

Informe Técnico N° A6746

ESTUDIO GEOLÓGICO, GEODINÁMICO Y MONITOREO GEODÉSICO EN EL DESLIZAMIENTO DE MADRIGAL

Distrito Madrigal
Provincia Caylloma
Región Arequipa



POR:

GAEL ARAUJO
CHRISTIAN HUAREZ
EDU TAIPE
RAFAEL MIRANDA

SEPTIEMBRE
2017

 SECTOR ENERGIA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

INDICE:

RESUMEN	4
CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES	5
1.1. Ubicación y Accesibilidad	5
1.2. Clima y Demografía	5
CAPITULO II. GEOLOGIA REGIONAL	8
2.1. Formación Hualhuani (Ki-hu).....	8
2.2. Unidad Tuti (Po-Tu)	8
2.3. Centro Volcánico Mismi (Nm-mi/1).....	8
2.4. Centro Volcánico de Hualca Hualca (Qp-hh)	8
2.5. Formación Colca (Qp-col)	8
2.6. Depósitos aluviales (Qh –al)	9
CAPITULO III. GEOLOGIA DEL DESLIZAMIENTO	11
3.1. Deslizamientos (Dd)	11
3.1.1. Slumps (SI).....	12
3.1.2. Ladera erosionada (Le)	12
3.2. Depósitos Lacustres Estables (DI).....	13
3.3. Depósitos de avalancha de escombros (Daa)	13
3.4. Depósito de avalancha de escombros reciente (Dar).....	15
3.5. PROCESOS EROSIVOS:.....	15
3.1.3. Agrietamientos	15
3.1.4. Cárcavas:	17
CAPITULO IV. GEODINÁMICA Y EVOLUCIÓN DEL DESLIZAMIENTO	20
4.1. Antecedentes del Deslizamiento	20
4.2. Factores Influyentes en el deslizamiento	22
4.2.1. Precipitaciones:.....	22
4.2.2. Factores Hidrogeológicos:	22
4.2.3. Factores Sísmicos:	23
4.3. Evolución del deslizamiento	25
CAPITULO V. MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO	28
6.1. Levantamiento de puntos con GPS – RTK.....	28
6.2. Levantamiento de puntos con Estación total (Monitoreo mediante EDM) y Monitoreo LIDAR	30

5.2.1. Monitoreo Mediante EDM	30
5.2.2. Implementación de Puntos de Control.....	30
CAPITULO VI. RESULTADOS DE MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO.....	33
6.1. Mapa de desplazamientos	33
CONCLUSIONES.....	36
RECOMENDACIONES	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38
APÉNDICE	39

RESUMEN

Los movimientos en masa son uno de los fenómenos geológicos que más pérdidas materiales y humanas generan en Perú. Su investigación y monitoreo forma parte de las actividades permanentes del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Trabajos realizados en el marco de la Actividad 5 “Monitoreo geofísico y geodésico de Movimientos en Masa Activos”, del POI 2017.

El valle del río Colca presenta una de las zonas de más alta actividad geodinámica más alta en Perú esto se evidencia por los diferentes procesos de geodinámica externa: deslizamientos, avalanchas, erosión de riveras, caídas de rocas, como en los procesos de geodinámica interna: sismos asociados a fallas geológicas activas y erupciones volcánicas (Araujo G., 2017).

El deslizamiento de Madrigal corresponde a un movimiento en masa antiguo con zonas de reactivación reciente y una deformación del terreno evidenciada por la destrucción de terrenos de cultivo y parte de la infraestructura en el poblado de Madrigal.

Mediante el uso de tecnología láser y sensores activos, el INGEMMET inició el monitoreo del deslizamiento de Madrigal el año 2016, con el fin de conocer su grado de deformación, tasa de movimiento y características del mismo, para así poner a disposición de autoridades y pobladores datos óptimos para la gestión del territorio y construcción de obras de prevención.

CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1. Ubicación y Accesibilidad

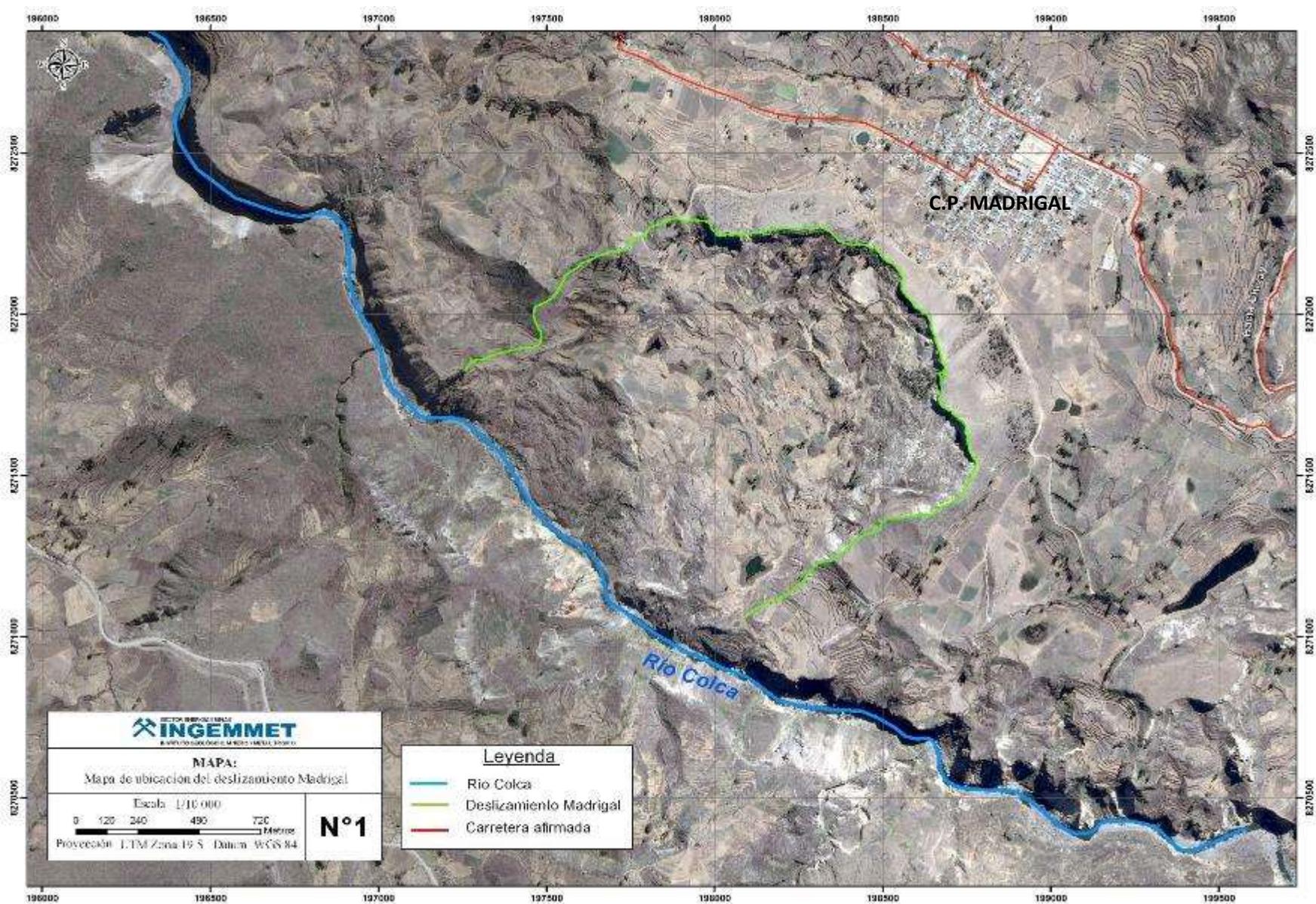
El deslizamiento Madrigal se ubica en la provincia Caylloma, departamento de Arequipa, a 215 metros al Suroeste del centro poblado Madrigal, en la margen derecha del río Colca, a 3200 m.s.n.m. entre las coordenadas UTM 198046 E, 8272210 S y 198583 E, 8271445 S.

Este deslizamiento es accesible por una carretera afirmada, en la margen derecha del río Colca, 40 km del poblado de Chivay. Continuación de la vía asphaltada, entre la ciudad de Arequipa y el distrito de Chivay (Mapa y Fotografía 1).

1.2. Clima y Demografía

Según la clasificación climática de Thornthwaite, la zona presenta un clima regional del tipo semi-seco a frío, la estación seca comprende los meses de abril a noviembre, correspondiente al otoño e invierno Austral, con una humedad relativa baja y temperaturas máximas de 16°C (60°F) y temperaturas mínimas de 3°C (37°F) aproximadamente. La temporada de lluvias corresponde a los meses de diciembre a marzo (verano austral). (SENAMHI, 2010).

La población del distrito de Madrigal está caracterizada por ser del ámbito rural, el cual se estima, al 2015, son una población de aproxima de 500 habitantes. Estadística que disminuye en un 4.7%, tendencia relacionada a migraciones y déficit en la tasa de nacimiento anual. (INEI, 2015).



Mapa 1: Ubicación del deslizamiento de Madrigal, en la margen derecha del río Colca, vista hacia el oeste.



Fotografía 01. Imagen panorámica del deslizamiento de Madrigal, que destaca la forma de la escarpa y cuerpo del deslizamiento

CAPITULO II. GEOLOGIA REGIONAL

El deslizamiento Madrigal afecta depósitos holocenos aluviales de matriz limo arenosa (Mapa 2). Los periodos geológicos están comprendidos entre el Mesozoico - Mioceno y Pleistoceno.

La geología descrita fue tomada del mapa geológico del cuadrángulo de Chivay a escala 1:25 000 elaboradas por INGEMMET (2009).

2.1. Formación Hualhuani (Ki-hu)

Esta secuencia sedimentaria aflora entre 2 a 5 km al Oeste de Maca, en la margen izquierda del río Colca, en el sector del Cerro Anta Huilque. Litológicamente está conformada por areniscas cuarzosas intercaladas con lutitas. Posee una buena estratificación, con bancos de entre 0.1 a 1 m, y el espesor de la secuencia en la zona de estudio es de más de 300 m (Klinck & Palacios, 1985; Quispesivana & Navarro, 2001).

2.2. Unidad Tuti (Po-Tu)

Unidad comprendida geológicamente por depósitos de flujo de lava, gris oscuro y depósito de flojos piroclásticos de cenizas, de coloración gris, tienen un espesor aproximado de 500 a 600 metros.

