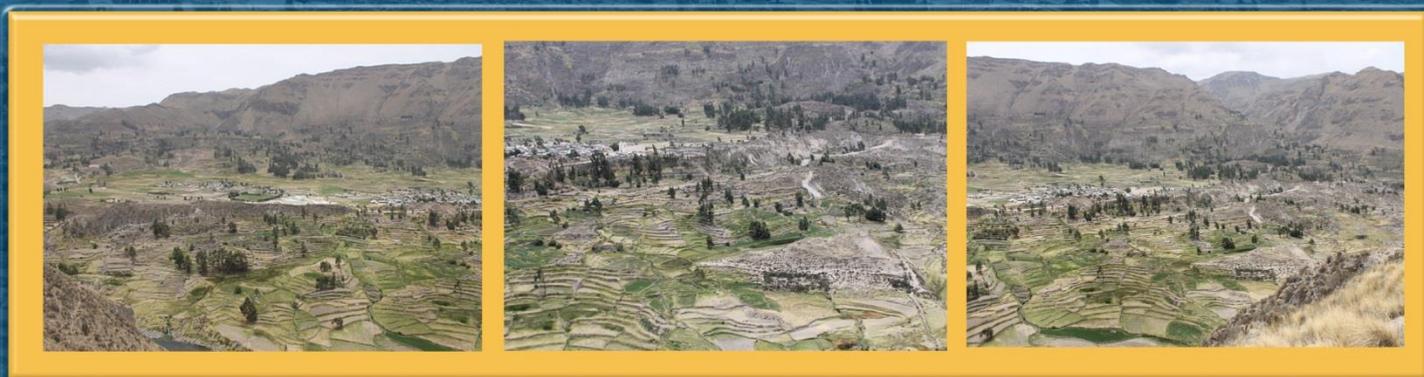


Informe Técnico N° A6741

MONITOREO GEODÉSICO Y ESTUDIO GEODINÁMICO DEL DESLIZAMIENTO DE MACA

Región Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Maca



POR:

EDU TAIPE
GAEL ARAUJO
RAFAEL MIRANDA
PATRICIO VALDERRAMA

ENERO
2017

INDICE:

1. INTRODUCCIÓN	.....3
2. FACTORES INFLUYENTES EN EL DESLIZAMIENTO	.....4
2.1 Factores Climáticos: Precipitaciones	.....4
2.2 Factores Hidrológicos: Agua superficial y subterránea	.....4
2.3 Factores externos: Sísmicos	.....5
3. Monitoreo del deslizamiento de Maca	.....6
3.1 Monitoreo con GPS	.....7
a. Equipos GPS empleados	.....7
b. Adquisición de Datos	.....8
c. Series temporales de GPS	.....9
d. Campo de Velocidades con GPS	.....12
3.2 Monitoreo con InSAR	.....13
a. Procesamiento InSAR	.....14
b. Interpretación del interferograma	.....15
4. GEODINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO Y SU INFLUENCIA SOBRE MACA	.....16
4.1 Geodinámica del Deslizamiento de Maca	.....17
a. Mapa de Peligrosidad a Movimientos en Masa	.....17
b. Mapa de Peligrosidad a Procesos Sísmicos	.....20
c. Mapa de Peligrosidad Múltiple	.....22
I) Zona de Peligro Muy Alto	.....22
II) Zona de Peligro Alto	.....22
5. CONCLUSIONES	.....24
6. BIBLIOGRAFÍA	.....25
ANEXOS	.....26

1. Introducción

Las evidencias del deslizamiento en Maca son altamente conocidas, el sector occidental del pueblo de Maca, siendo la zona más activa, mientras que la zona menos activa comprende la extensión del poblado. Durante los últimos años este fenómeno geológico viene afectando de manera recurrente al poblado de Maca, Afectando principalmente la carretera que une todo el Valle del Colca.

En la provincia de Caylloma se encuentra uno de los atractivos turísticos más importantes de la región sur del Perú, como es el Cañón del Colca con alrededor de 200,000 visitantes al año. La principal vía de acceso hacia la ruta turística se ve permanentemente afectada; esta también une importantes pueblos en el Valle del Colca (Fidel y Zavala, 1994).

Cronológicamente se han reportado tres eventos de gran magnitud para este deslizamiento: el 23 de Julio de 1991, un sismo superficial ($M_b = 5.4$) localizado a 8 km de Maca (Antayhua *et al.*, 2002) reactivó el deslizamiento, provocando el hundimiento de la carretera de al menos 2 metros (Bulmer *et al.*, 2002). El 23 de junio del 2001, un sismo de subducción en las costas de Arequipa ($M_w = 8.4$) reactivó el deslizamiento de Maca (Gomez *et al.*, 2001 pero no se tienen valores exactos acerca de la tasa de deformación o desplazamiento. Entre febrero y marzo del año 2013, una crisis sísmica generó varios sismos locales de magnitudes superiores a 4 Mb. Al menos uno de estos sismos (14 marzo 2013, $M_b 4.5$) provocó el hundimiento de la carretera de aproximadamente 0,5 m (La Republica, 15 de marzo 2013). Es así que este deslizamiento genera el interés, de nuestra institución, para ser estudiado dado el impacto que ocasiona en la economía local y regional.

El fenómeno es un movimiento en Masa de tipo deslizamiento rotacional antiguo (Zavala *et al.*, 2012, Lacroix P., 2012, Informe Técnico N° A6628-ingemmet, 2012), actualmente es un fenómeno continuamente investigado y estudiado con el fin de conocer la naturaleza y su evolución en el tiempo. Para ello el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) vienen dando soporte al sistema de monitoreo permanente y continuo.

El presente informe tiene la finalidad de alcanzar los resultados del monitoreo para el año 2016, mediante el método geodésico principalmente; así mismo, el monitoreo se apoya mediante el análisis de imágenes InSAR y LiDAR. Este trabajo se realiza con el objetivo de evaluar el avance del desplazamiento actual del deslizamiento en el distrito de Maca. Las mediciones se realizan para determinar, ya sea en el aumento o disminución del desplazamiento, de las áreas afectadas, así como las magnitudes de los mismos, de manera que los resultados puedan ayudar a las autoridades y la comunidad del conocimiento de este peligro geológico y aporte en la toma de decisiones y a la alerta temprana.

Finalmente, combinando los datos de monitoreo con los trabajos de campo, se elaboró nuevos mapas de peligrosidad para el deslizamiento de Maca, incluyendo ahora el de Peligro Sísmico y el de Peligro Múltiple.

2. Factores Influyentes en el Deslizamiento

Las causas principales del continuo avance del deslizamiento de Maca se atribuyen a factores climáticos y tectónicos:

2.1 Factores Climáticos: Precipitaciones

La ubicación geográfica del deslizamiento de Maca, hace que los periodos lluviosos y de sequía se diferencien claramente. El periodo de precipitaciones corresponde a los meses entre diciembre y abril, mientras el periodo de estiaje a los meses entre mayo a octubre. En el presente informe se recopilieron datos pluviométricos de la estación CHIVAY (con código 000758) administrado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) que corresponde al periodo 2016, los valores de precipitación acumulada es muy variable que corresponde al total mensual expresado en mm (Figura 1); el SENAMHI registró cuatro eventos con mayor tasa de precipitación una el 23 de febrero con 17.70 mm/mes, el día 2 de marzo registro 10.50 mm/mes y los días 1 y 18 de abril la precipitación alcanzo un total mensual de 13.50 y 18.80 mm, finalmente el periodo lluvioso alcanzo un valor notable elevado máximo mensual acumulado de 18.80mm.

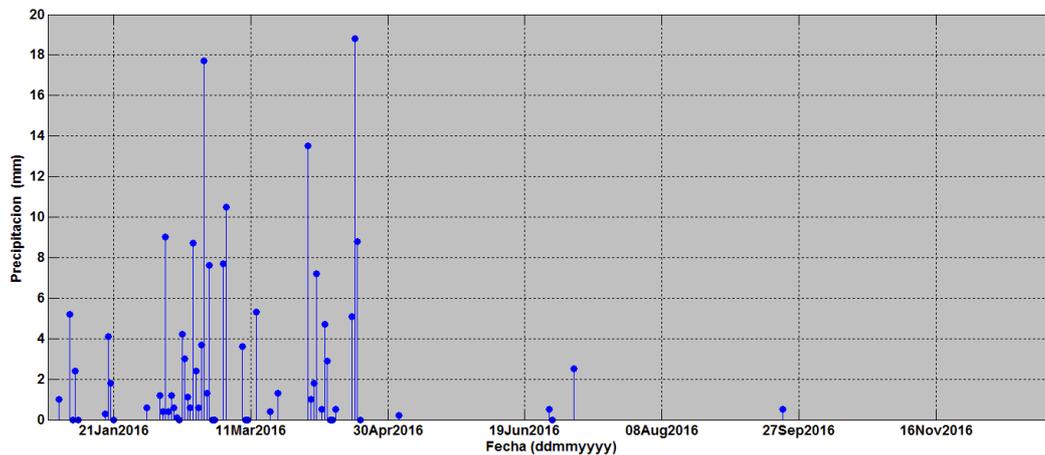


Figura 1. Precipitación mensual acumulada en la estación meteorológica Chivay, ubicado a ~18 km. del deslizamiento de Maca.

2.2 Factores Hidrológicos: Agua superficial y subterránea

En el deslizamiento de Maca, la variación del nivel freático es un factor que está condicionado por los periodos lluviosos, el riego no controlado y los afloramientos de agua en forma de manantiales, son factores hidrológicos e hidrogeológicos que condicionan la aceleración de los movimientos en masa ya que están directamente relacionados a las características y tipo de suelo (Zavala *et al.* 2012), que llegan a saturar y generar el desplazamiento de una porción del terreno (Lambe & Whitman, 1972). El INGEMMET en el 2012 realizó el primer estudio de evaluación Hidrogeológica en el valle de Colca, determinándose que el área de Maca, de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de agua subterránea, corresponde a un acuífero poroso no consolidado en depósitos aluviales y avalanchas de rocas y acuitardos sedimentarios en depósitos coluviales y avalanchas de escombros (Peña & Carpio, 2012).

2.3 Factores externos: Sísmicos

La sismicidad es uno de los factores más importantes como detonante del deslizamiento. Se ha compilado el catálogo de sismos registrados del Instituto Geofísico del Perú (IGP) próximos a la localidad de Maca. Para el presente informe los datos sísmicos corresponden al periodo de inicios del 2015 al 15 de noviembre del 2016 (periodo de monitoreo).

La Figura 2 muestra la frecuencia de ocurrencia y magnitud de los sismos, mientras que la figura 5 muestra la ubicación de los sismos ocurridos en el ámbito de 25 km a la redonda del poblado de Maca. Se resalta los eventos más importantes registrados por el IGP, durante el periodo mencionado, destacando el sismo el día 28 de agosto de 2015 con magnitud de 5.1 ML, en el 2016 se registraron dos sismos uno el 19 de febrero de 2016 de magnitud 5.0 ML y el día 14 de agosto de 2016 se produjo un sismo de 5.3 ML (5.6 MW) que generó importantes pérdidas debido con la intensidad que se sintió entre VI – V (fuente IGP).

Así mismo, son alrededor de 30 sismos con magnitudes entre 4.0 a 5.0ML los que ocurrieron en el ámbito del valle del Colca, que de manera directa o indirecta pudieron afectar el deslizamiento.

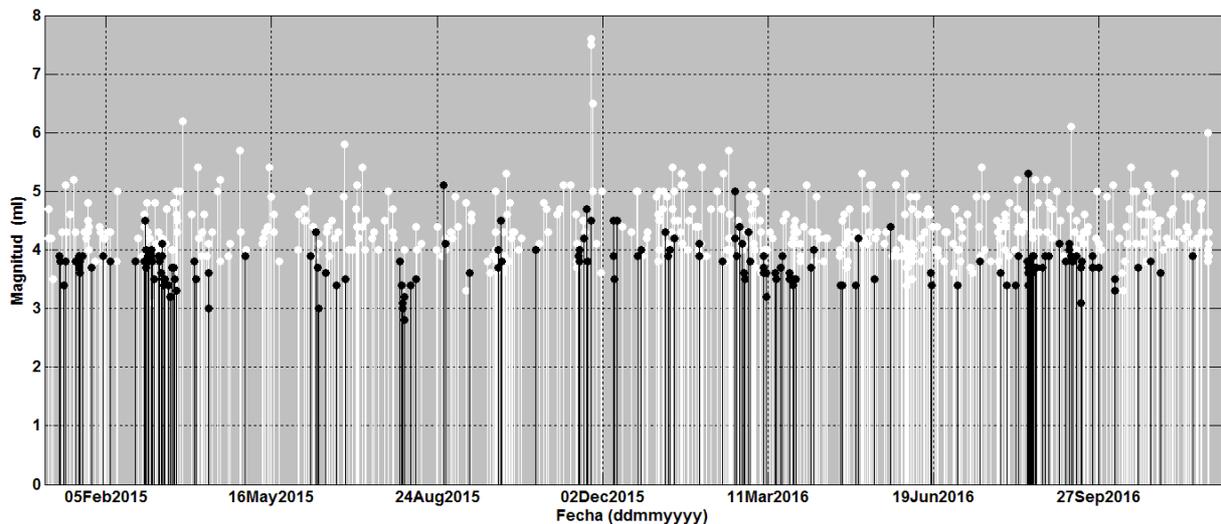


Figura 2. Catálogo sísmico 2015-2016, barras negras son sismos próximos a Maca.

