Colca (Arequipa-Perú): evolución geomorfológica y estratigrafía. En: S.G.d. Perú (Editor), XI Congreso Peruano de Geología, Lima (Perú).
- Thouret J.Cl, R. Gillande, D. Huamán, A. Gougard, G. Salas, et J. Chorowicz. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Perou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bull. Soc. Géol. France*, t 165, N° 1, 49-63.
- Thouret J.Cl., A. Gougard, M. Uribe, A. Rodríguez, R. Guillande, and G. Salas. (1995). Survey and SPOT remote sensing of the current activity of Nevado Sabancaya stratovolcano (south Perú): Assessment for hazard zone mapping. *Z. Geomorph. N.E.* 39(4), Gebruder Borntraeger, D-14129. Berlin. D70176 Stuggart, Germany, 515-535.

- Úbeda, J. (2010) Impacto del cambio climático en las reservas hídricas sólidas y riesgos hidrovulcánicos asociados en los estratovolcanes tropicales en el sur de Perú. Tesis doctoral. Facultad de Geografía. Universidad Complutense de Madrid – España.
- Ulloa F. (2011) Manual de Gestión del riesgo de desastres para comunicadores sociales. ONU, Lima.
- UNISDR (2009) Terminología sobre reducción de riesgo de desastres. Naciones Unidas.
- Varnes D.J. (1986). Landslide hazard zonation. A review of Principles and Practice. UNESCO Press, Paris.
- Whalley W.B. (1984). Rockfalls. En "Slope instability". Edited by. D. Brunsten, D.B. Prior. John Wiley & Sons. New York, USA.
- Wilches Chaux, G. (1989) Desastres, Ecologismo y Formación Profesional: Herramientas para la Crisis. Servicio Nacional de Aprendizaje, Popayán.
- Zavala, B., Fidel, L. (1994) Estudio Geodinámico del Valle del río Colca, Boletín Serie C Estudios Geodinámicos. INGEMMET, Lima.
- Zavala, B., Vilchez, M.,y Rosado M. (2009) Aspectos geodinámicos en los distritos de Lari, Madrigal y Maca. Informe técnico INGEMMET, Lima.