2.3. Centro Volcánico Mismi (Nm-mi/1)

Litológicamente compuesto por depósitos de flujos de lava andesítica gris verdosa con oquedades rellenas de cuarzo

2.4. Centro Volcánico de Hualca Hualca (Qp-hh)

Al Sur de Maca se encuentra el estratovolcán Hualca Hualca, que emplazó extensos y voluminosos flujos de lava de composición andesítica. Una importante secuencia de flujos de lava fluyó emplazó en dirección Norte y llegó a poco menos de 2 km de distancia de Maca. Esta secuencia lávica posee más de 1000 m de espesor (Zavala B. *et al*, 2012)

2.5. Formación Colca (Qp-col)

En la zona de trabajo, el valle del río Colca es amplio y forma una cuenca de forma elongada, geoforma que fue modelada por la actividad glaciaria, volcánica y sísmica. Permitiendo así la formación de dos lagos que dejaron su registro en la estratigrafía del valle. Klinck *et al.* (1986) llaman a estos depósitos finos y laminados como Formación Colca, compuesta por lutitas y limoarcillitas.

La localidad de Maca se ubica en el sector donde el valle es más amplio, aflorando de esta manera gran parte de los depósitos lacustres. No se tiene una edad exacta de la formación de estos depósitos, pero las secuencias lacustres se hallan debajo de flujos de lava datados cerca de Achoma en 0.61 Ma (Klinck et al., 1986).

En el valle Colca se identificaron 5 secuencias sedimentarias de tercer orden. La primera secuencia suprayace en discordancia angular a los depósitos volcánicos del grupo Tacaza y de los centros volcánicos Hualca Hualca y Mismi del Plioceno; La segunda secuencia se encuentra mejor expuesta en Ichupampa y Maca con un espesor de 30 m y está constituida por intercalaciones de limoarcillitas de color pardo oscuro con laminación paralela, niveles de areniscas de color gris con laminaciones paralelas y oblicuas; La tercera secuencia aflora en Yanque, Lari y quebrada Collpa, está constituida en su mayor parte por conglomerados polimícticos con clastos de hasta 18 cm de diámetro; La cuarta secuencia se encuentra mejor expuesta en Lari y Maca, tiene 30 m de espesor y está compuesta por intercalaciones de limoarcillitas con niveles delgados de areniscas finas de color gris, cenizas volcánicas blanquecinas hacia la base; La quinta secuencia aflora en Lari, Madrigal y Achoma, está compuesta por conglomerados polimícticos con clastos sudredondeados a redondeados que alcanzan un diámetro de hasta 30 cm, correspondiente a una sedimentación de tipo fluvial (Zavala B. *et al*, 2012).

2.6. Depósitos aluviales (Qh –al)

Comprenden todo el valle del río Colca, en ambos márgenes. Está compuesto por depósitos de arena y grava mal seleccionada de subangulosos a subredondeados, en una matriz areno limosa.

Se identificaron también depósitos lacustrinos asociados en la parte más distante del río Colca, que cubren los grupos Tacaza y Barroso.

CAPITULO III. GEOLOGIA DEL DESLIZAMIENTO

Los trabajos realizados en el deslizamiento de Madrigal tienen como resultado un cartografiado a detalle, que permite describir la distribución geomorfológica de materiales sobre la masa desplazada del deslizamiento.

Para la interpretación geodinámica se realizó el cartografiado geológico y geomorfológico a detalle del deslizamiento de Madrigal, basado en la Guía para Movimientos en Masa en la Región Andina (GEMMA, 2007), donde se reconocieron las siguientes formas (Mapa 3):

3.1. Deslizamientos (Dd)

Materiales desplazados como resultado de movimientos en masa recientes en el cuerpo del deslizamiento. No tienen estructura interna definida, y se encuentran sujetos a efectos gravitacionales. (Fotografía 2).



Fotografía 2: Depósitos de deslizamientos recientes dentro del cuerpo principal del deslizamiento Madrigal.

3.1.1. Slumps (Sl)

Son formas derivadas de la acumulación local de material deslizado producto de las presiones ejercidas en los materiales desplazados del deslizamiento. Tienen una cresta definida producto del basculamiento de bloques y sigue la dirección de empuje de la escarpa activa. (Fotografía 3)



Fotografía 3: Slumps desarrollados en el depósito de deslizamiento, producto de las presiones ejercidas en el material deslizado. Las flechas indican la dirección de las fuerzas de presión.

3.1.2. Ladera erosionada (Le)

Son terrenos ubicados al pie del deslizamiento y cercanos al cauce del río Colca. Producto de procesos endógenos en estas laderas, se forman depósitos coluviales, como: Caídas de bloques y detritos, producto de la erosión del río Colca, dejando una superficie de fuerte pendiente (mayor a 30°) y mayormente compuestos de material fino. (Figura 1)



Figura 1: Laderas erosionadas en el pie del deslizamiento delimitadas con líneas rojas punteadas.

3.2. Depósitos Lacustres Estables (DI)

Corresponde a una serie de depósitos lacustres subhorizontales de arena fina y limo, se ubican formando terrazas con superficies horizontales, en los sectores NE y SE de la escarpa principal (Fotografía 4).

3.3. Depósitos de avalancha de escombros (Daa)

Son acumulaciones de escombros producto de avalanchas antiguas sobre el piedemonte en el flanco derecho del río Colca. Se ubican detrás de la corona del deslizamiento y tienen forma de colinas subredondeadas, (Hummocks) Paguican, *et al.* 2012. Se encuentra en concordancia con series de depósitos lacustres donde se logró identificar por lo menos tres eventos de diferentes edades geológicas. (fotografía 5)



Fotografía 4: Estratificación subhorizontal de los depósitos lacustres en la escarpa del deslizamiento indicado por las líneas punteadas.



Fotografía 5: Depósitos de avalancha antigua sobre la escarpa principal, las líneas punteadas resaltan la forma de colina subredondeada.

3.4. Depósito de avalancha de escombros reciente (Dar)

Producto de un movimiento en masa desarrollado en el cuerpo del deslizamiento. Su desarrollo fue violento y muy rápido, por lo que no tiene una estructura definida y el material tuvo un alcance de 125 metros sobre el cuerpo. Según fotografías aéreas y revisión bibliográfica se estima que tiene una antigüedad no mayor a 60 años. Debido a la presión generada por el movimiento, en la zona de deposición se desarrollaron Slumps y grietas (Fotografía 6).



Fotografía 6: Depósitos de avalancha reciente en la escarpa del deslizamiento. Las líneas delimitan la dirección del movimiento en masa.

3.5. PROCESOS EROSIVOS:

3.1.3. Agrietamientos

Son aberturas en el terreno de profundidad y longitud variable. Se identificaron dos grupos importantes: El primero en la zona de acumulación del deslizamiento, producto de la compresión y movimiento del depósito de deslizamiento ladera abajo. El segundo, en la escarpa principal, en los depósitos lacustres, alrededor de un bloque de material que está en proceso de separación de la escarpa principal producto de esfuerzos extensionales. Los agrietamientos coronarios se encuentran a pocos metros de la escarpa principal del deslizamiento, indicando el avance retrogresivo de la misma. (Fotografías 7 y 8)



Fotografía 7: Grietas ubicadas en la parte baja del cuerpo del deslizamiento.



Fotografía 8: Grietas principales y secundarias ubicadas en la escarpa del deslizamiento.

3.1.4. Cárcavas:

Son surcos en las laderas producto del agua de escorrentía sobre el cuerpo del deslizamiento. Tienen una longitud aproximada de 30 metros y se ubican al SE del cuerpo (Fotografía 9) y se desarrollan sobre depósitos limoarcillosos de la formación Colca.

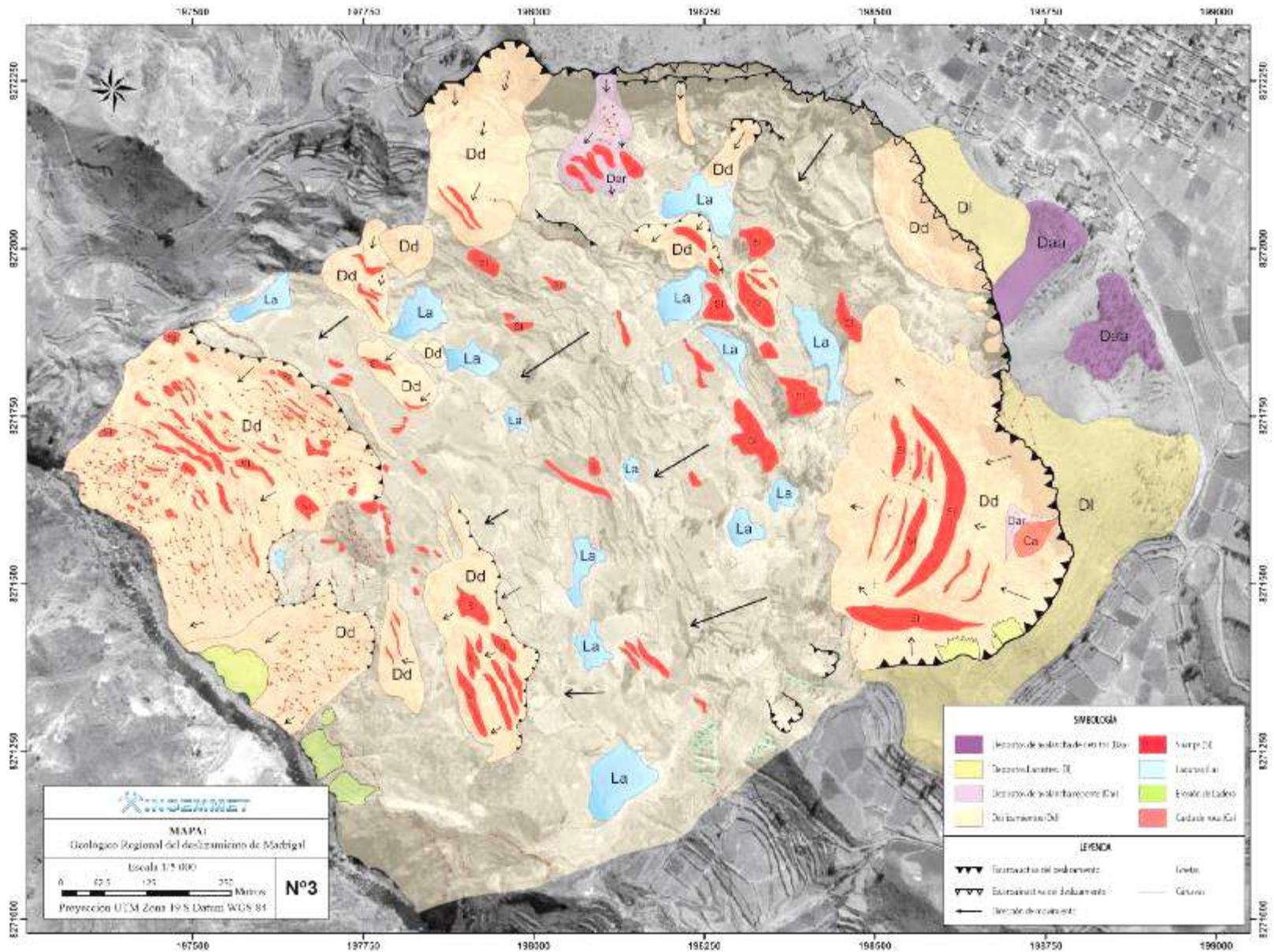


Fotografía 9: Cárcavas en laderas del cuerpo del deslizamiento. Las líneas punteadas representan la forma de las cárcavas.