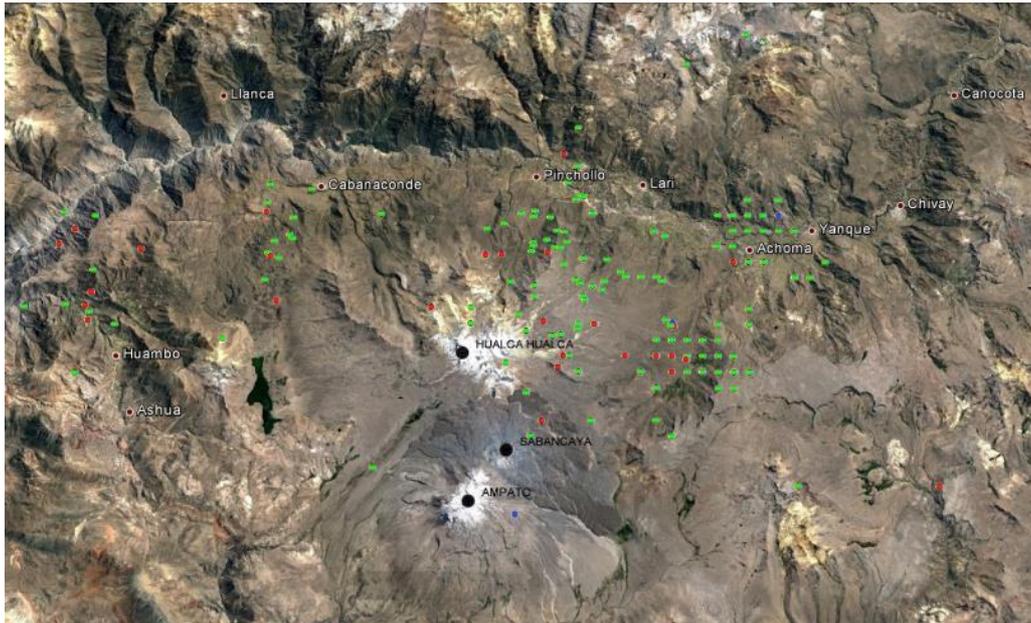


Figura 3. Ubicación de los sismos sentidos próximos al distrito de Maca, los puntos color verde corresponde a sismo con magnitud de 2 a 3 ML, puntos color rojo a sismos menores a 4 ML y puntos color azul sismos mayores a 4.0 ML.

3. Monitoreo del deslizamiento de Maca

El monitoreo al deslizamiento de Maca se basa en el principio de determinar los cambios de la morfología del cuerpo deslizante, mediante comparación de imágenes, cuantificación del movimiento del suelo, generación de modelos digitales del terreno, etc. Para ello se implementan puntos y redes de medición los cuales se encuentran distribuidos en el área del deslizamiento (Miranda et al., 2016). Se viene trabajando tres técnicas de medición que permiten obtener información relacionada al movimiento de masas, estas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de monitoreo empleados en los deslizamientos de Maca.

TÉCNICA	MÉTODO	RESULTADO	RANGO TÍPICO	PRECISIÓN TÍPICA
Monitoreo sísmico	Permanente	Cuantifica el movimiento del suelo	Variable	
Monitoreo GNSS	Estático permanente	Diferencia de coordenadas (3D)	Variable	H: 3 mm +0.1 ppm V: 3.5 mm +0.4 ppm
	RTK	Diferencia de coordenadas (3D)	Variable	H: ±8 mm +0.5 ppm V: ±15 mm +0.5 ppm
Monitoreo con Scanner	Scanner LiDAR	DEM	Variable	4 a 7 mm @ 100 m.
Monitoreo con Imágenes Radar	InSAR	Diferencia de mapas	variable	± >2 cm

3.1 Monitoreo con GPS

Método que permite conocer y cuantificar la magnitud, velocidad y dirección del desplazamiento en puntos específicos. Para desarrollar esta técnica se tiene distribuido 11 puntos de monitoreo, los mismos que son controlados y corregidos con una estación permanente (MADM). Así mismo se cuenta con tres estaciones GPS permanentes para una continua observación en los cambios del desplazamiento. En Figura 4 se observa la red de monitoreo mediante GPS.

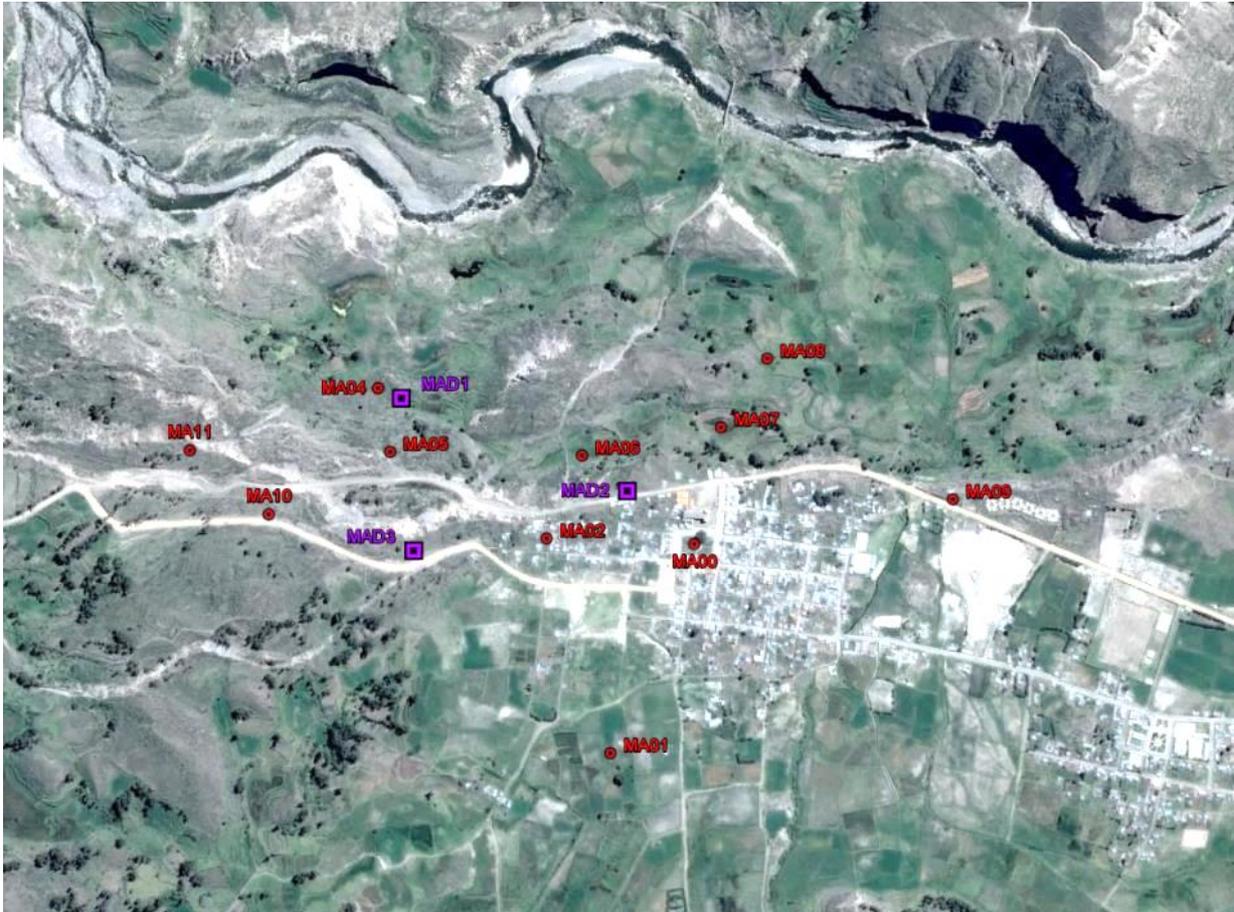


Figura 4. Distribución de puntos de monitoreo geodésico en el deslizamiento de Maca; los símbolos de color rojo son puntos de monitoreo temporal y símbolos color violeta, son estaciones GPS permanente.

a. Equipos GPS empleados:

Los equipos empleados son receptores GPS de última generación y de alta precisión con un sistema de seguridad de alta performance. Los equipos GPS de monitoreo se listan en la Tabla 2, la antena de las estaciones GPS permanentes se ubica en la columna de concreto de la estructura de seguridad (Figura 5).

El sistema de monitoreo permanente cuentan con el sistema de transmisión de datos en tiempo real, único en América Latina (para el monitoreo de deslizamientos), que trasmite sus datos vía WIFI desde las tres estaciones de monitoreo permanente MAD1, MADM y MAD3 hacia la Municipalidad de Maca y desde aquí se retrasmiten hacia la

Municipalidad de Lari y desde allí se envían los datos vía internet hacia las oficinas de INGEMMET en Arequipa.

Tabla 2. Equipos geodésicos para el monitoreo al deslizamiento de Maca.

MARCA	MODELO	ANTENA	PRECISION	EMPLEO
TRIMBLE	CORS NETR9	Zephyr Geodetic Model II + Domo	H: 3 mm +0.1 ppm V: 3.5 mm +0.4 ppm	Permanente
TOPCON	TOPCON GB1000	PG-A1	H: 3 mm +0.5 ppm V: 5 mm +0.5 ppm	Permanente
TRIMBLE	GNSS R10	Integrado	H: 8 mm +0.5 ppm V: 15 mm +0.5 ppm	Campañas
TRIMBLE	GNSS R6	Integrado	H: 8 mm +0.5 ppm V: 15 mm +0.5 ppm	Campañas



Figura 5. Estaciones GPS de monitoreo permanente con sistema de trasmisión de datos en tiempo casi real mediante WI-FI, A). Estación GPS MADM, B). Estación GPS MAD1

b. Adquisición de Datos

Los datos usados para el presente reporte fueron actualizados desde el día 14 de agosto del 2015, fecha en la que las mediciones de los puntos de monitoreo temporal emplearon el método de GPS RTK (Figura 6) al 15 de noviembre del 2016. Durante este periodo se realizaron cinco mediciones en los 11 puntos de monitoreo (15 meses), mientras las estaciones GPS permanentes iniciaron su registro desde el día 15 de agosto de 2015 en la estación MAD1 a un intervalo de registro de 5 segundos, el 09 de octubre de 2015 en la

estación MADM a un intervalo de registro de 10 segundos y desde el 04 de diciembre de 2015 en la estación MAD3 a un intervalo de registro de 10 segundos. Todas las estaciones continúan operando con un sistema de transmisión de datos en tiempo real el cual se inició el 28 de abril de 2016, fecha en la que se implementó en el deslizamiento de Maca, la primera red de monitoreo en tiempo real.



Figura 6. Método de medición mediante el sistema RTK sobre los puntos de monitoreo temporal.

c. Series temporales de GPS

Para los 11 puntos de monitoreo temporal, los datos fueron analizados con el software Trimble Business Center (TBC) versión 3.5.1, dentro de los parámetros a considerar para el procesamiento fue el Sistema UTM WGS 84, zona 19 Sur, la estación base para las correcciones en tiempo real se empleó a la estación MADM (estación permanente), las coordenadas base se calcularon mediante el software disponible vía online AUSPOS versión 2.2 (24/08/2015), con ello se calcularon las coordenadas precisas de cada punto y las variaciones entre coordenadas.

Para el análisis de los desplazamientos horizontales (este y norte) y vertical, se calcularon las coordenadas de cada campaña, estas se grafican en función del tiempo, es así que para los 11 puntos de monitoreo se tiene una nube de puntos que a lo largo del tiempo pueden ajustarse mediante una regresión lineal, a una línea de tendencia que describiría en promedio el avance o retroceso del movimiento del deslizamiento. En las Figuras 7 y 8, se muestran las series temporales de todos los puntos de monitoreo distribuidos en el deslizamiento de Maca para los puntos MA00 y MA01; para el resto de punto ver los Anexos. Las variaciones de cada una de las componentes de coordenadas se observan en los gráficos (latitud = **X**, longitud = **Y** y altura = **Z**) para el periodo del 14/08/2015 al 15/11/2016.

Los desplazamientos en mayor magnitud ocurrieron durante el periodo del 11/02/2016 al 24/04/2016 donde el punto MA04 se desplazó 0.480 metros y el punto MA05 se desplazó 0.632 metros a una velocidad entre 0.22 y 0.30 cm/mes, este proceso de aceleración en el desplazamiento estaría asociado directamente al sismo del 19/02/2016 de magnitud 5.0 MI

así mismo durante este periodo se registró una precipitación máxima de 17.70 mm y 10.50 mm en la estación, la componente vertical presento un hundimiento entre -0.093 a -0.225 metros.

