



Informe Técnico A6726

Evaluación Geológica Post-sismo del 14 de agosto del 2016: Reactivación de la falla Yanque Arequipa

GABINO F. DELGADO M.
CARLOS BENAVENTE E.
LUIS ALBINEZ B.
ENOCH AGUIRRE A.
EDU TAÍPE M.

Setiembre, 2016

CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	1
2.0	PARÁMETROS DEL SISMO	3
3.0	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO	3
4.0	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA – ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE FALLAS DEL VALLE DEL COLCA	6
	- FALLA YANQUE	6
5.0	EFFECTOS COSISMICOS	11
5.1	EFFECTOS GEOLÓGICOS	11
5.2	EFFECTOS EN LAS CONSTRUCCIONES	16
	. LOCALIDADES AFECTADAS	18
	. COMPARACIÓN DEL MODELO DE ACELERACIÓN SÍSMICA CON MAPAS DE INFRAESTRUCTURA COLPSADA	20
	. DESCRIPCIÓN DE DAÑOS POR LOCALIDADES	22
	- LOCALIDAD DE ICHUPAMPA	22
	- LOCALIDAD DE YANQUE	28
	- LOCALIDAD DE ACHOMA	33
5.3	FACTORES GEOLÓGICOS - GEOTÉCNICOS	38
	CONCLUSIONES	40
	RECOMENDACIONES	41
	REFERENCIAS	
	ANEXO 1: Mapas de peligrosidad en el Valle del colca	
	ANEXO 2: Inventario de movimientos en masa. Sismo 14/08/2016	
	ANEXO 3: Registro fotográfico de poblados afectados. Sismo 14/08/2016	
	LISTADO DE FOTOS Y FIGURAS	

EVALUACIÓN GEOLÓGICA POST-SISMO DEL 14 DE AGOSTO DEL 2016: REACTIVACIÓN DE LA FALLA YANQUE AREQUIPA

1.0 INTRODUCCIÓN.

El sábado 14 de agosto de 2016 a las 21:58 (Hora local), ocurrió un sismo de magnitud 5.3 ML (escala de Richter), a una profundidad de 8 Km (Fuente: IGP) [Ver figura 01].

El movimiento sísmico generó daños importantes en las localidades de Ichupampa, Yanque, Achoma, Maca, Coporaque y las localidades aledañas del Valle del Colca, provincia de Caylloma.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico – DGAR, comisionó a los profesionales Carlos Benavente Escobar, Gabino Fabrizio Delgado Madera, Edu Taipei Maquerhua y Luis Albinez Baca, para realizar la evaluación geológica post-sismo del área afectada. Los trabajos se realizaron del 17 al 24 de agosto del presente año en coordinación con INDECI, poniendo énfasis en la identificación de procesos geológicos detonados por el sismo (e.g. fallas geológicas, grietas, procesos de movimientos en masa, licuefacción, entre otros).

Es importante mencionar que desde el año 2015, INGEMMET viene trabajando en el departamento de Arequipa, realizando trabajos de identificación y estudios de fallas geológicas activas. Con este trabajo ponemos en evidencia un total de 83 fallas geológicas activas en toda la región, siendo la zona con mayor presencia de fallas el Valle del Colca. Los estudios de las fallas geológicas nos permitieron generar mapas de peligrosidad a movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismos, considerando las magnitudes máximas posibles e iso-aceleraciones que estas estructuras geológicas pueden generar (Wells & Coppersmith, 1994).