- **Lagunas:** Son acumulaciones de agua generadas por filtraciones ocupando depresiones dentro del cuerpo del deslizamiento. Estas lagunas siguen una alineación paralela a la escarpa principal del deslizamiento. En la actualidad se canalizan para el regadío de los terrenos de cultivos dentro del deslizamiento. Esta práctica genera inestabilidad (Fotografía 10)



Fotografía 10: Vista frontal de lagunas de grandes dimensiones, en el cuerpo del deslizamiento Madrigal.



Mapa 3: Cartografiado geológico, geomorfológico y geodinámico del deslizamiento de Madrigal.

CAPITULO IV. GEODINÁMICA Y EVOLUCIÓN DEL DESLIZAMIENTO

4.1. Antecedentes del Deslizamiento

- En 1959, a consecuencia de un sismo se produjo un derrumbe de magnitud considerable, donde se notan escarpas paralelas al borde de la escarpa del derrumbe en el lado noreste a solo 50 metros del pueblo. (García, 1963) (Figura 2 y 3)
- Se han reportado, desde décadas pasadas, eventos que dieron origen al hoy deslizamiento de Madrigal: Entre el año de 1959 y marzo de 1963 ocurren deslizamientos en las faldas del cerro Quehuisa, parte alta de la quebrada Ccallomayo a unos 10 km al norte de Madrigal, originando la destrucción de tres hectáreas de cultivo, el canal de regadío, muerte en la población ganadera. Fenómeno que afectó alrededor de 4000 m² de superficie, desplazando un volumen estimado de 10000 m³, En 1959, se describe un derrumbe de dimensiones considerables en el área de Madrigal, originado por un sismo, generando grandes grietas a unos 50 metros del pueblo, (García W.1963 y Zavala B., *et al.* 2009).
- En 1979, el pueblo de Lari fue afectado por un deslizamiento con movimiento lento afectando e inutilizando extensas áreas de cultivo, de los archivos de Yanqui 1983, se menciona un deslizamiento que genero un hundimiento de hasta 7 metros con un desplazamiento horizontal de hasta 2 metros, (Zavala B., Vilches M. y Rosado M., 2009).
- La comparación de fotografías aéreas de 1955 y los trabajos de campo indican de un aumento de 10 en cuanto al número de lagunas 1955 y para 1987 de 25 lagunas, (Dávila S. 1987 y Zavala B, *et al.* 2009)
- En 1987, Dávila J. (1987) hace un reconocimiento de campo sobre la seguridad física de Madrigal y alrededores, identificando un deslizamiento antiguo de suelos deleznable y agrietados sobre la escarpa principal del deslizamiento, con un salto promedio de 20 a 25 metros de altura. Además del reconocimiento de hundimientos, agrietamientos y depresiones que forman acumulaciones de aguas de filtraciones y pluviales de diferentes dimensiones y volúmenes (Zavala, *et al* 2009).
- En el año 2009, el equipo técnico de INGEMMET, reconoce en Madrigal grandes deslizamientos antiguos con reactivaciones por sectores. La interacción entre los depósitos lacustres inconsolidados (Grupo Colca), asociados a filtraciones, producto del mal uso del recurso hídrico en la agricultura local, son los causantes del deslizamiento. Adicionalmente, el

socavamiento del río Colca hace que sectores de este deslizamiento se encuentren activos (Figura 4).



Figura 2 y 3: Fotografías del deslizamiento de Madrigal (Zavala et al, 2009). Se muestra la escarpa principal del deslizamiento de Madrigal, en líneas punteadas y su distancia al poblado con el mismo nombre.

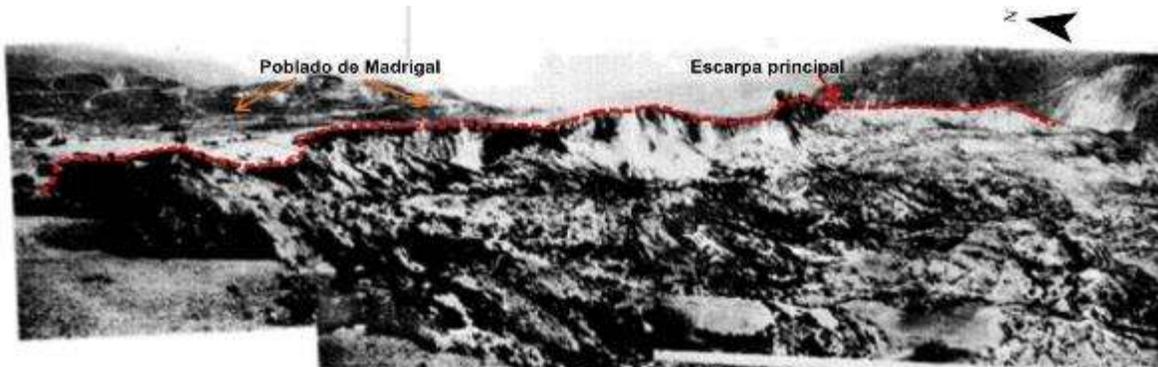


Foto N° 3.-

Muestra la forma panorámica el derrumbe de Madrigal, el área A - muestra estabilidad del terreno, área B muestra inestabilidad del mismo y - el área C terrenos bajos donde se están formando bofedales.

Figura 4: Fotografía tomada del flanco derecho del deslizamiento de Madrigal, (García, 1963). Donde se observa en líneas rojas punteadas la escarpa principal del deslizamiento y el poblado de Madrigal en 1963.

4.2. Factores Influyentes en el deslizamiento

Los factores influyentes en el avance del deslizamiento se atribuyen a procesos dinámicos, tectónicos e hidrogeológicos:

4.2.1. Precipitaciones:

SENAMHI, monitorea registro de precipitación en el valle del Colca, desde la estación meteorológica de Madrigal. Actualmente la estación no presenta registros permanentes; sin embargo, los datos históricos del 2015 y 2016 muestran precipitaciones pluviales superiores a los 350 mm anuales. Donde el periodo lluvioso en el valle del Colca corresponde a los meses de diciembre a marzo y los periodos de sequía a los meses de abril a octubre.

4.2.2. Factores Hidrogeológicos:

El deslizamiento de Madrigal, desplaza materiales detríticos de origen lagunar compuestos por bancos delgados de diatomitas y depósitos de avalancha muy porosos y altos coeficiente de retención hídrica. Las fuentes principales de infiltración, se atribuyen a los ríos Sihuyto, Chimpa y Callumayo, ríos que pertenecen al sistema hidrográfico del río Colca; durante el periodo de precipitación pluvial, el agua de escorrentía superficial se infiltra, saturando capas permeables.

El agua de nevados en la parte alta de la zona, también contribuye al incremento de aguas subterráneas, manifestándose en la zona de Madrigal a través de manantiales. Y por aporte de la actividad antrópica el riego, las áreas agrícolas contribuye al proceso de recarga del acuífero. De acuerdo a los datos del comité de regantes de Madrigal, la cantidad de agua empleada para el riego de áreas agrícolas es de 260 lt/seg.

4.2.3. Factores Sísmicos:

Es uno de los principales factores detonantes en la reactivación y aceleración de los deslizamientos, el catálogo de sismos recopilados del Instituto Geofísico del Perú (IGP) correspondiente al periodo 2015 y 2016, se han empleado para el análisis del deslizamiento de Madrigal. La frecuencia de ocurrencia de los sismos se observa en la figura 5, donde las magnitudes de los eventos varían entre 3 a 5ML. Se ha considerado un ámbito de 10 km respecto al deslizamiento. En esta área se ha identificado 4 importantes sismos, con epicentros cercanos al poblado de Madrigal: 14 de agosto de 2016 (5.3ML), 25 de noviembre de 2015 (4.5ML), 20 de noviembre de 2015 (4.2ML) y 29 de agosto de 2015 (4.1ML). La figura 6, muestra la ubicación de los sismos ocurridos, en el área de influencia del valle del Colca, fenómenos que afectan de manera directa o indirecta al deslizamiento (desplazamiento y velocidad de movimiento).

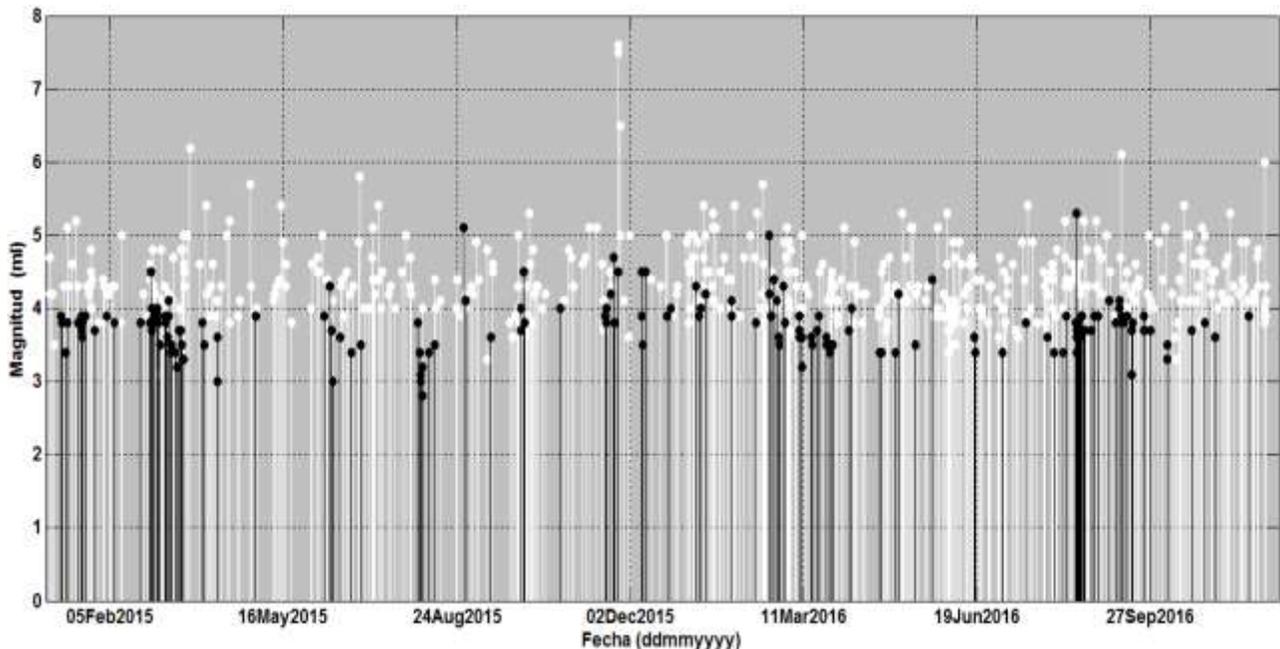


Figura 5. Sismos sentidos para el periodo 2015 - 2016, las barras color negro indican sismos registrado en el ámbito del deslizamiento de Madrigal.