Por el contrario, los puntos MA10 y MA11 presentan un desplazamiento entre 0.248 a 0.328 metros, para un periodo de análisis de 24/04/2016 al 19/07/2016 con una tasa de hundimiento mucho menor a los meses anteriores, por lo que ambas secciones del deslizamiento se mueven a diferentes velocidades en distintas épocas, lo cual geológicamente presentaría una composición muy diferente respecto a los puntos MA04 y MA05, por lo tanto el lado occidental del deslizamiento de acuerdo a los resultados es la más activa.

El periodo con menor velocidad de desplazamiento corresponde a los datos analizados entre el 19/07/2016 al 15/11/2016, donde los puntos MA04 y MA05 se desplazaron en el plano horizontal entre 0.168 y 0.108 metros, a una velocidad de 0.043 a 0.027 cm/mes, mientras que en la componente vertical en este periodo presentan una alta tasa de hundimiento entre -0.111 y -0.144.

El 14/08/2016 se produce un sismo de 5.3 MI con epicentro en la localidad de Ichupampa, de acuerdo a los resultados y datos de campo este sismo habría generado un desplazamiento mínimo (10 cm máximo) en las estaciones ubicadas en el cuerpo de mayor deslizamiento, mientras que ningún efecto en los hitos estables.

Para el periodo 11/02/2016 al 19/07/2016: la aceleración en el desplazamiento estaría estrechamente relacionado con un periodo de precipitaciones cuyos valores máximos observados están entre 10.50 a 18.80 mm que diferencian el periodo lluvioso en el valle del Colca; sumado a esto está la ocurrencia de los sismos descritos anteriormente. Para el último periodo el avance del desplazamiento se estabiliza, está claro que el periodo corresponde a una época de sequias y ausencia de eventos tectónicos que puedan influenciar en la tasa de desplazamiento disminuyendo notablemente.

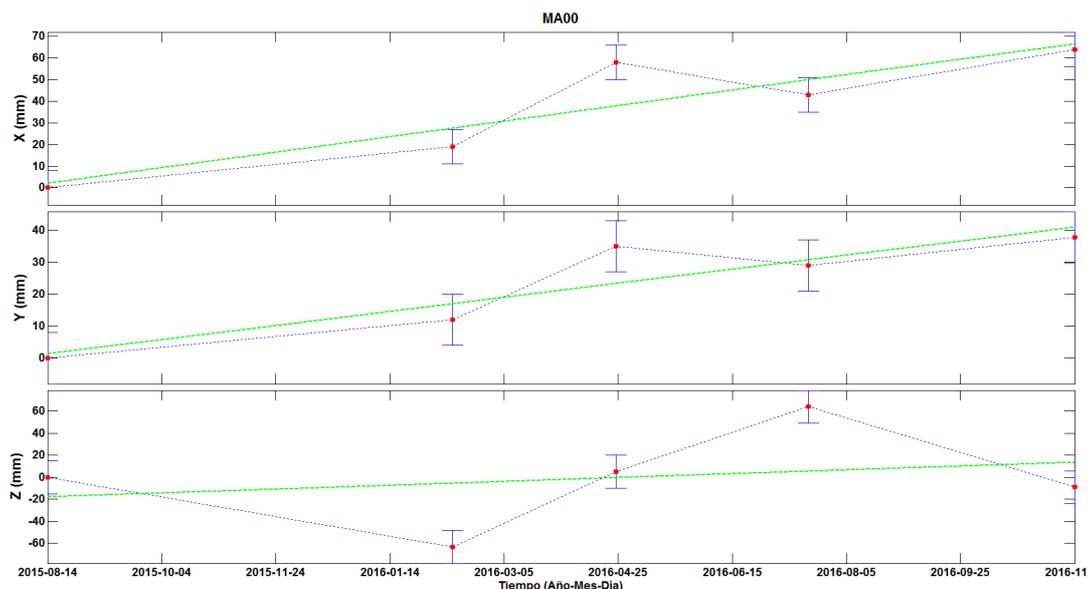


Figura 7. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA00.

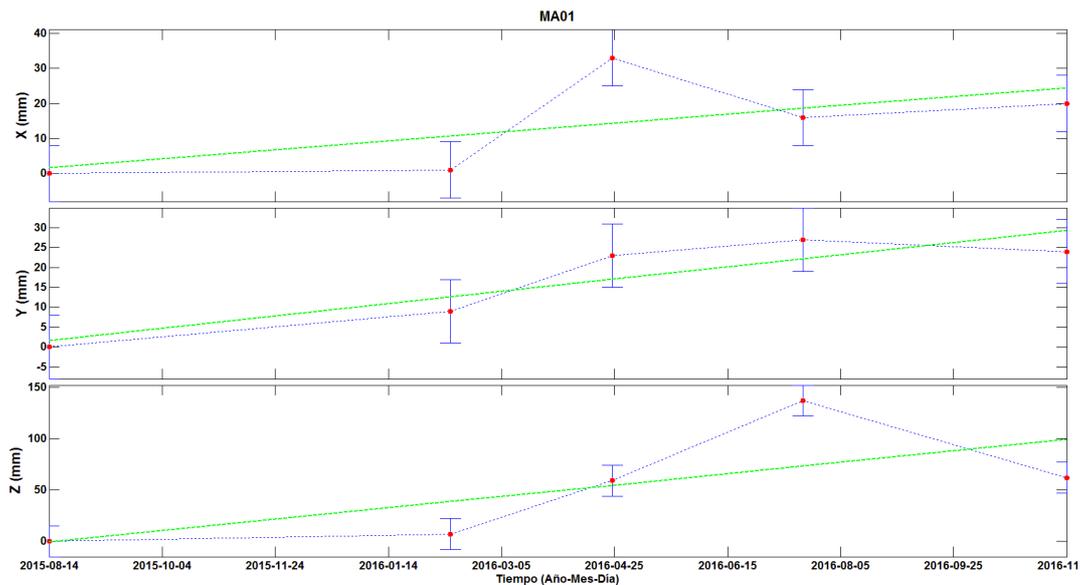


Figura 8. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA01.

La Tabla 3, muestra en promedio la magnitud de desplazamiento para cada punto. El hito MA04 se desplazó 1.611 metros a una velocidad de 10.7 cm/mes, el punto MA05 de desplazó 1.666 metros con una velocidad de 11.0 cm/mes, siendo estos dos puntos los de mayor velocidad. Los puntos MA10 presenta un desplazamiento de 0.524 m a 3.5 cm/mes, mientras que el punto MA11 se desplazó 0.837; estos dos puntos corresponden al sector occidental, el segundo en velocidad de desplazamiento. Mientras que, el sector oriental se considera la zona o área más estable del deslizamiento, ya que los puntos de monitoreo presentan valores de desplazamiento menores a 5 mm/mes.

Tabla 3. Muestra los valores totales de desplazamiento de los puntos de monitoreo para el periodo desde el 14/08/2015 al 15/11/2016.

PUNTO CONTROL	DESPLAZAMIENTO TOTAL			VELOCIDAD DESPLAZAMIENTO
	Norte (m)	Este (m)	Vertical (m)	cm/mes
MA00	0.064	0.038	-0.009	0.005
MA01	0.020	0.024	0.062	0.002
MA02	0.039	0.031	0.046	0.003
MA04	-0.143	1.605	-0.228	0.107
MA05	-0.149	1.660	-0.339	0.110
MA06	0.037	0.040	0.049	0.004
MA07	0.029	0.026	-0.044	0.003
MA08	0.006	0.012	0.003	0.001
MA09	-0.007	0.021	0.026	0.001
MA10	-0.001	0.524	-0.056	0.035
MA11	0.028	0.836	-0.537	0.055

d. Campo de Velocidades con GPS

El mapa en la Figura 9, presenta la tasa de velocidad y de desplazamiento para un periodo de 15.1 meses es decir desde el 14 de agosto de 2015 al 15 de noviembre de 2016.

La velocidad de movimiento del deslizamiento de Maca es determinado a partir del vector desplazamiento, donde el punto MA04 presenta un desplazamiento de 1.611 metros a una velocidad de 0.107 cm/mes y el punto MA05 un desplazamiento de 1.666 metros a una velocidad de 0.110 cm/mes. Esto significa mayor deformación horizontal y vertical, indica además que existe un cambio de posición de los puntos respecto al inicio de monitoreo, la dirección de desplazamiento para ambos puntos es en sentido norte, es decir en el sentido de la pendiente de la ladera, así mismo el punto MA10 experimento un desplazamiento de 0.524 metros a una velocidad de 0.035 cm/mes y el punto MA11 se desplazó 0.837 metros a una velocidad de 0.055 cm/mes. Por otro lado, los puntos distribuidos en extremo oriental, MA00, MA01, MA02, MA06, MA07, MA08 y MA09 presentan desplazamientos de 1.3 a 7.4 cm, lo cual corresponden a un área más estable con dirección preferente de desplazamiento hacia el noreste (figura 9).

A partir del mapa de velocidades podemos determinar:

- Sector Occidental: Comprende un área con mayor tasa de deformación y desplazamiento medidos a través de cuatro puntos de monitoreo MA04, MA05, MA10 y MA11.
- Sector Oriental: Comprende al área más estable del deslizamiento que se monitorea en base a siete puntos de control, MA00, MA01, MA02, MA06, MA07, MA08 y MA09, que incluye al Distrito de Maca.
- Las características geológicas son un factor muy importante en el comportamiento del extremo occidental del deslizamiento, ya que estas fueron descritas como materiales poco consolidados y altamente permeables, constituido de avalanchas, caída de rocas, gravas, cantos y bloques de matriz areno arcillosa.
- Los valores de desplazamiento obtenidos indicarían que existe una estrecha relación con el periodo lluvioso. Los eventos sísmicos y la tasa de desplazamiento, se considera en el valle del Colca a los meses entre diciembre y abril, donde las precipitaciones se infiltran en el material poco consolidado saturándolo hasta el límite de desplazamiento, lo cual concuerda con la aceleración en el proceso de deformación como lo demuestran los resultados.
- Con el periodo lluvioso las precipitaciones, saturan el nivel freático del suelo de acuerdo a su composición geológica, estas tienen una alta capacidad de almacenamiento de agua subterránea, saturándolo hasta el límite del colapso debido a la presión ejercida por las capas superiores

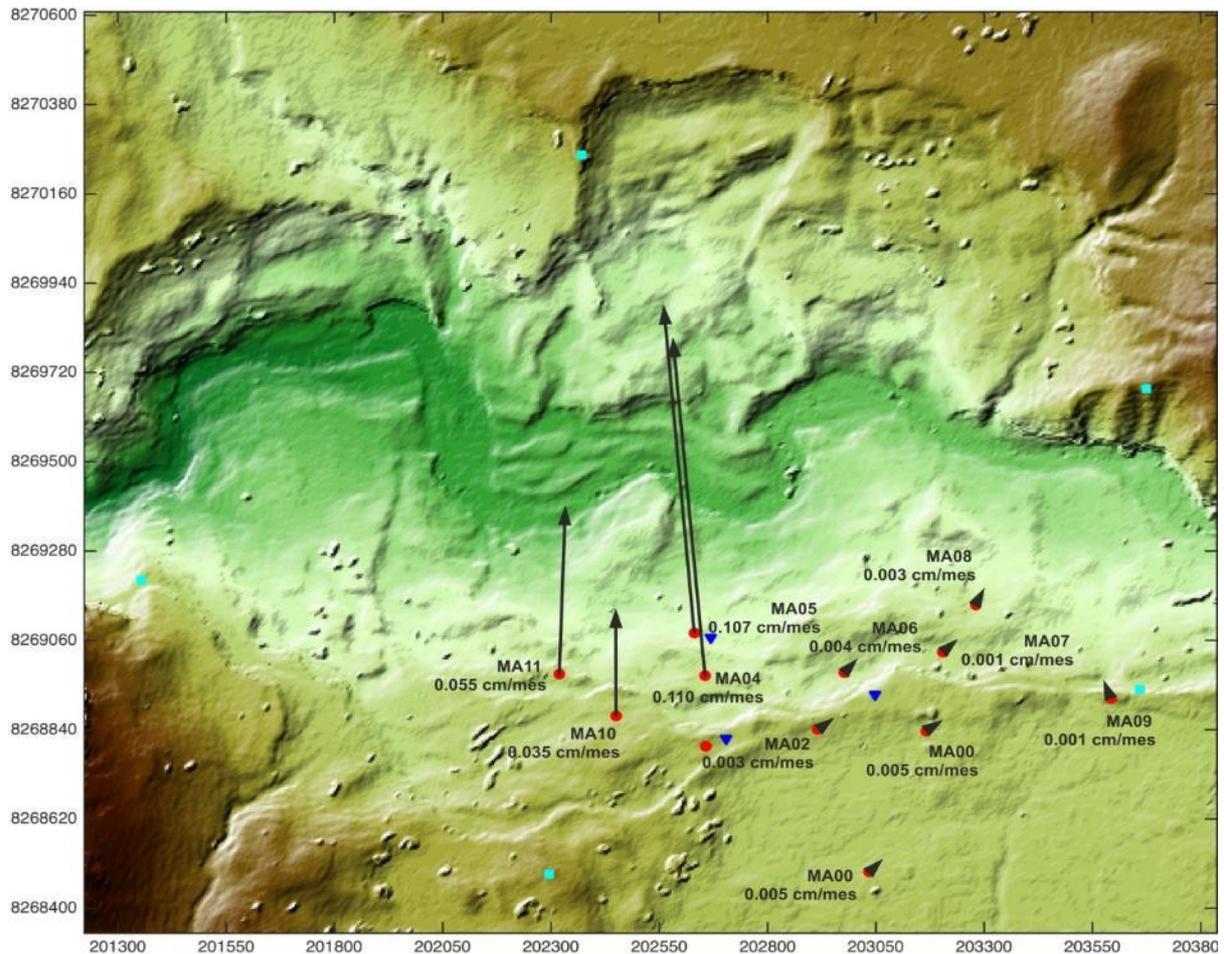


Figura 9. Desplazamiento y velocidad, obtenidos para el deslizamiento de Maca para un periodo de monitoreo de 15.1 meses.