El presente informe contiene información geológica de campo pre y post sismo, así como, textos de boletines técnicos, mapas, topografía e imágenes satelitales. Asimismo, analizamos los daños en la infraestructura (viviendas y obras de ingeniería), teniendo en cuenta los aspectos geológicos de zona. Finalmente, emitimos conclusiones y recomendaciones que los gobiernos locales, provinciales e instituciones inmersas en el tema de desastres y prevención deberán tener en cuenta para la gestión adecuada del territorio

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

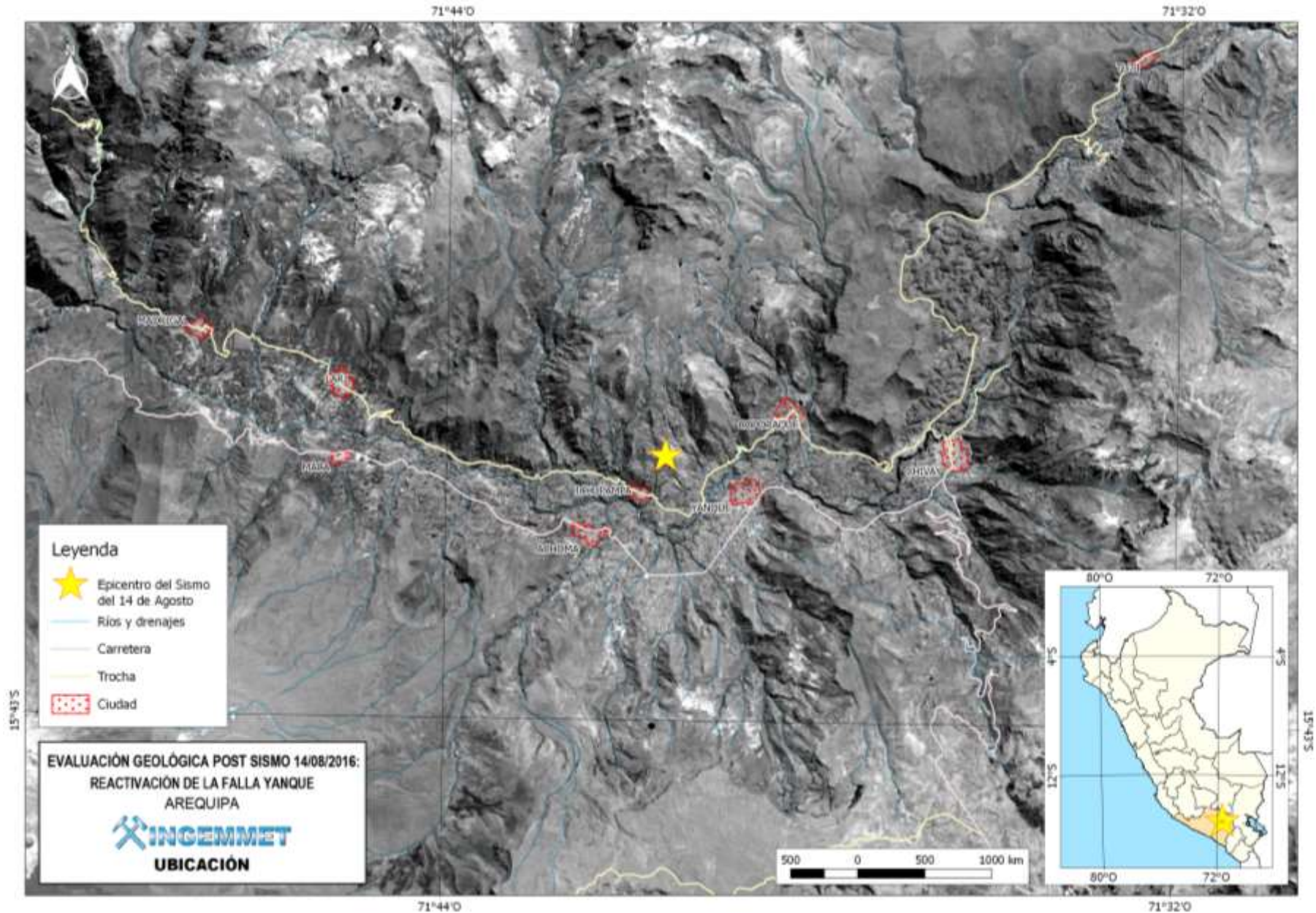


Figura 01: Mapa de ubicación del sismo del 14 de agosto del 2016.