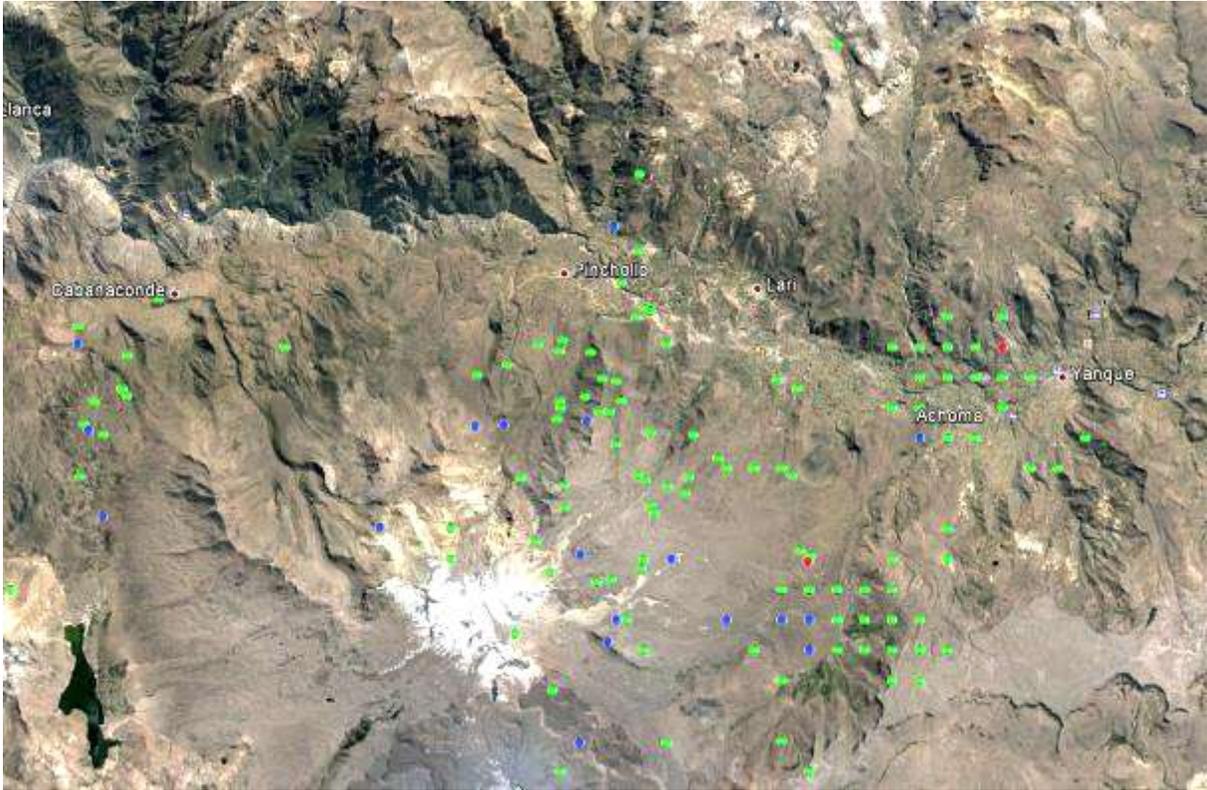


Figura 6. Ubicación de los sismos sentidos, los puntos color rojo corresponde a sismos con magnitud >5 ml, puntos color azul a sismos >4 y puntos color verde sismos mayores a >2 grados en la escala ml, para el deslizamiento de Madrigal.

4.3. Evolución del deslizamiento

El análisis de la dinámica del deslizamiento de Madrigal se basó en el cartografiado multi-temporal mediante fotos aéreas e imágenes satelitales, y técnicas de procesamiento digital de imágenes. Técnicas que permitieron identificar procesos geodinámicos en el deslizamiento. Para ello se utilizó fotografías aéreas del año 1955 tomada por el Servicio Aerofotográfico Nacional – SAR y una colección de imágenes Digital Globe desde el año 2011 hasta el mes de marzo del año 2016 (Figura 7).

En la primera comparación entre la fotografía aérea del año 1955 y la imagen satelital del año 2011, se identificó dos zonas importantes de actividad en el deslizamiento: La primera comprende de la cabeza hasta la parte central del cuerpo del deslizamiento, mientras que la segunda de la parte central al pie del deslizamiento.

En la primera, se puede apreciar mayor cantidad de lagunas y escombros que proviene de la escarpa o cima principal del deslizamiento. En la segunda, los escombros depositados en el cuerpo son sometidos a grandes presiones por efectos gravitatorios y movimientos hacia el río Colca, por los cuales se producen grietas importantes y “plegamientos” mayormente observadas en el pie del deslizamiento.

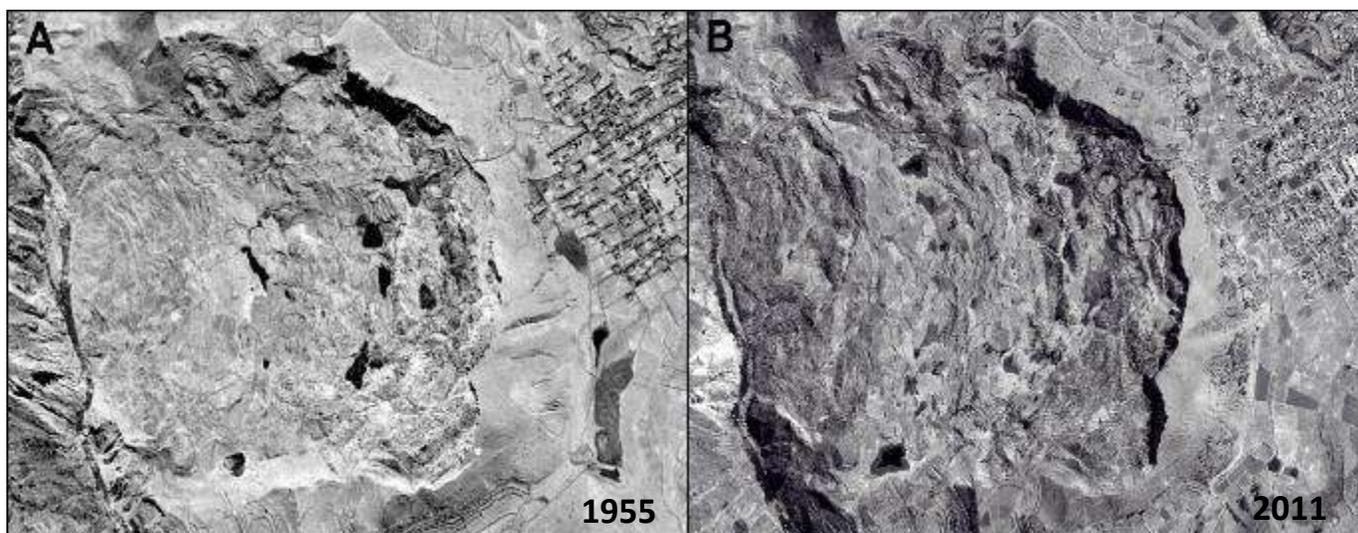


Figura 7: Comparación de imágenes del deslizamiento de Madrigal: (A) Imagen del año 1955 (B) Imagen del año 2011. Se aprecia el incremento de lagunas y acumulación de material en el pie del deslizamiento.

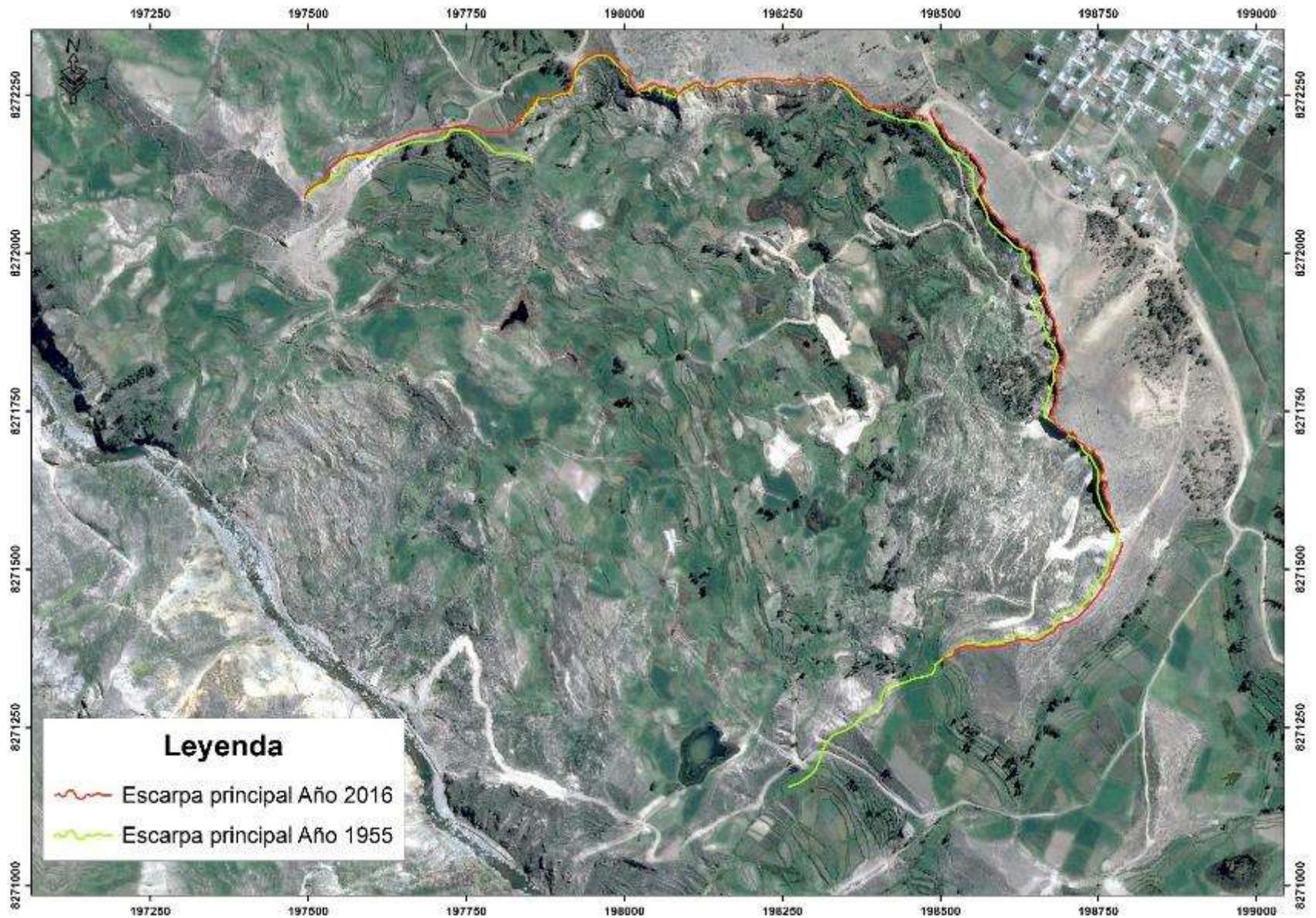


Figura 8: En la figura se muestran los cartografiados de la escarpa principal en el año 1965 y luego en el año 2016. Los cambios son mínimos y fueron producidos por derrumbes locales en la escarpa principal.