3.2 Monitoreo con InSAR

Otro de los métodos empleados en el monitoreo del deslizamiento, es la aplicación de la Interferometría Radar con imágenes TERRASAR-X que permite detectar y medir la deformación del suelo. De acuerdo a la disponibilidad de imágenes, para el presente informe se logró realizar los cálculos a través de las imágenes 30574 del 25 de diciembre de 2015, 31075 del 27 de enero del 2016 y 48306 del 29 febrero del 2016 (Tabla 4). Al aplicar la técnica de diferencia de Interferogramas y stacking DInSAR (Interferogrametría Diferencial) se obtuvo como resultado un promedio del desplazamiento que indica elevación y/o hundimiento de la extensión del área cubierta por la imagen de radar.

El empleo de la metodología InSAR en los deslizamientos de Maca permitirá, determinar y cuantificar la deformación y el avance por los movimientos en masas durante los periodos de análisis, resolviendo el problema de *aliasing* espacial.

Para el procesamiento se ha venido usando un DEM obtenido de una imagen SPOT-6 con tamaño de pixel de 3 metros. Para eliminar los efectos atmosféricos se empleó el método de correlación de interferogramas, implementados en el programa DIAPSON (desarrollado por CNES), también es una técnica geodésica que se basa en hacer la diferencia de dos imágenes

radar, tomadas sobre una misma zona, pero en fechas diferentes. El resultado es una nueva imagen llamada interferograma en la cual las eventuales deformaciones del suelo se observan en secuencias de franjas de color. Cada secuencia de franjas equivale a una variación de 0 a 2π , lo que equivale a ~ 1.55 cm de desplazamiento del suelo en dirección del satélite (Gonzales, 2014), es así que el procesamiento consiste en:

- Pre procesamiento de las imágenes crudas adquiridas de agencias especializadas en la obtención de imágenes de radar.
- Extracción de las imágenes de radar para conversión de formato *cos* a *ci2*.
- Cálculo de *multilook*, Altitud de Ambigüedad (AA) y línea base perpendicular a las orbitas respectivas.
- Post procesamiento para determinar el desplazamiento en la serie de tiempo para las tres imágenes radar
- Análisis de los resultados con observaciones en campo

Tabla 4. Fechas y orbitas de adquisición de imágenes TERRASAR-X, altitud de ambigüedades, línea de base perpendicular y la separación en días para el par de interferogramas, usadas en los deslizamientos de Maca.

Órbitas / Fechas			30574	31075	48306
			25/12/2015	27/01/2016	29/02/2016
			AA / Baseline perpendicular		
30574	25/12/2015	Separación en días		-103/112	34/-286
31075	27/01/2016		33		26/-398
48306	29/02/2016		66	33	

a. Procesamiento InSAR

El software usado para el procesamiento y cálculo de los interferogramas fue DIAPASON V-4. Para las correcciones se empleó un DEM obtenido de una imagen SPOT-6 con tamaño de pixel o resolución espacial de 3 metros, que sirve para simular la componente topográfica del interferograma (Gonzales, 2014).

El cálculo del interferograma corresponde a la combinación de las imágenes 30574 y 31075 con fechas de adquisición 25/12/2015-27/01/2016 respectivamente. El periodo entre toma y toma de imágenes es de 33 días, en la que se observan franjas de gran longitud de onda, las que han sido removidas parcialmente usando el algoritmo correspondiente (informe 076-2016/INGEMMET/DL-LTD). También se observan franjas topográficas debido a la impresión del DEM usado.

b. Interpretación del interferograma

En la Figura 10, se observa el área de deformación demarcado a través de un rectángulo color rojo, que se ubica al noreste del pueblo de Maca, con una variación máxima de dos ciclos de onda, sobre un área de 300x120 metros aproximadamente; correspondería a un desplazamiento en dirección perpendicular a la geometría de vista del satélite (*LOS*) de aproximadamente de 3 cm, en dirección del río o la pendiente de la ladera del

deslizamiento, que corresponde a una nueva zona de desplazamiento, para lo cual se sugiere implementar puntos de GPS de monitoreo temporal.

El interferograma no ha detectado deformación en el área de mayor desplazamiento de acuerdo a los resultados GPS el área occidental del deslizamiento. Se atribuye este efecto a que la ventana de tiempo es de un mes y esta se encuentra dentro de la época de inicio de lluvias; es decir que el desplazamiento es mínimo las magnitudes estarían por debajo de la precisión de los interferogramas, sin embargo, la deformación encontrada al norte del pueblo de Maca es interesante, ya que no estaría siendo medida por el efecto *aliasing* espacial del método GPS, por lo que pensamos implementar dos puntos de reiteración en esa zona.

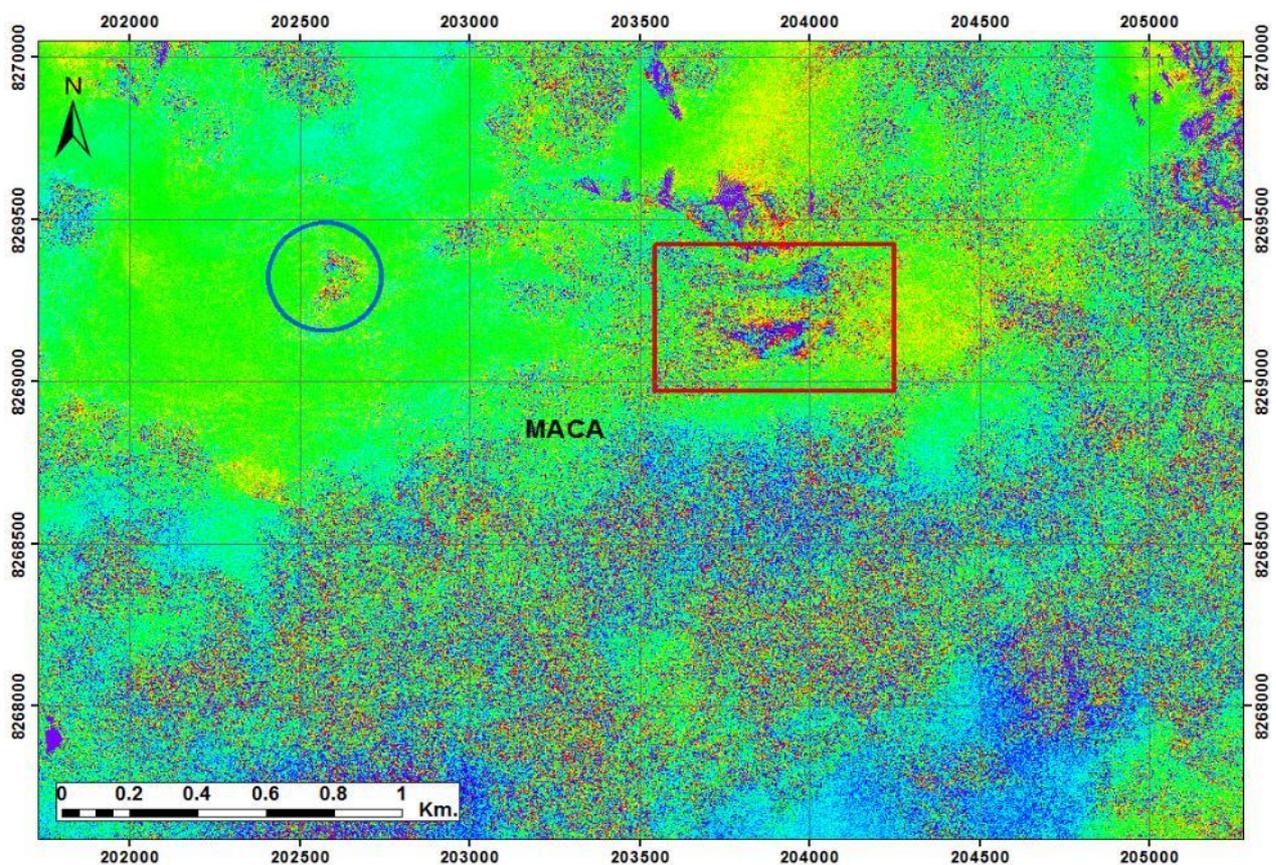


Figura 10. Interferograma obtenido del par de imágenes radar 30574-31075, para el deslizamiento de Maca a través de "Imágenes satelitales TERRASAR-X proporcionadas por el CNOIS, en el marco del Convenio OFFSET Perú-AIRBUS D&S y procesadas por el **INGEMMET**".

4. GEODINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO Y SU INFLUENCIA SOBRE MACA

A continuación se hacen algunas aclaraciones adicionales respecto a este deslizamiento:

1. Este proceso geológico activo que afecta la zona urbana en Maca, terrenos de cultivo y la carretera, tiene un avance progresivo (hacia el río Colca) como retrogresivo (hacia el poblado).
2. La delimitación o zonificación de zonas peligrosas, no implica considerar el cuerpo mismo del deslizamiento que está en movimiento activo (agrietamientos, saltos,

bofedales, áreas disturbadas, etc.); y las zonas al pie del deslizamiento (el cual podría represar el río Colca), sino también el material arriba de la “cabecera” o escarpa principal. Considerando el sentido de los factores detonantes (ver siguiente ítem).

3. En la zona de Maca y alrededores se consideran los siguientes detonantes: a) El aumento de las precipitaciones o lluvias que se infiltran en el suelo y rocas fracturadas. Estas saturan el material mueble, produciendo su pérdida de cohesión, agrietamientos y desplazamientos; b) presencia de napa freática superficial; infiltración no solo de aguas de lluvia sino también de las zonas de riego; y c) ocurrencia de sismos asociados a fallas activas en la región, que origina una mayor aceleración en el suelo como resultado de la vibración sísmica.

4.1 Geodinámica del Deslizamiento de Maca (Figura 11):

Este mapa muestra los principales sistemas de escarpas y agrietamientos asociados al movimiento del deslizamiento de Maca. Las **Escarpas Principales** corresponden a aquellas que coronan el deslizamiento y muestran saltos mayores a 2 metros de altura. Las **Escarpas Secundarias** son zonas de deformación dentro de la masa del deslizamiento, están asociadas a saltos que varían entre 1 a 2 metros y zonas de compresión y extensión; en algunos casos se muestra un “basculamiento” o inclinación de las escarpas en sentido opuesto a la dirección del movimiento, típico de un deslizamiento de tipo rotacional.

a. Mapa de Peligrosidad a Movimientos en Masa (Figura 12):

En este mapa se aprecia la zonificación del sector Maca de acuerdo a su grado de peligrosidad, diferenciándose tres sectores:

ZONA		CARACTERÍSTICAS
	Peligro Muy Alto	Corresponde a la zona de mayor deformación y la que es actualmente la más afectada por el deslizamiento. Se caracteriza por tener una superficie irregular, con escarpas secundarias y grietas importantes y la presencia de zonas de emanación de agua de infiltración permanentes, que constituye el principal detonante del deslizamiento. Las estaciones de monitoreo han registrado desplazamientos importantes, llegando a 1.3 m al año (Periodo 2015-2016).
	Peligro Alto	Corresponde al resto del cuerpo del deslizamiento; presenta también una superficie ondulada con saltos y escarpas secundarias. Zona que muestra una deformación importante, principalmente en épocas de lluvias o cuando se producen inundaciones asociadas a la agricultura. La presencia de zonas de emanación de agua de infiltración es limitada en época de estiaje, pero abundante en época de lluvia. Las estaciones de monitoreo han reportado pequeños desplazamientos menores en esta área que oscilan entre 0.5cm a 2cm por año.