2.0 PARÁMETROS DEL SISMO

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) con los datos obtenidos a través de su Red Sísmica Nacional ha determinado los siguientes parámetros hipocentrales (Fuente: IGP).

- Día : 14 de agosto de 2016
- Tiempo Origen : 21h 58m 58seg. (Hora Local).
- Latitud Sur : -15.64°
- Latitud Oeste : -71.68°
- Profundidad : 8 km
- Magnitud : 5.3ML (Richter).
- Intensidad : VI (MM) Ichupampa, Yanque, Achoma, Maca.
VI-V (MM) Coporaque, Chivay, Madrigal, Pinchollo,
Cabanaconde.
V-IV (MM) Lluta.
IV (MM) Huambo.
IV-III (MM) Chachas.
III (MM) Yura.

Las observaciones de campo y cartografiado post sismo sugieren que el sismo, descrito líneas arriba, esta relaciondo con la reactivación de una falla geológica, denominada Falla Yanque. Cabe resaltar que esta falla forma parte del Sistema de la fallas del Valle del Colca (Benavente et al., 2016). No se ha encontrado desplazamiento superficial o ruptura superficial (salto de falla), sin embargo si se evidencian grietas co-sísmicas alineadas a lo largo de la falla.

3.0 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

El Valle del Colca se encuentra en la parte media de la Cuenca del Río Camaná – Majes – Colca. Se caracteriza por tener una geomorfología y geología compleja, donde interactúan procesos tectónicos, volcánicos, climáticos y de movimientos en masa que dan lugar a un relieve abrupto. En tal sentido, el valle del Colca presenta en ambas márgenes montañas con pendientes elevadas y constituidas de rocas volcánicas y sedimentarias. El fondo de valle está constituido o colmatado por depósitos no consolidados, derivados de avalanchas, deslizamientos, lacustres, fluviales y fluvio-glaciares.

Dentro de la estratigrafía, en la zona de estudio se encuentran pequeños afloramientos del grupo Yura. En ambas márgenes del valle se observa rocas del Grupo Tacaza, compuesto de rocas volcánicas andesíticas. Se observan complejos volcánicos Mio-pliocenos del Grupo Barroso estos se encuentran emplazadas en las partes altas de los flancos del valle. Sus cumbres conservan la morfología de morrenas cuaternarias. Al norte de Chivay se observan bien conservados los pulsos lávicos cuaternarios del Grupo Andahua inferior; y los depósitos lacustres se encuentran emplazados en el fondo de valle acompañados de depósitos aluviales generados por eventos locales (figura 03).

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
 Reactivación de la falla Yanque