Al realizar la evaluación de la dinámica del deslizamiento, entre los años 1955 y 2016, se encontró que el promedio de avance en la escarpa principal es de 10 metros hacia el NE, es decir hacia la localidad de Madrigal, con zonas donde la diferencia máxima es de 20 metros y la mínima de 0.50 metros. (Figura 8). El resultado de estos análisis indica que el movimiento es muy lento en la escarpa, con un promedio de 0.16 metros de retroceso anual.

Sin embargo, existe un sector de 4 340 m² el cual está delimitado por grietas coronarias de hasta 0.70 metros de abertura y 2 metros de profundidad en la parte alta del deslizamiento (escarpa principal) y otras secundarias de 0.30 metros de abertura y 0.5 metros de profundidad en la parte baja del deslizamiento. Esta es la zona más activa del deslizamiento, donde se podría producir un movimiento en masa importante sobre el cuerpo del deslizamiento. (Figura 9)

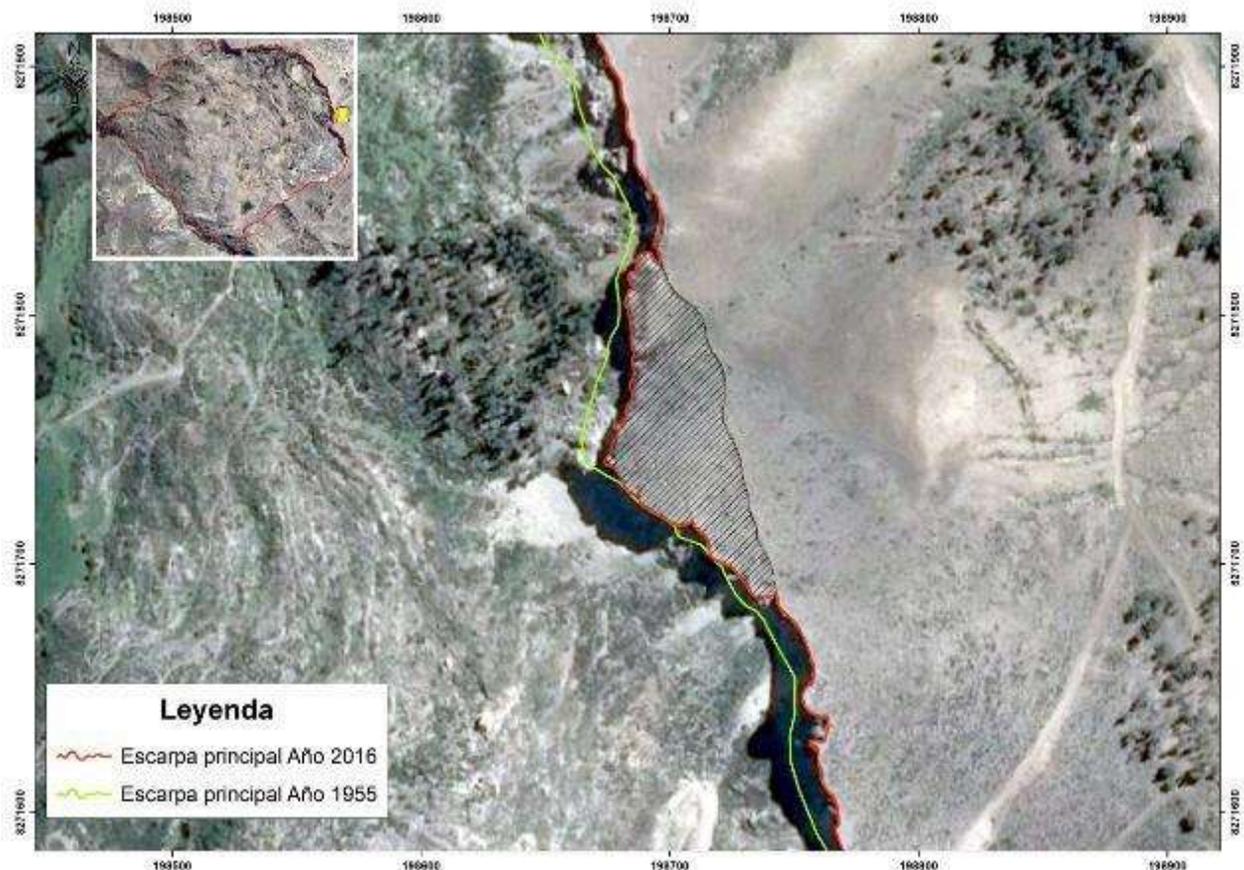


Figura 9. Zona de posible movimiento en masa, que se encuentra delimitada por grietas importantes en la escarpa principal del deslizamiento.

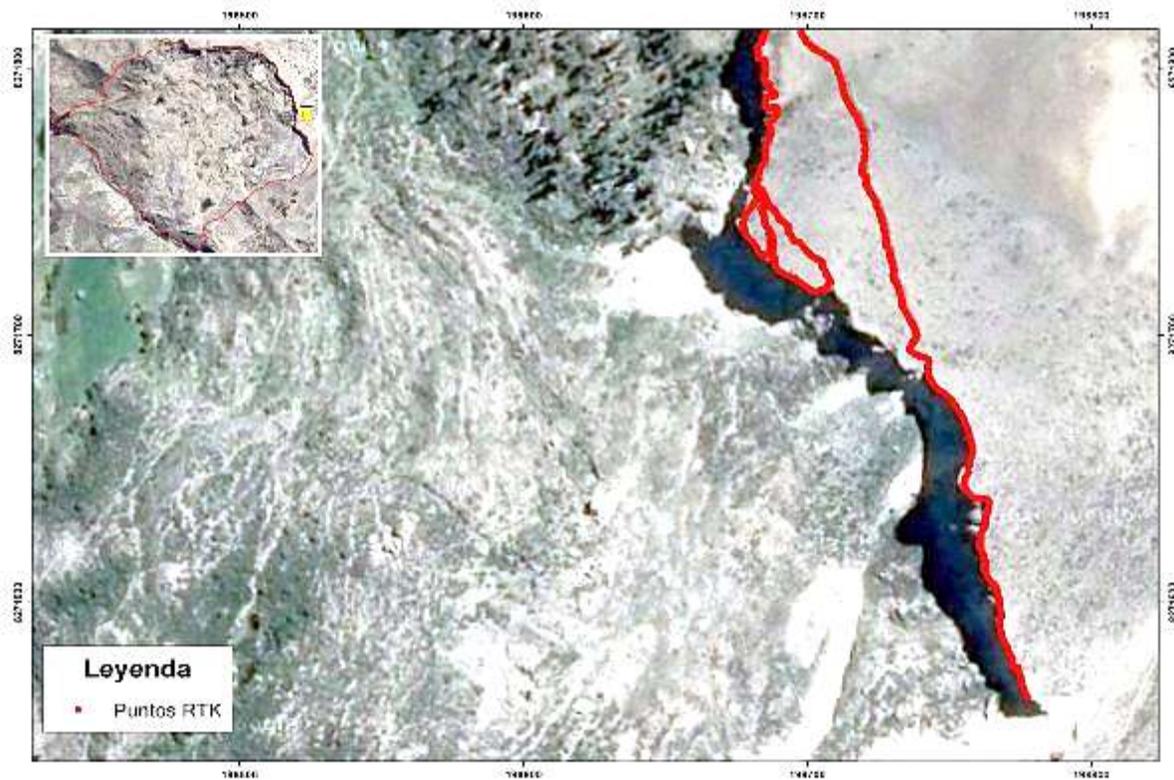
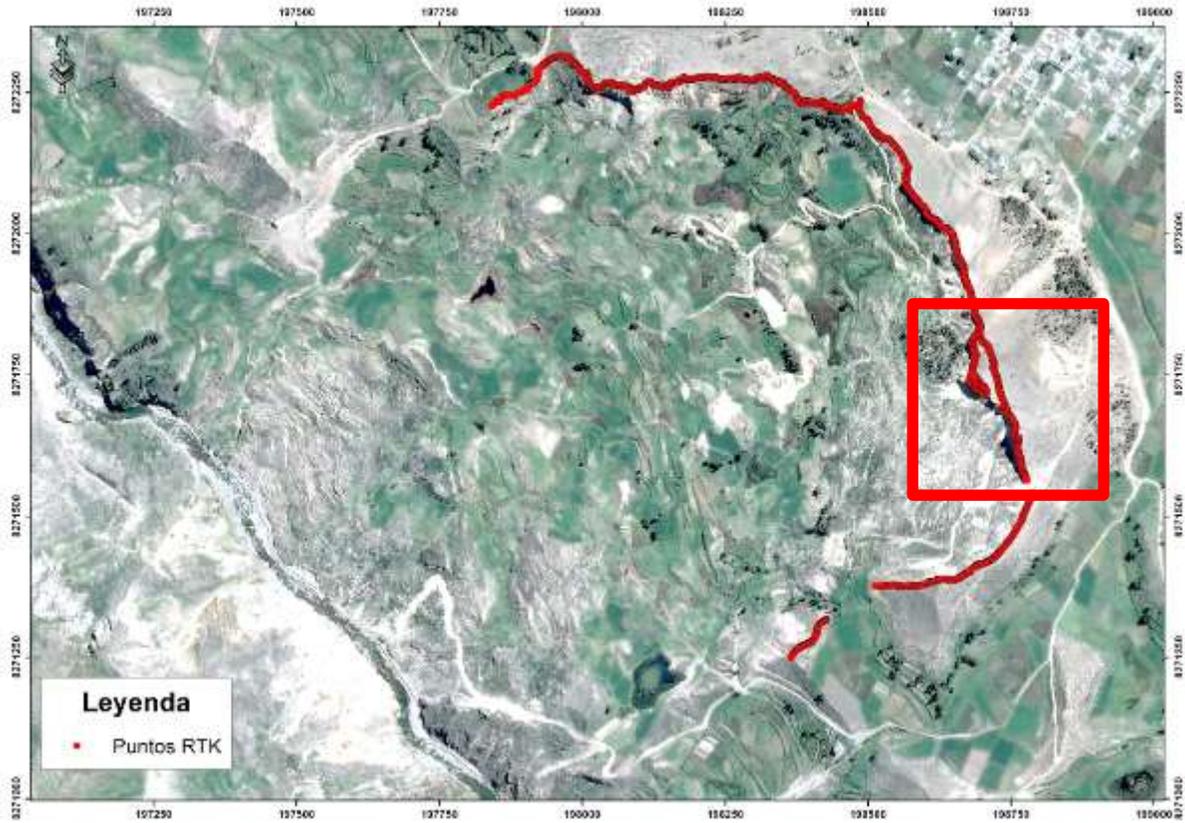
CAPITULO V. MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO

El análisis de la dinámica del deslizamiento, desde el 2016, está basado en el uso de técnicas, como reiteración de puntos geodésicos, monitoreo EDM y LiDAR. Las mismas que permiten realizar la adquisición a detalle de valores de deformación en periodos trimestrales, dentro del cuerpo y la escarpa del deslizamiento. Con el objetivo de realizar pronósticos de movimiento, para determinar las zonas con velocidades de avance rápido. A continuación, se detallan estas metodologías:

6.1. Levantamiento de puntos con GPS – RTK

Utilizando un instrumento geodésico Trimble R10 y una estación base instalada en las proximidades del poblado de Madrigal, se realizó la toma de puntos en tiempo real del límite de la escarpa principal del deslizamiento.

En febrero del 2016, se tomaron alrededor de 2145 puntos sobre la escarpa principal de Madrigal de 2460 metros de longitud. (figuras 10 y 11)



Figuras 10 y 11: Las figuras muestran el detalle el cartografiado total de los puntos RTK tomados sobre la escarpa principal del deslizamiento Madrigal.

6.2. Levantamiento de puntos con Estación total (Monitoreo mediante EDM) y Monitoreo LIDAR

5.2.1. Monitoreo Mediante EDM

Consiste en medir distancias con precisiones milimétricas basado en las propiedades de una onda electromagnética propagada. El instrumento que realiza estas mediciones es el distanciómetro, que este acoplado o incorporado dentro de la Estación Total. Calcula la distancia de manera directa, desde la base hasta el prisma o prismas ubicados en el deslizamiento; permitiendo obtener el promedio de las múltiples mediciones de ángulos y distancias que realiza. Así mismo el instrumento realiza diferentes correcciones, por temperatura y presión atmosférica, así como el cálculo de las coordenadas de cada prisma.

El método de medición empleado en los deslizamientos de Madrigal, es el denominado “módulo de monitoreo y medición por ciclos”: Estación total robotizada (equipo de alta precisión y rendimiento), marca Trimble, modelo S9 HP con motor servo-asistido. En el cuadro 1 se observan las características del equipo.

MARCA	MODELO	MÉTODO	RESULTADO	PRECISIÓN MEDICIÓN	ALCANCE MEDICIÓN
TRIMBLE	S9 1" HP	EDM	Ángulos y distancias	1 mm + 2ppm*	5500 a 700**

Cuadro 1: Características del equipo empleado para la medición de distancias.

Medición para prisma estándar

*** El alcance de medición de 5500 es con un prisma y 7000 con tres prismas*

5.2.2. Implementación de Puntos de Control

Desde años anteriores, el monitoreo a los deslizamientos de Madrigal consistía en observaciones visuales, mapeo de estructura y lineamientos de fallas a través de imágenes de satélite a periodos muy largos. Durante el 2016, uno de los objetivos fue el de estudiar y conocer la dinámica del deslizamiento, es así que se estableció un conjunto de puntos distribuidos en la escarpa y el cuerpo del deslizamiento, con la finalidad de cuantificar el desplazamiento. Por este motivo, durante comisión del 20 de julio del 2016, se realizó un levantamiento de información con un sistema de prismas instalados en el cuerpo y la escarpa principal del deslizamiento. Los pernos de control instalados, son un total de 23 puntos, de los cuales 12 se coloraron en la escarpa principal y 13 se distribuyeron en diferentes sectores del cuerpo del deslizamiento (Figura 12) con la

finalidad de controlar cual o cuales son las áreas que presentan mayores valores de desplazamiento o zonas más susceptibles a hundimiento.

Frente a la necesidad de controlar permanentemente la lectura de datos sobre la instrumentación realizada, se construyó una base estable ubicada en la margen izquierda del río Colca, en la parte superior del mirador de Pinchollo. Base para el monitoreo de los prismas mediante el método de EDM. La base construida es un monumento de concreto de 1.20 metros de alto, sobre una saliente natural, que permite tener una visibilidad completa del deslizamiento. En la figura 6, se observa el monumento que lleva como nombre estación de Base Monitoreo Madrigal 1 y se le asignó el código BMM1. En este monumento se instala la estación total durante las campañas de medición.

Además, se realizaron tres escaneos con el sistema LIDAR, desde la margen derecha del río Colca hacia el deslizamiento, para obtener el modelo digital de elevación detallado del cuerpo del deslizamiento. (Fotografías 11,12,13)

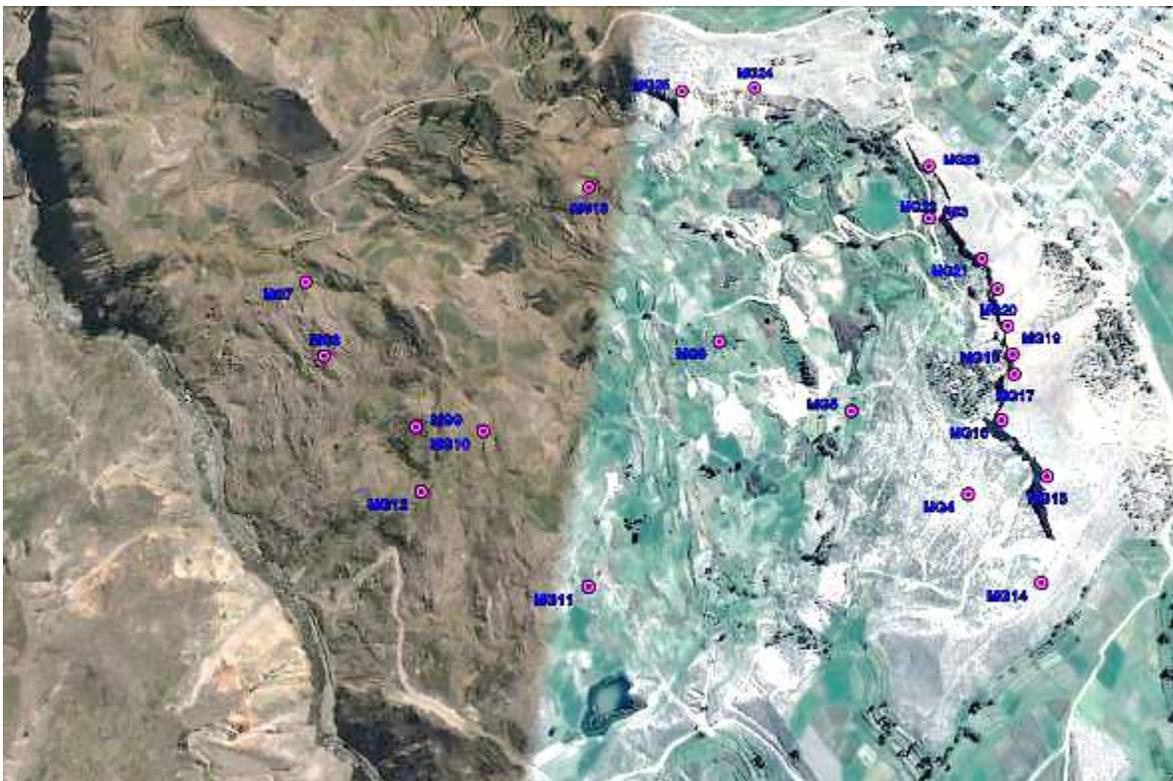
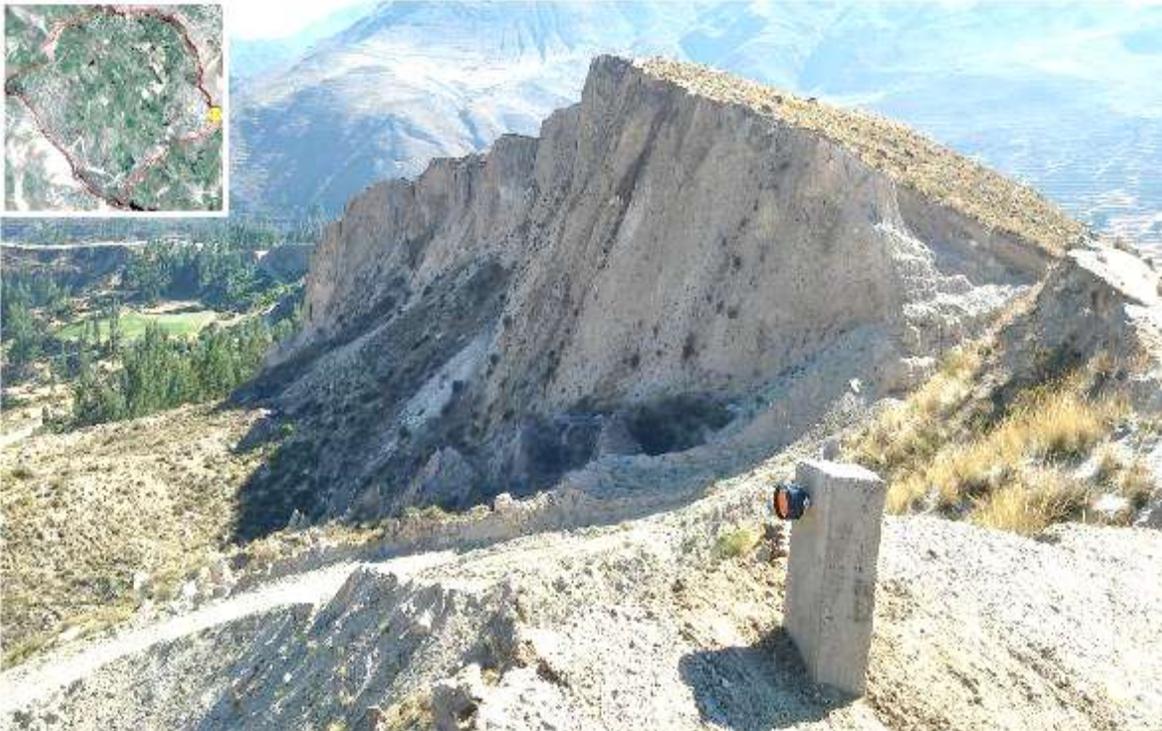


Figura 12: Prismas y el hito de control geodésico instalados en el deslizamiento Madrigal. (Taipe, 2016)



Fotografía 11: Construcción de monumentos para la colocación de prismas en el deslizamiento Madrigal.