	Peligro Medio	Representa el área alrededor del deslizamiento de Maca, tanto aguas abajo, como aguas arriba de la escarpa principal del deslizamiento. Esta zona puede ser incorporada al deslizamiento por la acción de un detonante externo, caso de un sismo de regular intensidad. Presenta tasas de movimiento menores a 1cm por año, sin embargo, esta condición podría cambiar de incrementarse el agua de infiltración en el terreno, por un fenómeno de lluvias extremas, por ejemplo.
--	----------------------	--

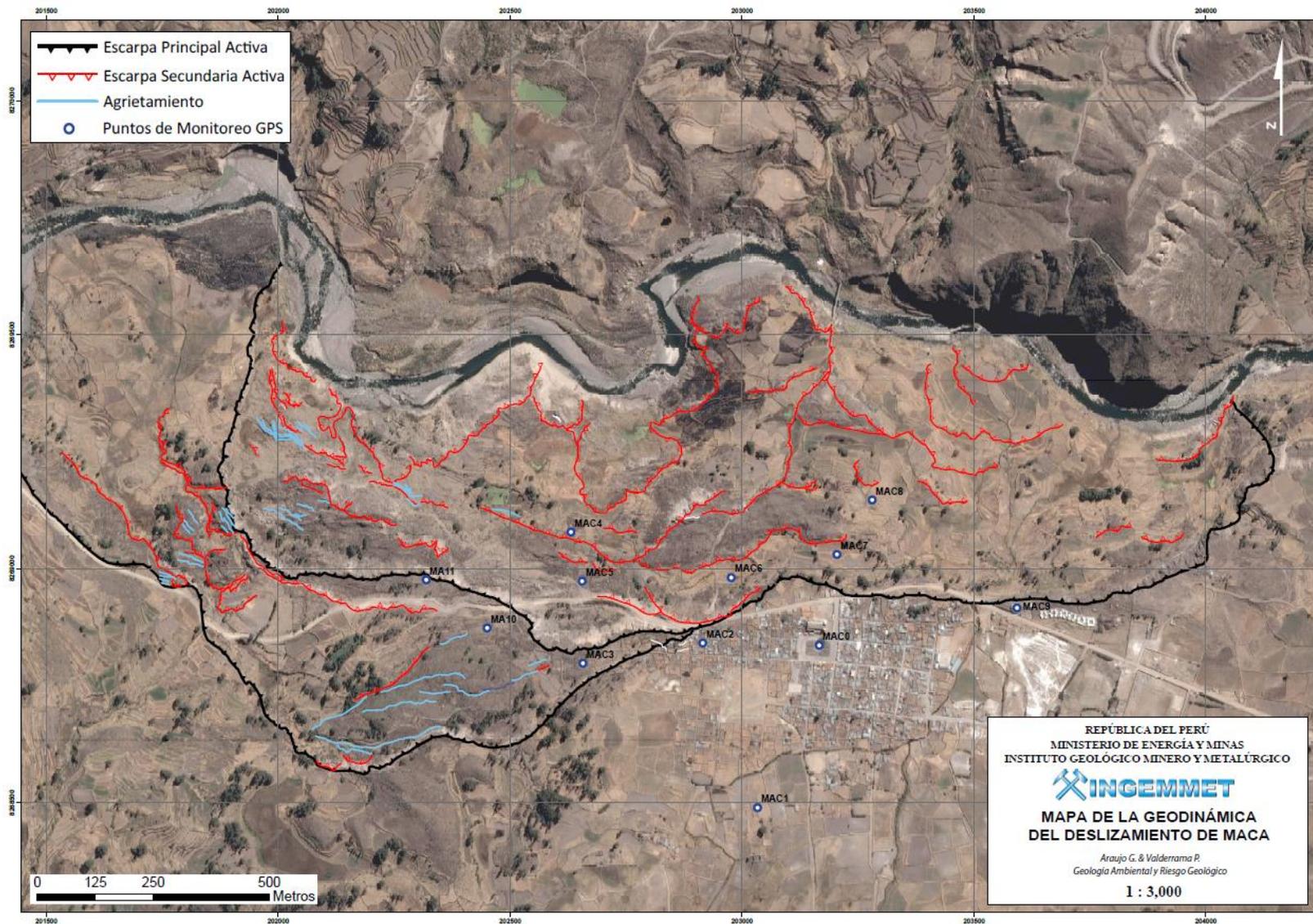


Figura 11: Geodinámica en el deslizamiento de Maca indicando puntos de control, escarpas principales y secundarias.

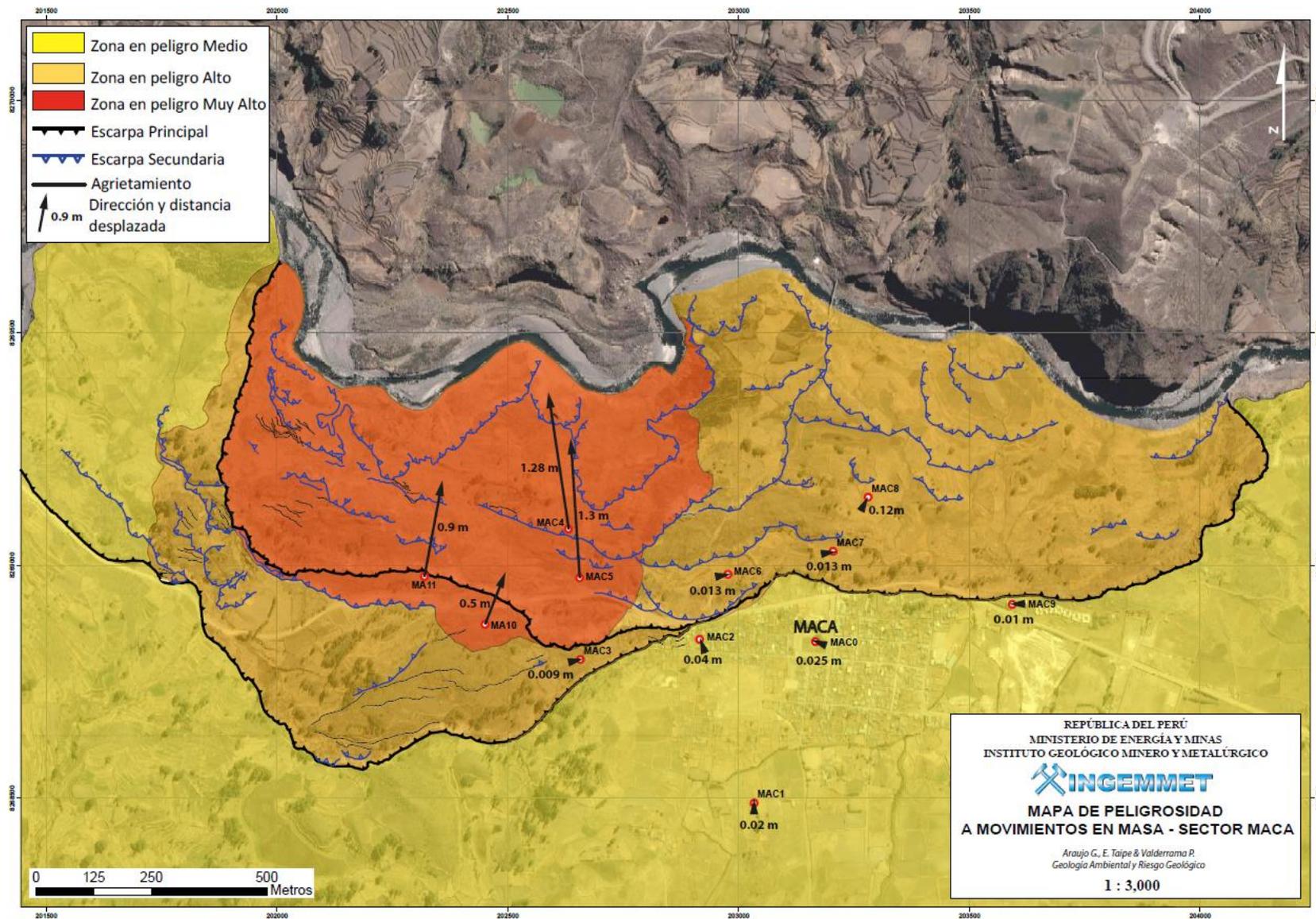


Figura 12: Mapa de Peligrosidad a Movimientos en Masa, sector Maca.

b. Mapa de Peligrosidad a Procesos Sísmicos (Figura 14):

Este mapa muestra el grado de afectación que sufrirá el sector Maca ante la ocurrencia de un sismo local, originado por la reactivación de una falla geológica activa que discurre cerca de la localidad de Maca, o por un sismo tectónico de intensidad considerable (sismo de subducción).

Se puede notar que todo el sector está en la **Zona de Peligro Muy Alto**, esto debido principalmente a las características geológicas del suelo, que lo hacen muy susceptible a generar **procesos de licuación de suelos** durante un sismo que produciría el colapso de viviendas en la zona.

Esto ha sido tomado del trabajo realizado por Benavente *et al.*, 2016 (Ingemmet, en prensa) donde se determina que la reactivación de la falla Maca tiene una magnitud máxima probable de 6.71 Mw, ubicando los poblados de Maca, Lari y Madrigal en un grado alto de peligrosidad, como se consigna en el “Mapa de peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos detonados por sismos de la falla Maca” (Figura 13), que forma parte del Boletín Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Arequipa.

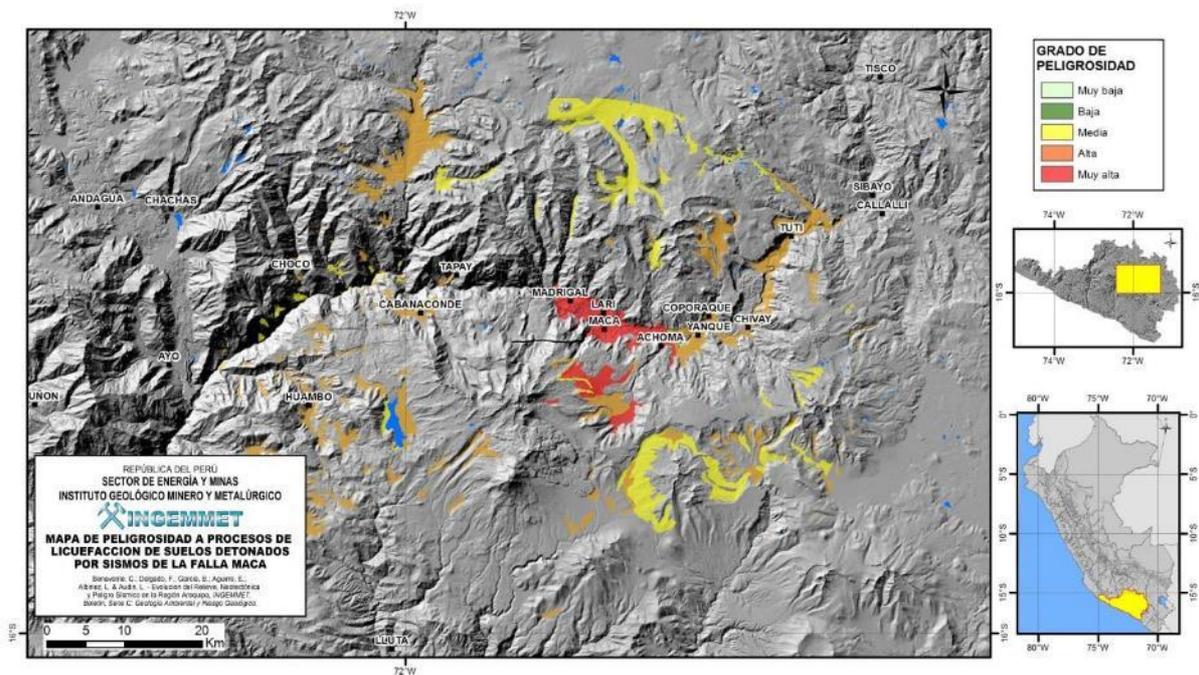


Figura 13: Mapa de Peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos asociados a la Falla Maca.

Un acercamiento de la zona de mapa se muestra en la Figura 14.