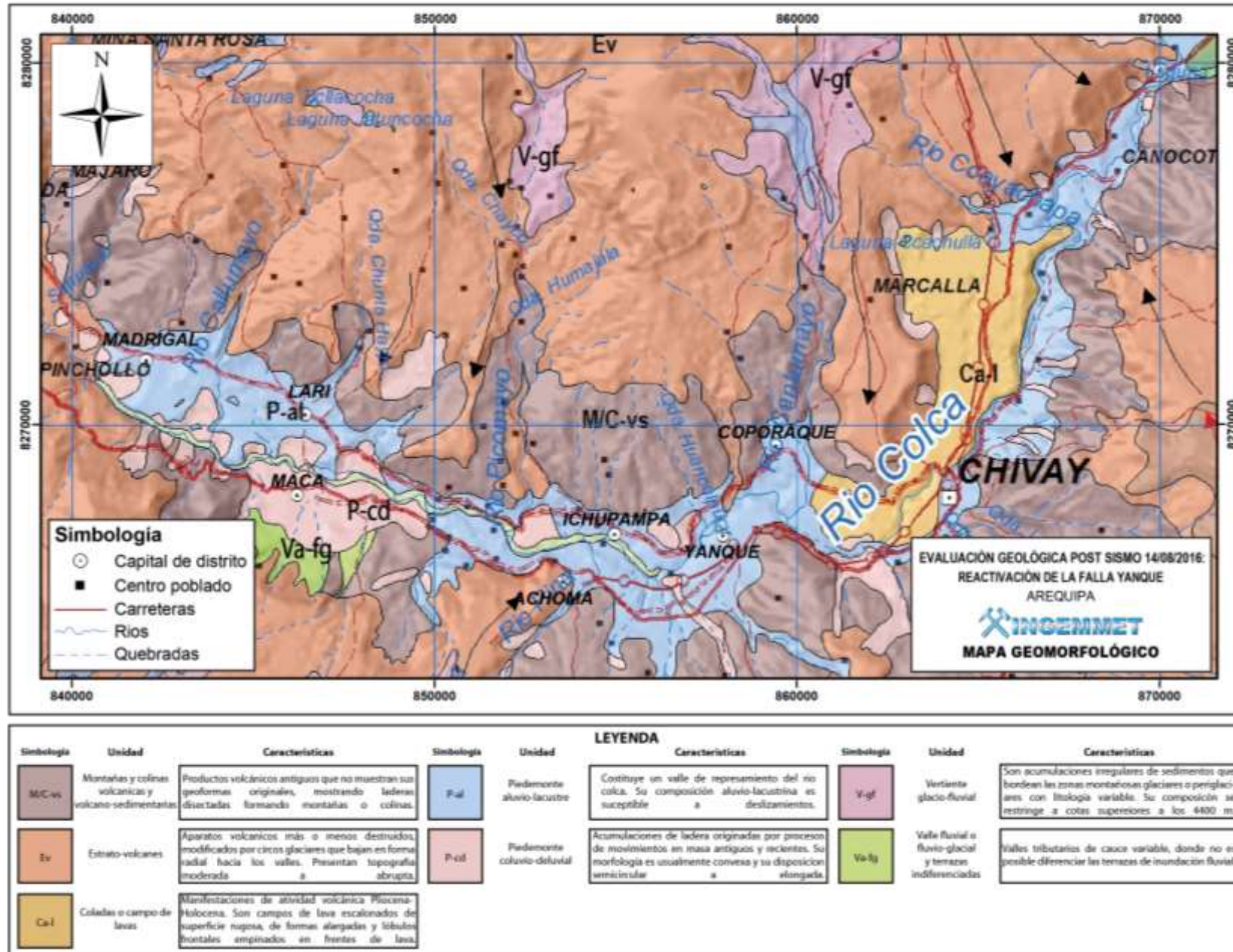


Figura 02: Mapa geomorfológico del Valle del Colca. Modificado de Zavala et al, 2014.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
 Reactivación de la falla Yanque