Fotografía 12: Instalación de prismas en los monumentos construidos sobre el deslizamiento Madrigal.



Fotografía 13. construcción de base para levantamiento EDM y Levantamiento LIDAR en el flanco izquierdo del valle del Colca (frente al deslizamiento de Madrigal).

CAPITULO VI. RESULTADOS DE MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO

6.1. Mapa de desplazamientos

“El mapa de desplazamiento corresponde a un periodo de 3.9 meses de monitoreo en los 23 puntos de control. Los puntos que controlan el movimiento del desplazamiento en la escarpa han evidenciado variaciones del orden de milímetros en las líneas de mediciones de distancia. Mientras los puntos MG19 y MG21 muestran desplazamientos entre 10.8 cm a 21.5 cm durante el periodo de monitoreo, los puntos distribuidos en el pie del deslizamiento como son MG07, MG08, MG09, MG10, MG11 y MG12, los valores de desplazamientos se encuentran entre 1.0 y 2.0 cm (área relativamente estable). Así mismo se ha observado que el punto MG05 se desplazó 10.4 cm, lo que evidencia zonas altamente saturadas (Figura 13)

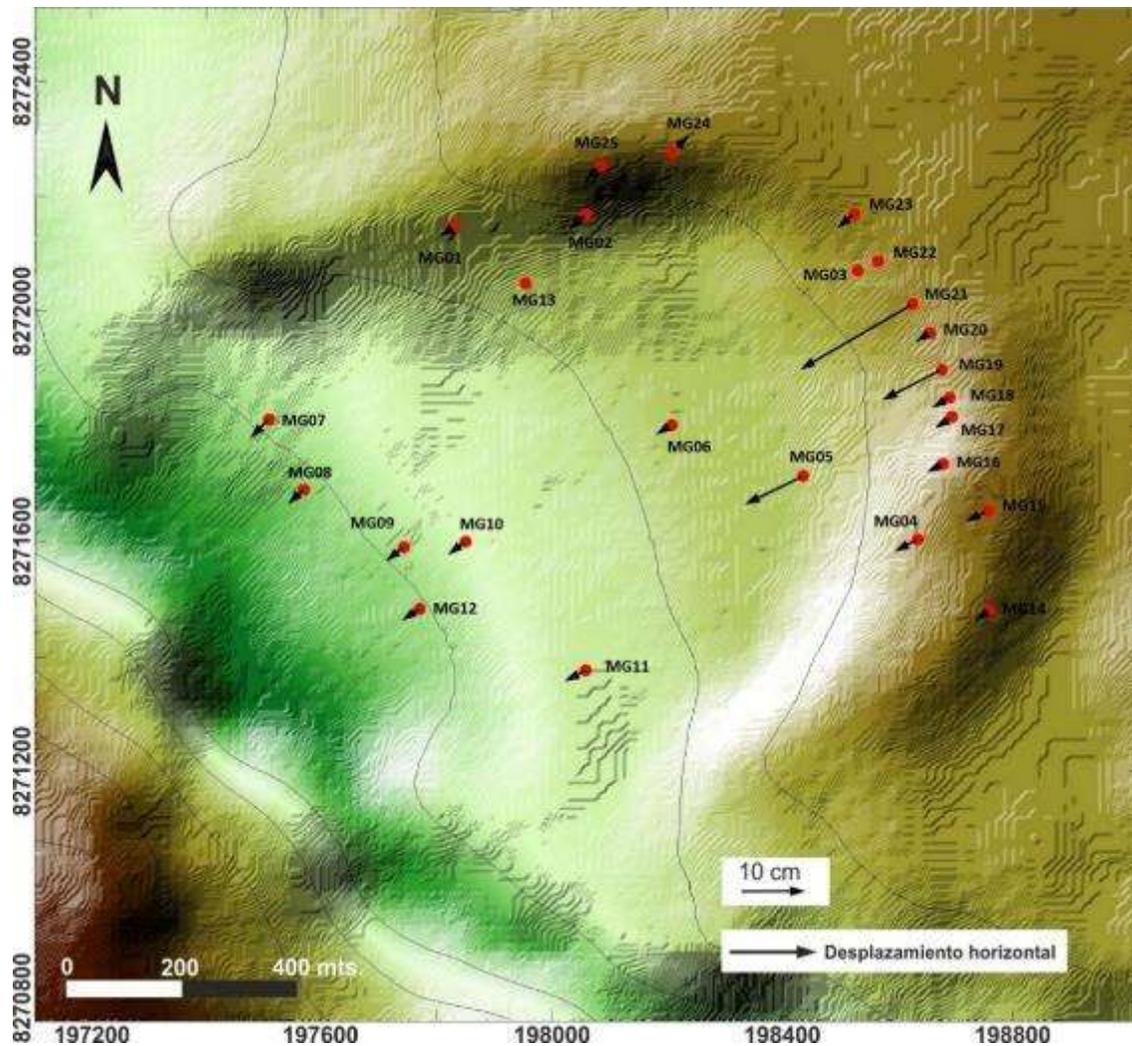
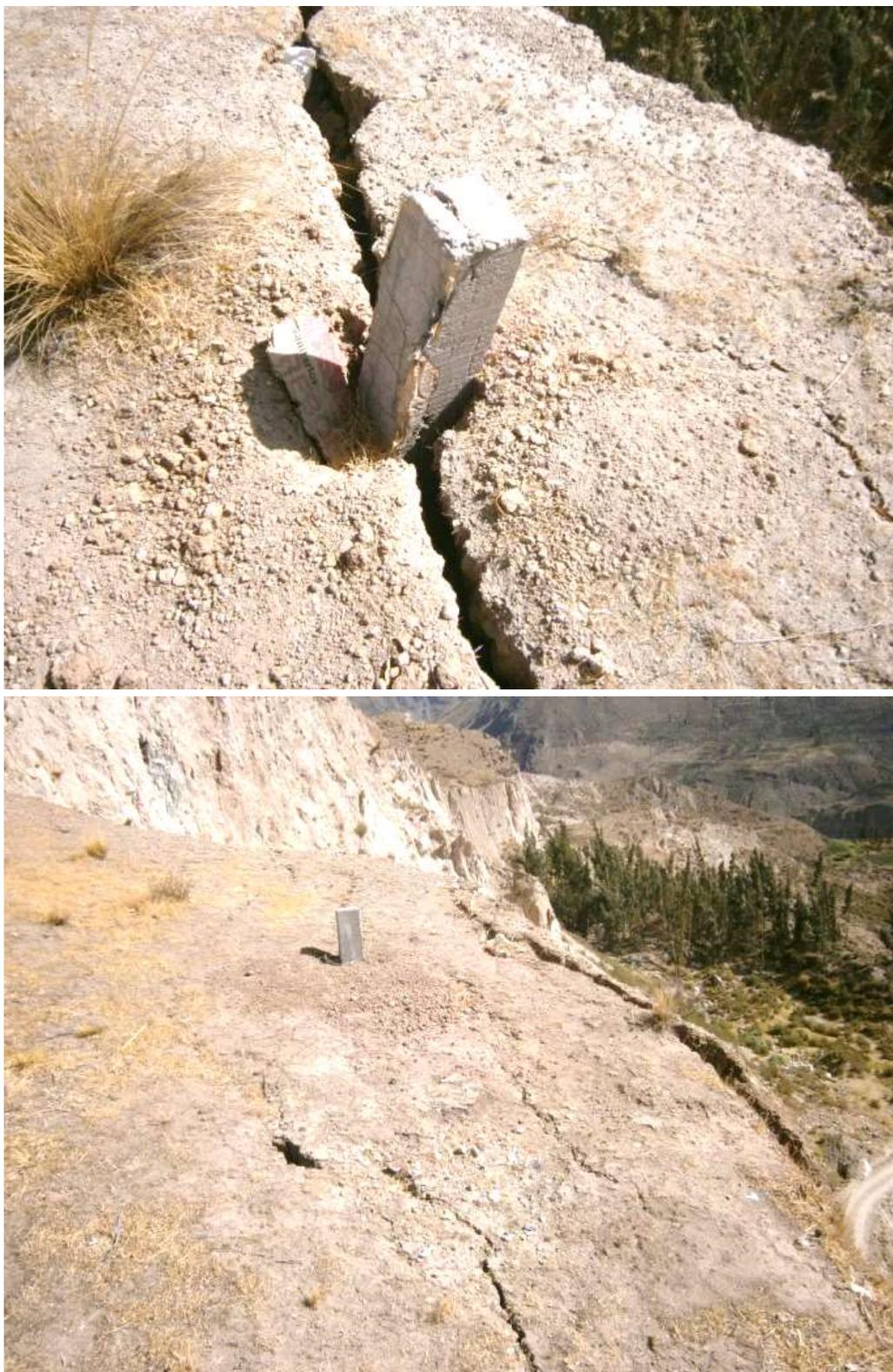


Figura 13: Mapa de desplazamiento obtenido mediante el método EDM para el deslizamiento de Madrigal durante el periodo de 3.9 meses (24/07/2016 al 18/11/2016).

Los mayores desplazamientos observados en la escarpa, corresponden a los puntos MG19 y MG21, que se originaron debido al agrietamiento de una sección de la escarpa (Fotografía 14 y 15) durante el sismo del 14 de agosto de 2016 (con magnitud 5.3ML con epicentro en la localidad de Ichupampa) que determinó desplazamientos de mayor magnitud (Taipe, 2016).