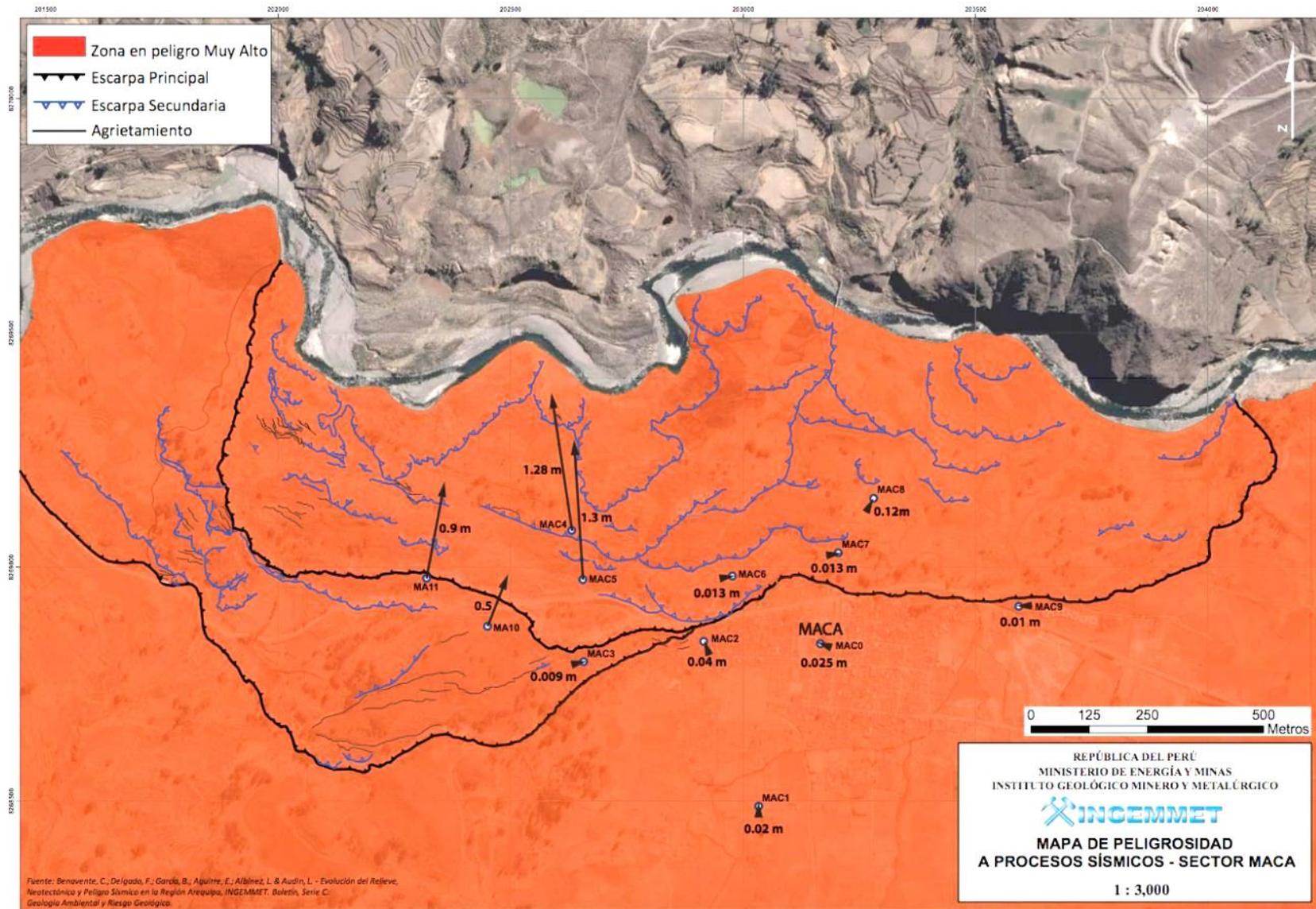


Figura 14. Mapa de Peligrosidad a Procesos Sísmicos

c. Mapa de Peligrosidad Múltiple (Figura 15):

El mapa de peligrosidad múltiple muestra cómo el sector de Maca está expuesto a la ocurrencia de fenómenos geológicos.

Para este caso se consideran dos zonas:

- I) **Zona de Peligro Muy Alto**, que engloba las escarpas y cuerpo del deslizamiento activo, ya que está en constante movimiento y este se podría ver acelerado por la ocurrencia de un sismo, una temporada extrema de lluvia teniendo en cuenta su intensidad y duración (lluvias de baja intensidad pero de larga duración o prolongadas, o lluvias cortas pero de gran intensidad), la rotura de un canal de regadío, etc.
- II) **Zona de Peligro Alto**, corresponde a los alrededores del deslizamiento, esta zona, donde se ubica el poblado de Maca, puede ser afectada tanto por deslizamientos activos como por los procesos asociados a un sismo: licuación de suelos, agrietamiento del terreno, derrumbes locales, etc.

Es importante aclarar que en este mapa solo se evalúa el deslizamiento de Maca como proceso que afecta este sector; otros procesos adyacentes como los que se encuentran en la margen derecha, caso los deslizamientos de Lari y Madrigal, no se evalúa la influencia sobre Maca.

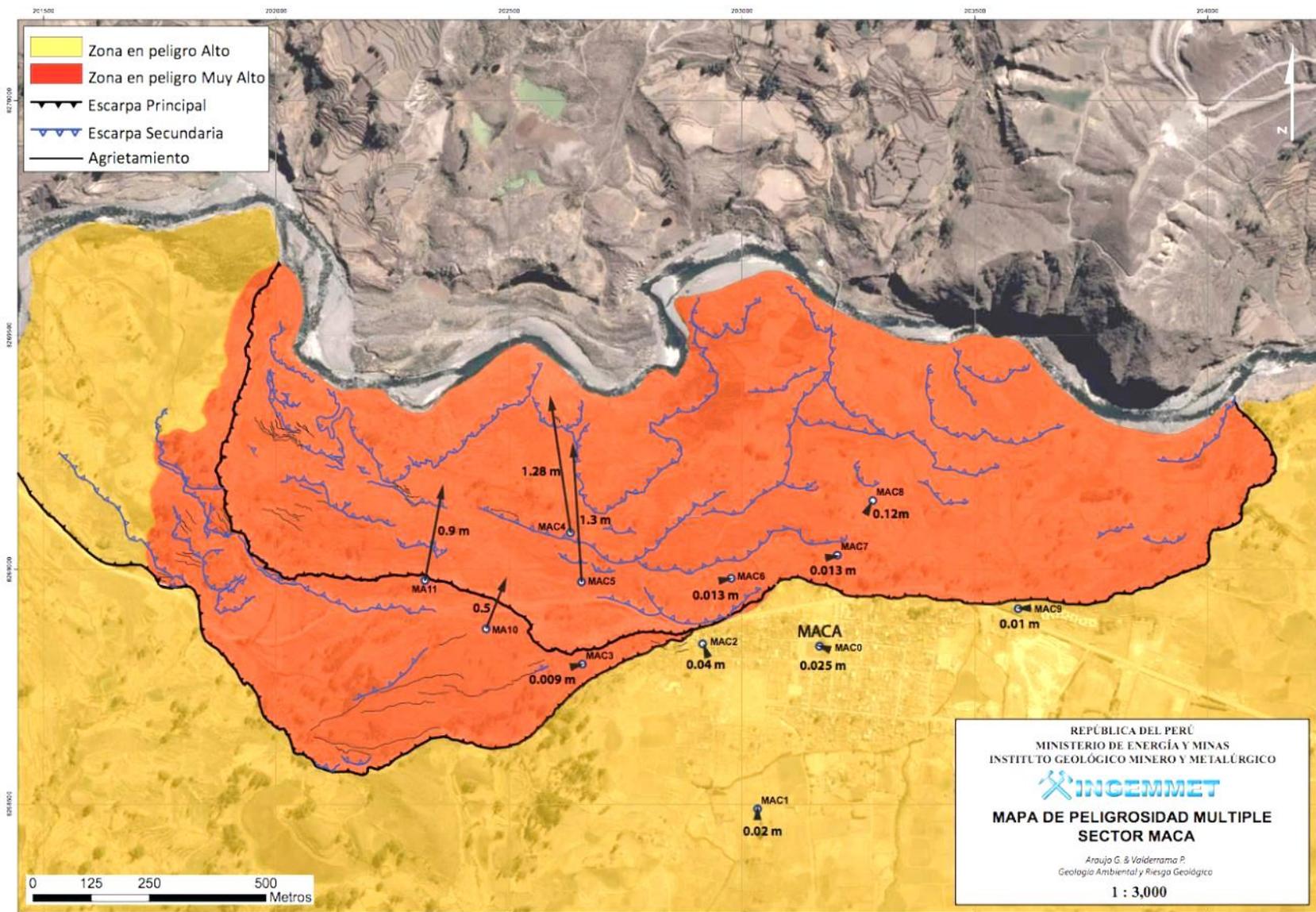


Figura 15: Mapa de Peligrosidad Múltiple del sector de Maca.

4. CONCLUSIONES

1. La aceleración en el proceso de desplazamiento resulta de una combinación de factores tectónicos, climatológicos y geomorfológicos, la pendiente del suelo, precipitación intensa, descenso e incremento del nivel freático del agua y suelos poco consolidados.
2. De acuerdo los registros del SENAMHI el valor total de lluvia acumulada mensual máxima fue de 18.80 mm y coincide con el periodo de mayor desplazamiento del deslizamiento.
3. El catalogo sísmico de los sismos sentidos durante el año 2015 y 2016 (Catalogo IGP), revela que se registraron tres sismos muy importantes en el ámbito dentro de ~10 km de la localidad de Maca de 5.0, 5.1 y 5.3 ML que actuaron como factor detonante en el desplazamiento y deformación de la masa deslizante, con implicancias en la dinámica del deslizamiento de Maca.
4. Durante los meses entre febrero a julio del 2016 el avance del deslizamiento presento una alta tasa de desplazamiento entre 0.517 a 0.632 metros, mientras en los meses entre julio a noviembre el desplazamiento fue en menor magnitud entre 0.080 a 0.168 metros. Aparentemente, como resultados de las intensas precipitaciones estacionales (diciembre a marzo)
5. La zona occidental del deslizamiento se desplazó durante el periodo de monitoreo entre 14 de agosto de 2015 a 15 de noviembre del 2016 (15.1 meses) a razón de 0.524 a 1.660 metros a una velocidad de 5.5 a 11.0 cm/mes, diferenciándose periodos con mayor y menor tasa de desplazamiento.
6. El monitoreo mediante imágenes TERRASAR-X ha identificado dos áreas de desplazamiento: 1) ubicado en el extremo noreste del pueblo de Maca con un desplazamiento de ~ 3 cm en 33 días; 2) una segunda área en el extremo noroeste del mismo pueblo colindante con el rio Colca, a la cual la acción del deslizamiento de debería a la infiltración de las aguas del rio.
7. En el deslizamiento de Maca se han diferenciado dos zonas de desplazamiento, una que corresponde al extremo occidental con mayor tasa de desplazamiento y el extremo oriental con menor tasa de desplazamiento.
8. La afectación inmediata por el avance del deslizamiento es la pérdida de suelos agrícolas, que en su mayoría es el sustento de la población en Maca, pero el continuo uso indiscriminado del agua a través del riego por gravedad está continuamente saturando el nivel piezómetro del suelo y por ende en el desplazamiento.
9. El poblado de Maca y sus alrededores se encuentra en una zona geológicamente muy activa, siendo actualmente afectada por un deslizamiento activo y con potencialidad de ser afectada por sismos y licuación de suelos. Los diversos mapas generados identifican claramente las zonas de mayor afectación ante fenómenos de movimiento en masas y procesos sísmicos.

10. Los mapas de peligros como una herramienta de gestión para la prevención de desastres (alerta temprana), determinan zonas que por sus características (en este caso en particular de Maca), **geológicas** (características y tipos de suelos: efectos de sitio), **hidrogeológicas** (presencia de surgencias de agua, bofedales, así como dirección de flujo de agua subterránea), **sísmicas** (sismicidad asociada principalmente a fallas geológicas) son consideradas potencialmente peligrosas o zonas críticas.
11. No podemos predecir con exactitud cuándo va suceder el evento principal, para ello se recurre al monitoreo permanente y en tiempo real, del deslizamiento que está implementado en Maca (geodésico y geofísico), podemos alertar a la población anticipadamente. La reubicación definitiva del poblado es necesaria.

5. Bibliografía

Cruden; D. M. and Varnes, D. J. 1996, Landslide types and processes. In Turner, A.K. and Schuster, R. L. (Editor), Landslide Investigation and Mitigation: Transportation Research Board, US National Research Council, Special Report 247, Washington, DC, pp. 36-75.

Gomez J.C., D. Huamán, E. Norabuena & L. Ocola (2005), Monitoreo geodésico de deslizamientos activos en el sector medio valle del río Colca, región Arequipa, CONCYTEC, IGP, Lima, Perú.

Lacroix P., J. Marino, E. Taipe, M. Wathelet, L. Tatard, B. Guillier, F. Bondoux, B. Zavala, P. Valderrama, L. Fidel, J.-C. Gómez, E. Norabuena (2012), Caracterización de los procesos sísmicos y gravitacional sobre el deslizamiento de Maca (Colca), Congreso de Geología Peruano, Sept 2012, Lima.

Lacroix P., M. Wathelet, E. Taipe, J. Marino, E. Norabuena, B. Guillier, L. Tatard, C. Flores (2013), Reactivation of the slow-moving landslide of Maca, Peru, by rainfalls and earthquakes, Landslides.

Lambe, W., Whitman, R. Mecánica de suelos. Limusa, 1972, facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.