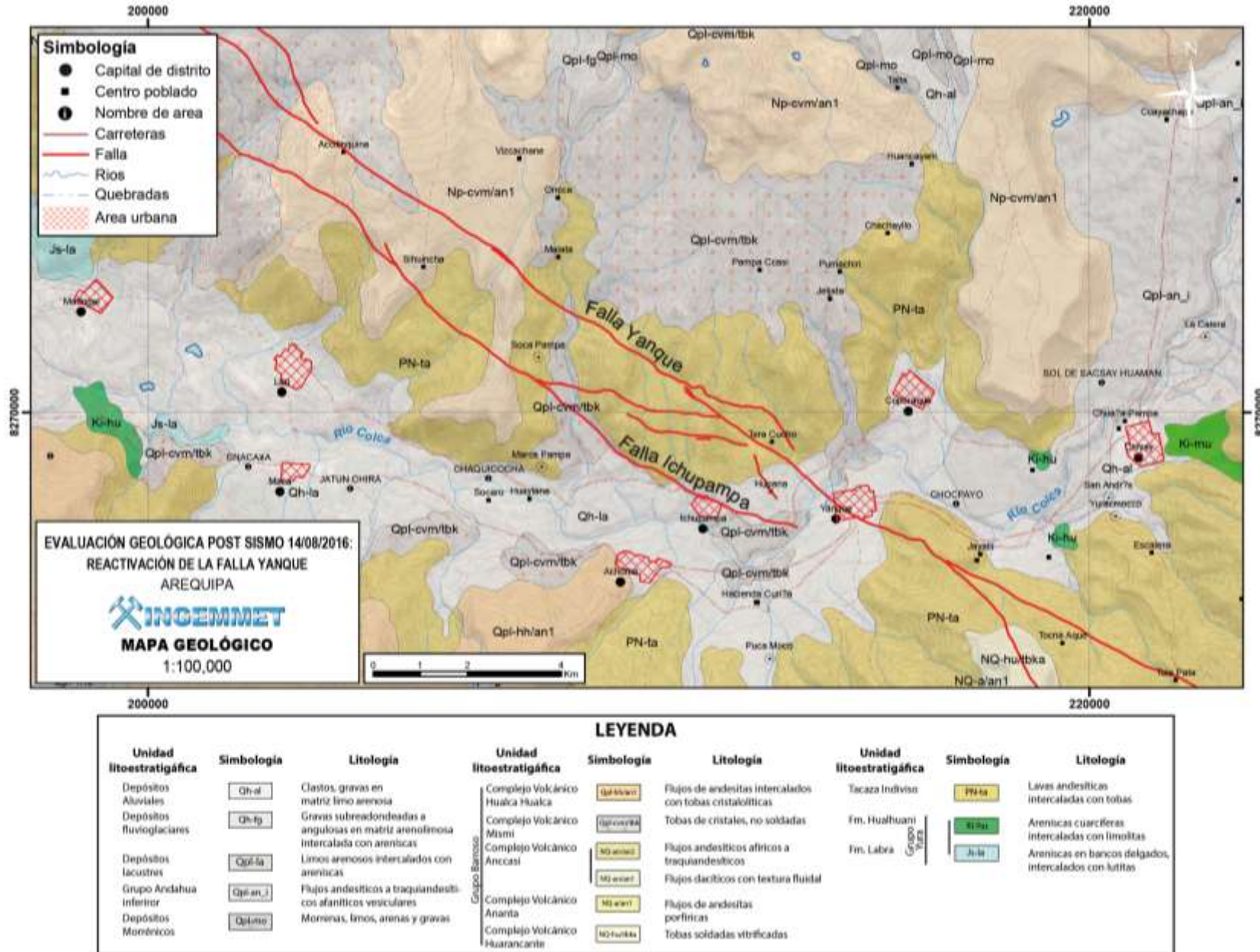


Figura 03: Mapa geológico del Valle del Colca. Modificado de Palacios et al, 1993.

4.0 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA – ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE FALLAS DEL VALLE DEL COLCA

El Valle Colca se ubica dentro de la Zona Volcánica de los Andes Centrales, esta zona se encuentra constituida por estratovolcanes con un cráter central, domos y conos monogenéticos de escorias de lavas asociados a flujos <10 000 B.P (Delacour et al., 2007; De Silva & Francis, 1991). Los depósitos volcánicos cuaternarios muestran evidencias de haber sido erosionados y retrabajados por la actividad glacial, es así, que observamos morrenas y depósitos fluvio-glaciares cubriendo dichos depósitos.