Fotografía 14 y 15. Vista del agrietamiento sobre una sección de la escarpa del deslizamiento. Foto superior, presencia de grieta que intercepta al Punto MG21, foto inferior punto MG19 limitado por grietas. (Taipe, 2016)

CONCLUSIONES

- El deslizamiento Madrigal corresponde a un movimiento en masa antiguo, de avance retrogresivo, que presenta reactivaciones locales producto de las actividades agrícolas dentro del cuerpo del deslizamiento y sismos comunes en la zona.
- Los reportes existentes del movimiento del deslizamiento Madrigal datan del año 1966, con los primeros informes levantados por INGEMMET acerca de derrumbes en la escarpa principal, y desde el año 2009 hasta la actualidad se realizan informes detallados acerca de la geodinámica del deslizamiento, así como el estudio de los desplazamientos actuales.
- Regionalmente, el deslizamiento Madrigal afecta depósitos aluviales y lacustres holocenos, con secuencias de avalanchas volcánicas. Característica que comparte con los deslizamientos cercanos de Lari y Maca.
- El análisis multitemporal del cartografiado de la escarpa principal, entre el año 1955 y el año 2016, muestra que no existe un movimiento retrogresivo acelerado en la escarpa. Sin embargo, se colocó un sector en la escarpa principal, con un área de 4 340 m², con agrietamientos de 1.2 metros de apertura y 1.0 metro de salto. Este tramo es susceptible a la ocurrencia de derrumbes sobre el cuerpo del deslizamiento, caída que podría ser acelerada por sismos locales o infiltración hídrica por temporada de lluvia extrema.
- La dinámica del deslizamiento tiene un desarrollo heterogéneo en la zona de desprendimiento y acumulación. Las lagunas y filtraciones se encuentran principalmente en la zona de desprendimiento, mientras que el mayor porcentaje de concentración de las grietas y slumps, se da la zona de acumulación.
- Las actividades antrópicas de la población en Madrigal sobre el cuerpo del deslizamiento, como la construcción de canales, carreteras y afianzamiento de terrenos de uso agrícola y ganadero, producen reactivaciones de movimiento del deslizamiento, actividades que generan en el desarrollo y extensión de múltiples grietas en el área del depósito.
- La presencia de lagunas, infiltración y áreas húmedas, alineadas en la convergencia de la zona de acumulación y depósito, se debe a la infiltración de aguas de superficiales producto del riego y lluvia.

- Los primeros resultados del monitoreo muestran que el promedio de desplazamiento del cuerpo del deslizamiento es inferior a los 10 cm, en los 3.9 meses de monitoreo, por lo que se considera un movimiento lento; Sin embargo, se registró un pico de desplazamiento de 21.5 cm por un sismo de magnitud 5.3 MI ocurrido en la localidad de Ichupampa en el mes de agosto 2016. Confirmado que estos eventos son los principales detonantes de desplazamientos del deslizamiento.
- El monitoreo al deslizamiento de Madrigal, mediante el método EDM ha encontrado pequeños cambios del orden de milímetros.
- Los altos valores de desplazamiento se han registrado en los puntos MG19, MG21 entre 10.8 y 21.5 cm que fueron directamente asociado al sismo de 14 de agosto que origino grietas en los bordes del deslizamiento.
- Las múltiples técnicas de monitoreo que se aplicarán permanentemente sobre el deslizamiento de Madrigal, permitirán conocer al detalle su dinámica, identificar las zonas de mayor desplazamiento, estimar proyecciones de movimiento en zonas críticas con la finalidad de prevenir a la población ante un posible movimiento en masa en el cuerpo del deslizamiento.

RECOMENDACIONES

- Reducir y/o cambiar los métodos de regadío en la actividad sobre la zona del depósito y acumulación de deslizamiento.
- Se recomienda continuar con la medición de puntos de control con más frecuencia, con la finalidad de establecer la línea base del desplazamiento y a su vez implementar las mediciones el monitoreo con el método GPS-RTK.
- Incrementar más puntos de control sobre el cuerpo del deslizamiento con la finalidad de tener el control del deslizamiento, con el uso de la técnica de monitoreo por GPS- RTK.
- Colocar los prismas de monitoreo por EDM, de manera permanente.

BIBLIOGRAFÍA

- Cuba, F. y Ita, N. (2004). Arequipa. Guía Turística, SENAMHI., p. 33-41
- Dávila, S. (1987). Inspección de la seguridad Física de Madrigal, Informe Técnico, INGEMMET, Dirección de Geotecnia, 16p.
- Fidel, L. & Zavala, B. (1995). Estudio geodinámico de la cuenca del río Camaná–Majes (Colca). Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 14, 206 p.
- García, W. (1966). Deslizamiento en el cerro Quehuisa en los distritos de Lari y Madrigal. Boletín 13, Comisión Carta Geológica Nacional, Compilación de Estudios Geológicos. p. 88-93.
- INEI, 2015. Proyecciones del Censo de población y vivienda 2007. Lima, Perú. Versión web: <http://proyectos.inei.gob.pe/web/poblacion/#>. Recuperado el 05/01/2017.
- Palacios, O. (1985). Carta Geológica Nacional 32-S. INGEMMET.
- Palacios, O.; De la Cruz W. J; De la Cruz N.; Klinck, B.A.; Ellison, R.A.; Hawkins, M.P. (1993) Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca - Sur del Perú (Proyecto integrado del Sur). INGEMMET. 257 pag. Lima-Perú
- Paguican EMR, Van Wyk de Vries B, Lagmay a. MF (2012) Hummocks: how they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. Landslides 11:67–80. doi: 10.1007/s10346-012-0368-y
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (GEMMA). 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.
- Quispesivana, Q. (2013). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32-p), Chuquibamba (32-q), Chivay (33-s), Cailloma (31-s), Velille (30-s), Livitaca (29-s) y Pacapausa (30-p). 42 p, INGEMMET.
- SENAMHI 2012. Mapa Climático del Perú por el método Thornthwaite. Lima, Perú.
- Taípe, Edu y Miranda Rafael (2016), Monitoreo del deslizamiento de Madrigal, Provincia Caylloma - Región Arequipa, periodo 2016. INGEMMET. Arequipa, Perú.
- Yanqui, C. (1983). Geotecnia del deslizamiento de Lari. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 72, p. 287-299.
- Zavala, B. & Vilchez, M. & Rosado, M. (2009) Aspectos Geodinámicos en los distritos de Lari, Madrigal y Maca (Provincia Cailloma, Región Arequipa), Informe Técnico, INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

APÉNDICE

Listado de Fotografías

- Fotografía 2: Depósitos de deslizamientos recientes dentro del cuerpo principal del deslizamiento Madrigal. 11
- Fotografía 3: Slumps desarrollados en el depósito de deslizamiento, producto de las presiones ejercidas en el material deslizado. Las flechas indican la dirección de las fuerzas de presión..... 12
- Fotografía 4: Estratificación subhorizontal de los depósitos lacustres en la escarpa del deslizamiento indicado por las líneas punteadas. 14
- Fotografía 6: Depósitos de avalancha reciente en la escarpa del deslizamiento. Las líneas delimitan la dirección del movimiento en masa. 15
- Fotografía 7: Grietas ubicadas en la parte baja del cuerpo del deslizamiento. 16
- Fotografía 8: Grietas principales y secundarias ubicadas en la escarpa del deslizamiento. 16
- Fotografía 9: Cárcavas en laderas del cuerpo del deslizamiento. Las líneas punteadas representan la forma de las cárcavas. 17
- Fotografía 10: Vista frontal de lagunas de grandes dimensiones, en el cuerpo del deslizamiento Madrigal. 18
- Fotografía 11: Construcción de monumentos para la colocación de prismas en el deslizamiento Madrigal. 32
- Fotografía 12: Instalación de prismas en los monumentos construidos sobre el deslizamiento Madrigal. 32
- Fotografía 13. construcción de base para levantamiento EDM y Levantamiento LIDAR en el flanco izquierdo del valle del Colca (frente al deslizamiento de Madrigal). 33

Listado de Figuras

- Figura 1: Laderas erosionadas en el pie del deslizamiento delimitadas con líneas rojas punteadas. 13
- Fotografía 5: Depósitos de avalancha antigua sobre la escarpa principal, las líneas punteadas resaltan la forma de colina subredondeada. 14
- Lagunas: Son acumulaciones de agua generadas por filtraciones ocupando depresiones dentro del cuerpo del deslizamiento. Estas lagunas siguen una alineación paralela a la escarpa principal del deslizamiento. En la actualidad se canalizan para el regadío de los terrenos de cultivos dentro del deslizamiento. Esta práctica genera inestabilidad (Fotografía 10) 17
- Mapa 3: Cartografiado geológico, geomorfológico y geodinámico del deslizamiento de Madrigal..... 19

- Figura 2 y 3: Fotografías del deslizamiento de Madrigal (Zavala et al, 2009). Se muestra la escarpa principal del deslizamiento de Madrigal, en líneas punteadas y su distancia al poblado con el mismo nombre..... 21
- 22
- Figura 4: Fotografía tomada del flanco derecho del deslizamiento de Madrigal, (García, 1963). Donde se observa en líneas rojas punteadas la escarpa principal del deslizamiento y el poblado de Madrigal en 1963. 22
- Figura 7: Comparación de imágenes del deslizamiento de Madrigal: (A) Imagen del año 1955 (B) Imagen del año 2011. Se aprecia el incremento de lagunas y acumulación de material en el pie del deslizamiento. 25
- Figura 9. Zona de posible movimiento en masa, que se encuentra delimitada por grietas importantes en la escarpa principal del deslizamiento..... 27
- Figuras 10 y 11: Las figuras muestran el detalle el cartografiado total de los puntos RTK tomados sobre la escarpa principal del deslizamiento Madrigal. 29
- Figura 12: Prismas y el hito de control geodésico instalados en el deslizamiento Madrigal. (Taipe, 2016) 31
- Figura 13: Mapa de desplazamiento obtenido mediante el método EDM para el deslizamiento de Madrigal durante el periodo de 3.9 meses (24/07/2016 al 18/11/2016). 34
- Fotografía 14 y 15. Vista del agrietamiento sobre una sección de la escarpa del deslizamiento. Foto superior, presencia de grieta que intercepta al Punto MG21, foto inferior punto MG19 limitado por grietas. (Taipe, 2016)..... 35

Listado de Mapas

- Cuadro 1: Características del equipo empleado para la medición de distancias.....8

Listado de Cuadros

- *Cuadro 01: Ubicación del deslizamiento de Madrigal, en la margen derecha del río Colca, vista hacia el oeste5*
- *Cuadro 2: Mapa geológico regional adaptado al área de trabajo9*
- *Cuadro 01: Cartografiado geológico, geomorfológico y geodinámico del deslizamiento de Madrigal18*