Miranda R.; Taipe E.; Diaz J. & Araujo G. (2016). Monitoreo de deformación del deslizamiento de Maca con scanner LiDAR, periodo 2015-2016, INGEMMET - Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico, 2016,10p.

Taipe E.; Miranda R.; Araujo. G. & Diaz J. (2016). Monitoreo de deformación del deslizamiento de Maca - periodo 2015-2016, INGEMMET - Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico, 2016, 10p.

Lara, M., Sepúlveda, S.A., 2010. Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón ravine, Santiago, Central Chile, from an engineering geological approach. Environmental Earth Sciences, 60(6), 1227-1243

Rivera, M.; Samaniego, P.; Mariño, J.; Delgado, R.; Guillou, H.; LE Pennec, JL. (2012) - Historia eruptiva del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (Arequipa). En: XV Congreso Peruano de Geología, Lima-Perú, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.

Vargas, L. (1990) – Geología del Cuadrángulo de Arequipa. INGEMMET, Boletín, N°24:78p.
Sepúlveda, S.A.; Serey, A.; Lara, M.; Rebolledo, S. 2008b. Deslizamientos cosísmicos asociados al terremoto del 11 de febrero de 2007, sur de Chile. In Congreso Geológico Argentino, No. 17, Actas 1: 316-317. Salvador de Jujuy.

Zavala B, Mariño J., Lacroix P., Taipe E., Tatard L., Benavente C., Pari W., Macedo L., Peña F., Paxi R., Delgado F., Fidel L., Vilchez M., Villacorta S., Ochoa M., Luque G., Rosado M., Antayhua Y., Nuñez S., Vasquez S., Wathelet M., Guillier B., Bondoux F., Norabuena E., Gomez C. (2012). Evaluación de la Seguridad Física del Distrito de Maca. Informe Técnico Nro A6628, INGEMMET

ANEXOS

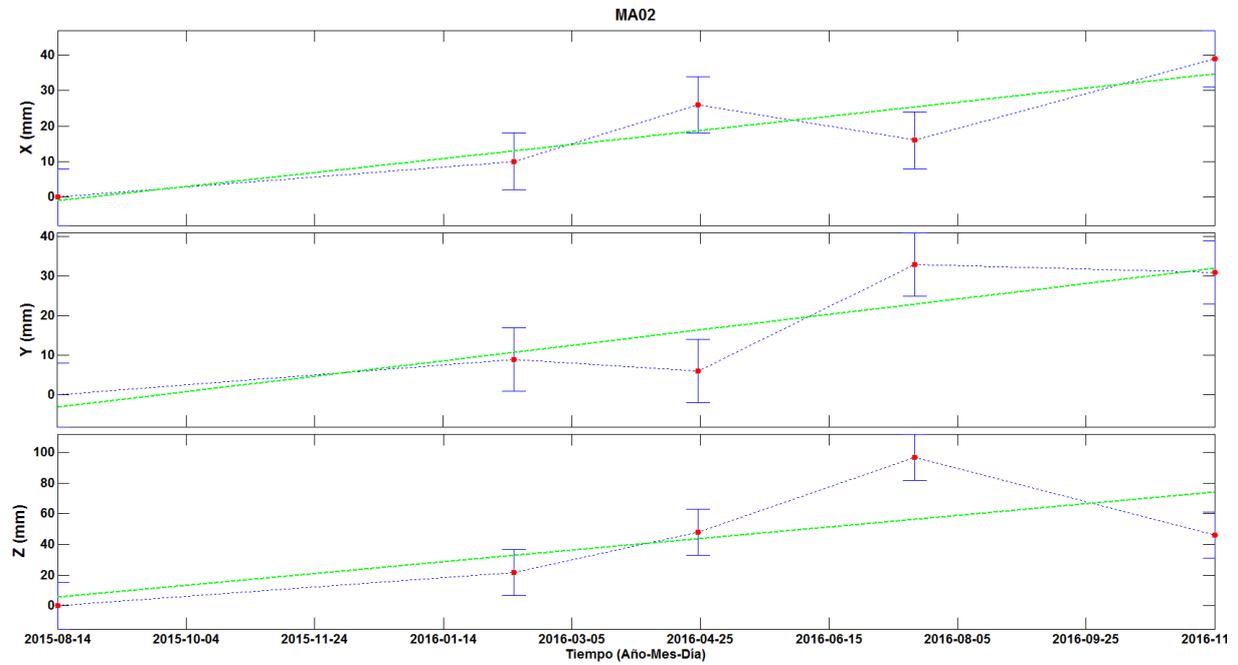


Figura A1. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA02.

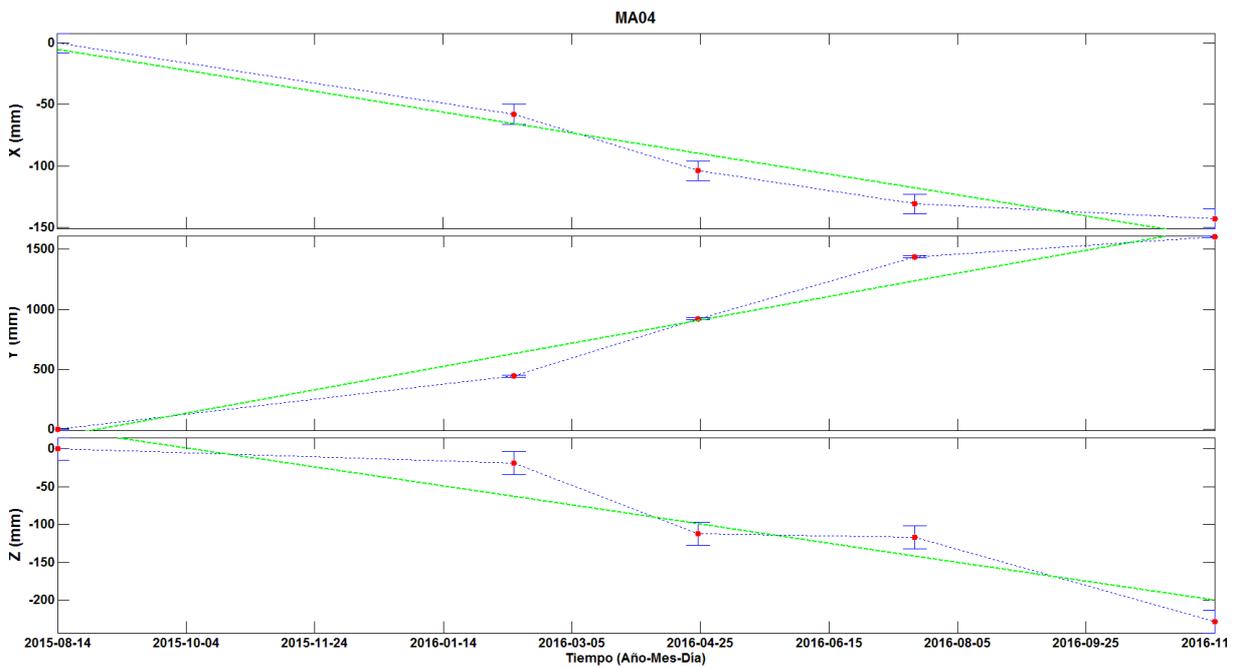


Figura A2. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA04.

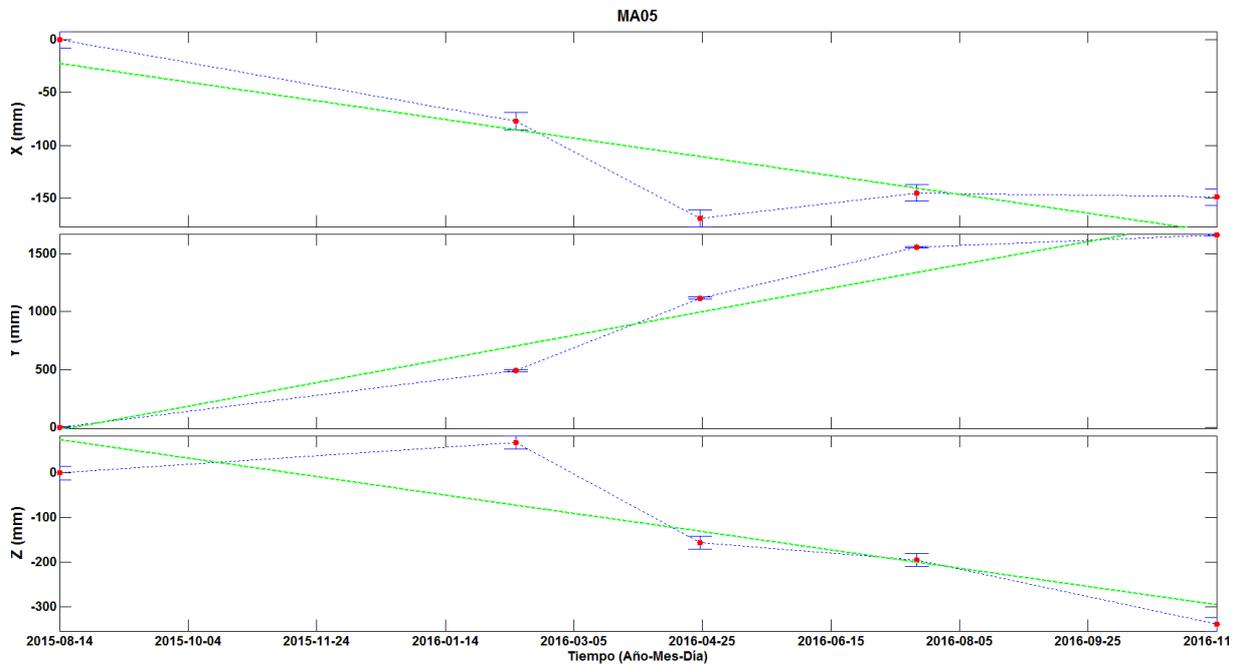


Figura A3. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA05.

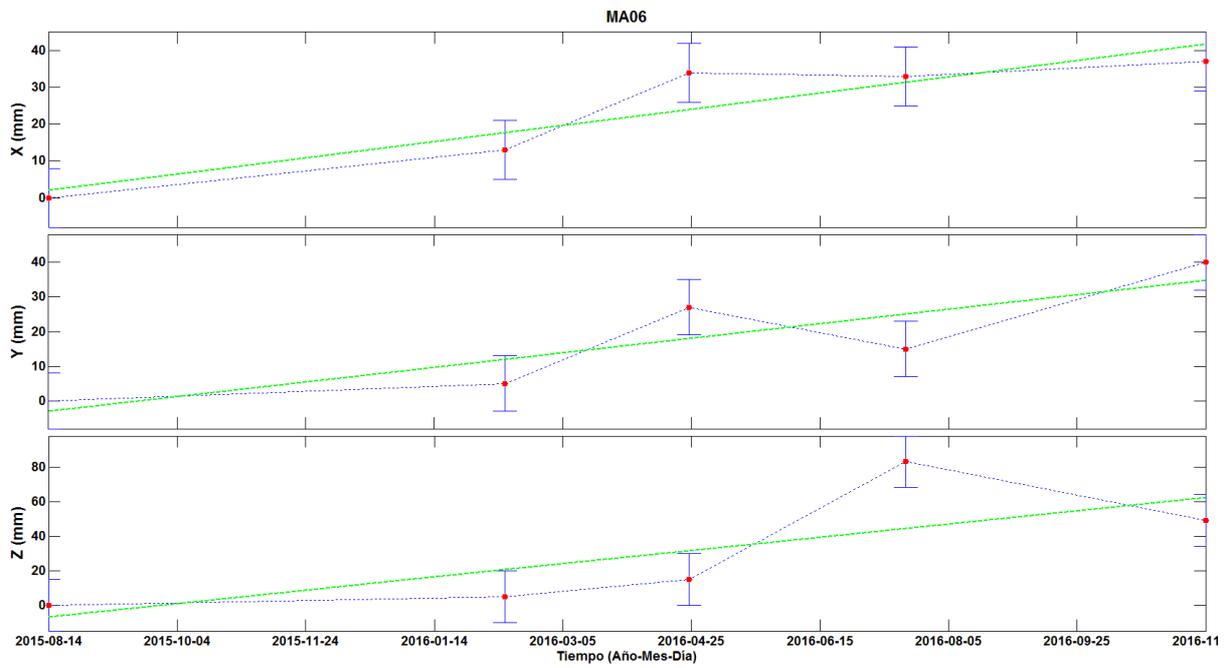


Figura A4. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA06.