En la actualidad la actividad sísmica en el área es elevada, es así que Benavente et al. (2010, 2012) describen un control estructural NO-SE en el arco volcánico Cuaternario a lo largo de aproximadamente 300 km, corredor estructural conformado por fallas normales principalmente con buzamientos opuestos y que cortan depósitos volcánicos cuaternarios, depósitos fluvio-glaciares y aluviales. Asimismo, Sébrier et al. (1985) estudian las fallas de Trigal y Solarpampa, ubicadas en las alturas del Cañon del Colca, entre las localidades de Huambo y Cabanaconde, fallas con orientaciones E-O, constituidas por segmentos que se extienden a lo largo de 30 km cortando depósitos volcánicos cuaternarios y fluvio-glaciares. David (2007) y Antayhua (2002) analizaron la actividad sísmica de esta área, identificando su distribución tanto en superficie como en profundidad y hallando mecanismos focales con soluciones de tipo normal, siendo compatible con lo observado en el terreno. Benavente et al. 2016 (en revisión) presentan una actualización del mapa neotectónico del Valle del Colca, poniendo en evidencia con registros geológicos, 14 nuevas fallas activas (Figura 04). Una de ellas viene a ser la falla Yanque.

FALLA YANQUE

Tiene una longitud aproximada de 37 kilómetros, que al contar con varios segmentos se comporta como un sistema de fallas (Figura 05). Parte de este segmento se reactivó, generando el sismo superficial del 14 de agosto de 2016. Su dirección promedio es de N120° y al atravesar el Valle del Colca, se puede observar su continuidad en ambos márgenes del valle. Benavente et al, (2016) indican que en la margen derecha a 4800 msnm en la Pampa Arenal, se presenta un escarpe de la Falla Yanque con 2 metros de altitud que afecta depósitos volcánicos y aluviales, así mismo se observa las formaciones de sangpond, producto de la ruptura superficial de la falla. Hacia la margen izquierda se observan facetas triangulares asociadas a la falla, que presentan escarpes de hasta 50 m. Se identificaron también depósitos lacustres, aluviales, coluviales y fluvio-glaciares que se encuentran deformados por la actividad de la falla, lo que indicaría una historia de reactivaciones durante el Cuaternario y que se repite en la actualidad.

Es importante mencionar que desde el año 2015, INGEMMET viene trabajando en el departamento de Arequipa, realizando trabajos de identificación y estudios de fallas geológicas activas. Con este trabajo ponemos en evidencia un total de 83 fallas geológicas activas en toda la región, siendo la zona con mayor presencia de fallas el Valle del Colca. Los estudios de las fallas geológicas nos permitió generar mapas de peligrosidad a movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismos, considerando las magnitudes máximas posibles e iso-aceleraciones que estas estructuras geológicas pueden generar (Wells & Coppersmith, 1994).

Se tomó los estudios detallados de Benavente et al, (2013, 2016 en revisión) sobre fallas geológicas, como base metodológica (ver adjunto anexo 1) para generar los mapas de peligrosidad de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por el sismo. Estos mapas se calcularon a partir de las interacciones entre los mapas de susceptibilidad (e.g. mapas de movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos) y mapas de iso-aceleraciones sísmicas en base a la magnitud que generó la reactivación de la falla Yanque el 14 de agosto del presente año (5.3 ML). La Figura 06 muestra el modelo numérico que determina el grado de peligrosidad alta, media y baja para este evento sísmico.

Es necesario precisar que las observaciones geológicas, nos permite indicar que esta falla es capaz de generar sismos $> 6.5 M_w$, debido a que se identificaron evidencias de ruptura superficial primaria; en tal sentido el sismo del 14 de agosto no es la máxima magnitud posible que la falla Yanque puede generar.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
 Reactivación de la falla Yanque