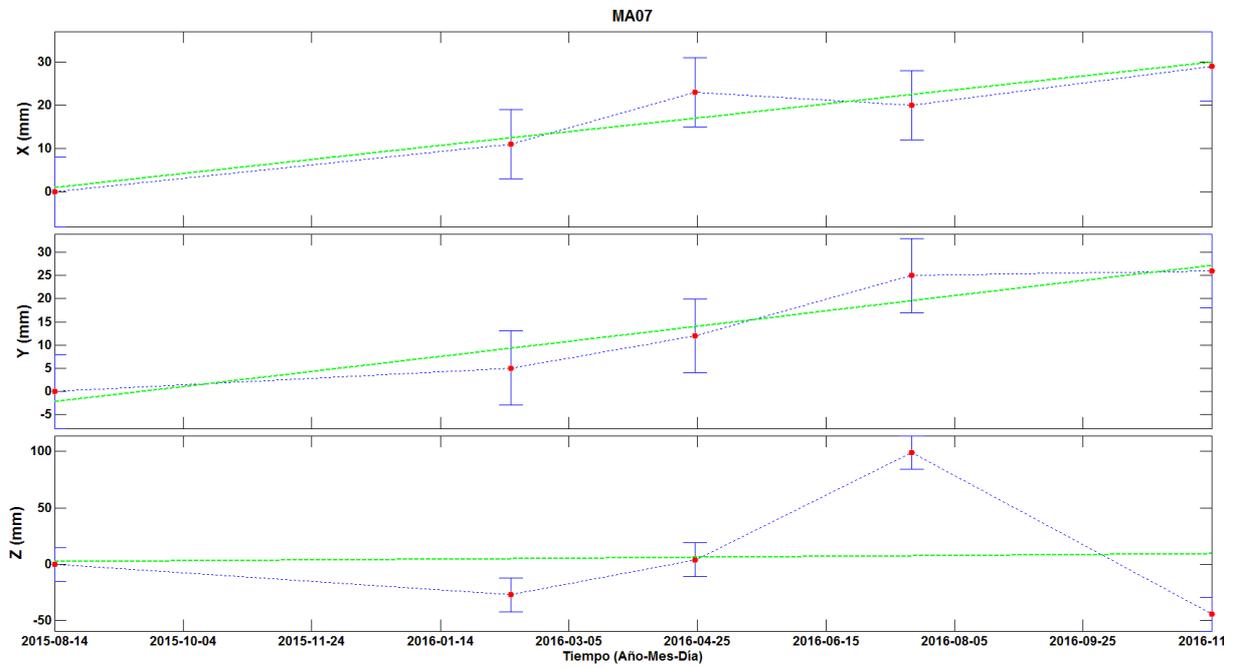


Figura A5. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA07.

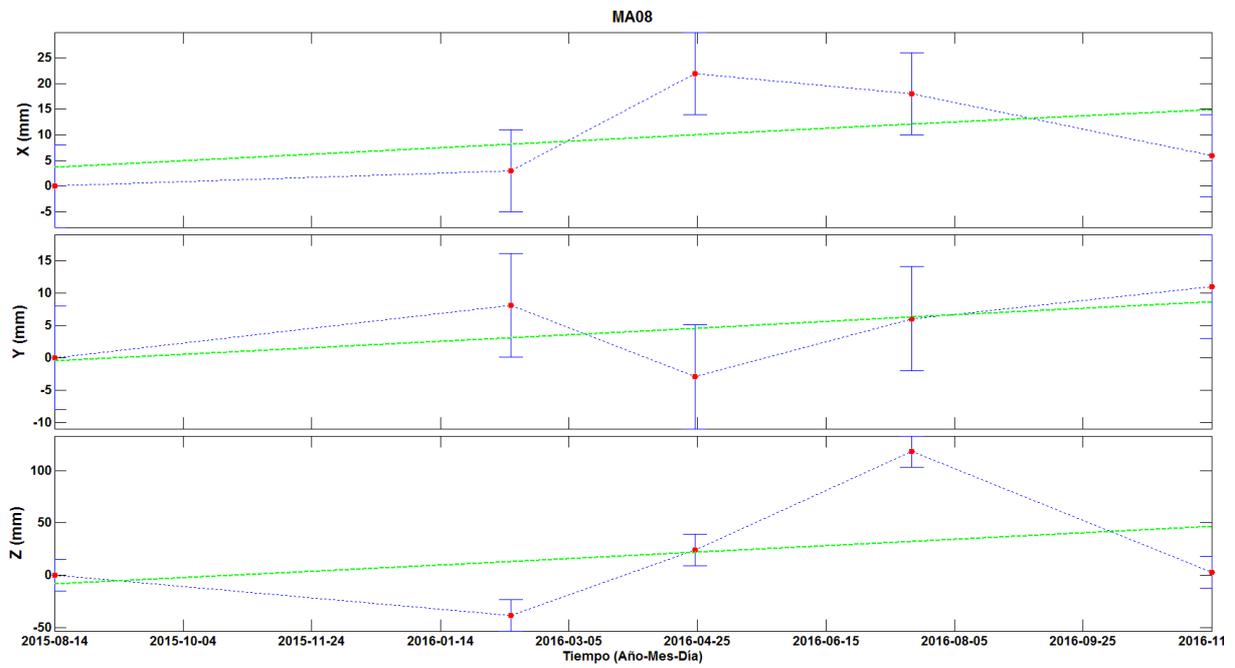


Figura A6. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA08.

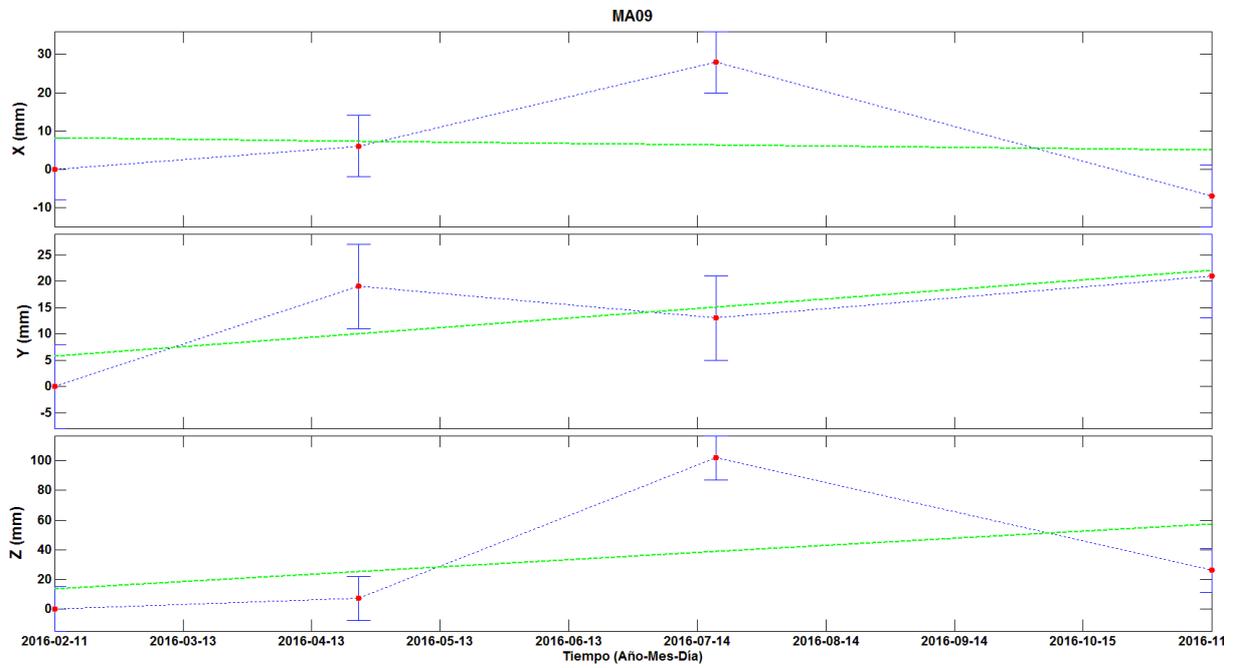


Figura A7. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA09.

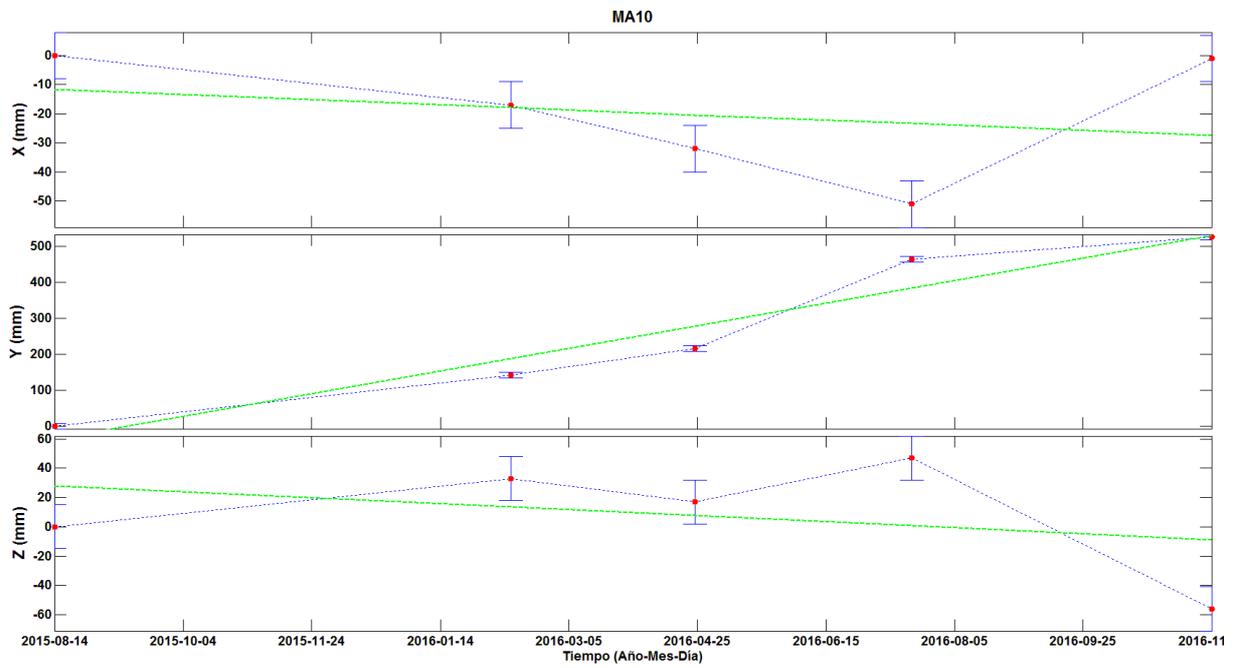


Figura A8. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA10.

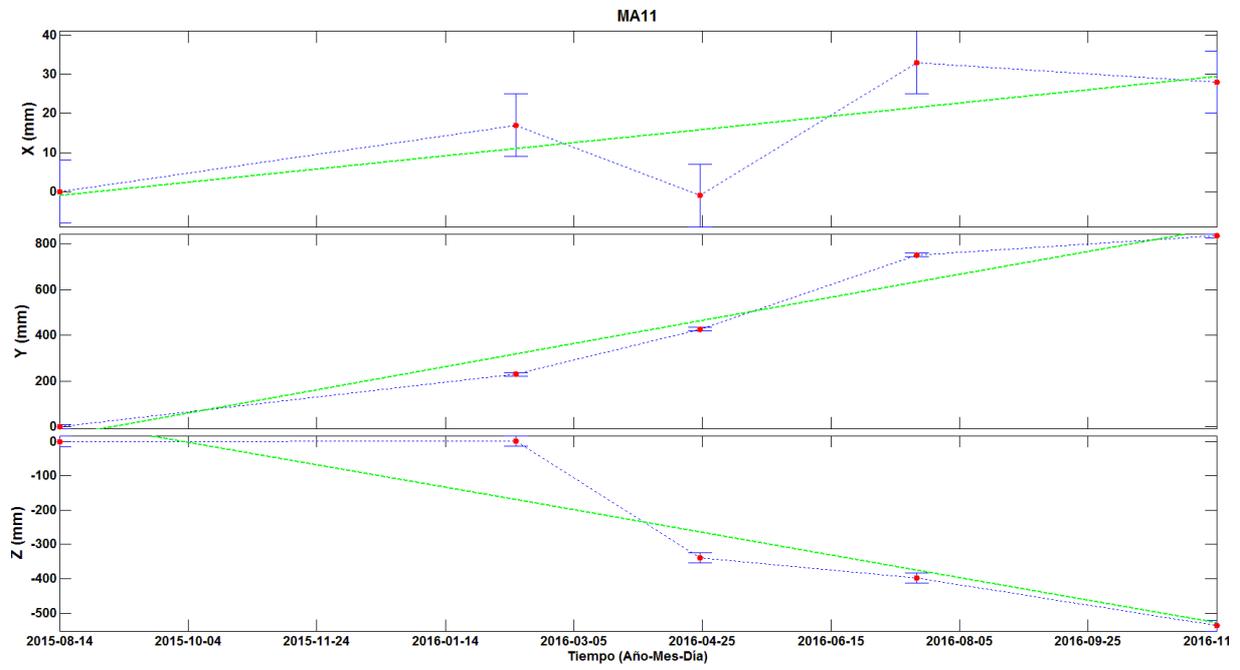


Figura A9. Series temporales de las componentes X, Y y Z para el punto MA11.