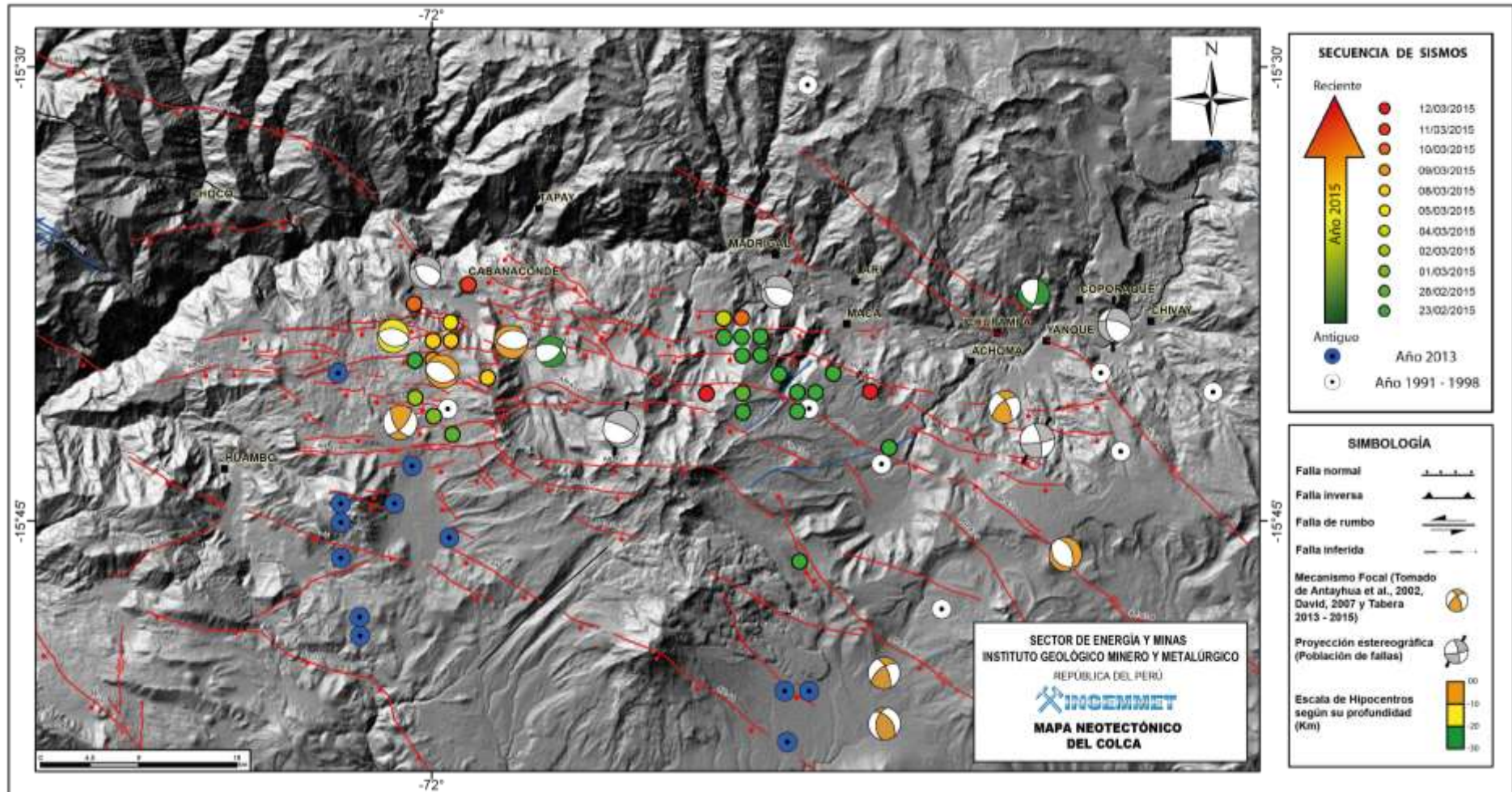


Figura 04: Mapa neotectónico del valle del Colca, las líneas rojas indican las fallas activas de las zonas, estudiadas e identificadas en campo. La recopilación de eventos sísmicos registrados desde el año 1991 hasta la fecha (IGP), demuestra la alta actividad sísmica de la zona.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
 Reactivación de la falla Yanque

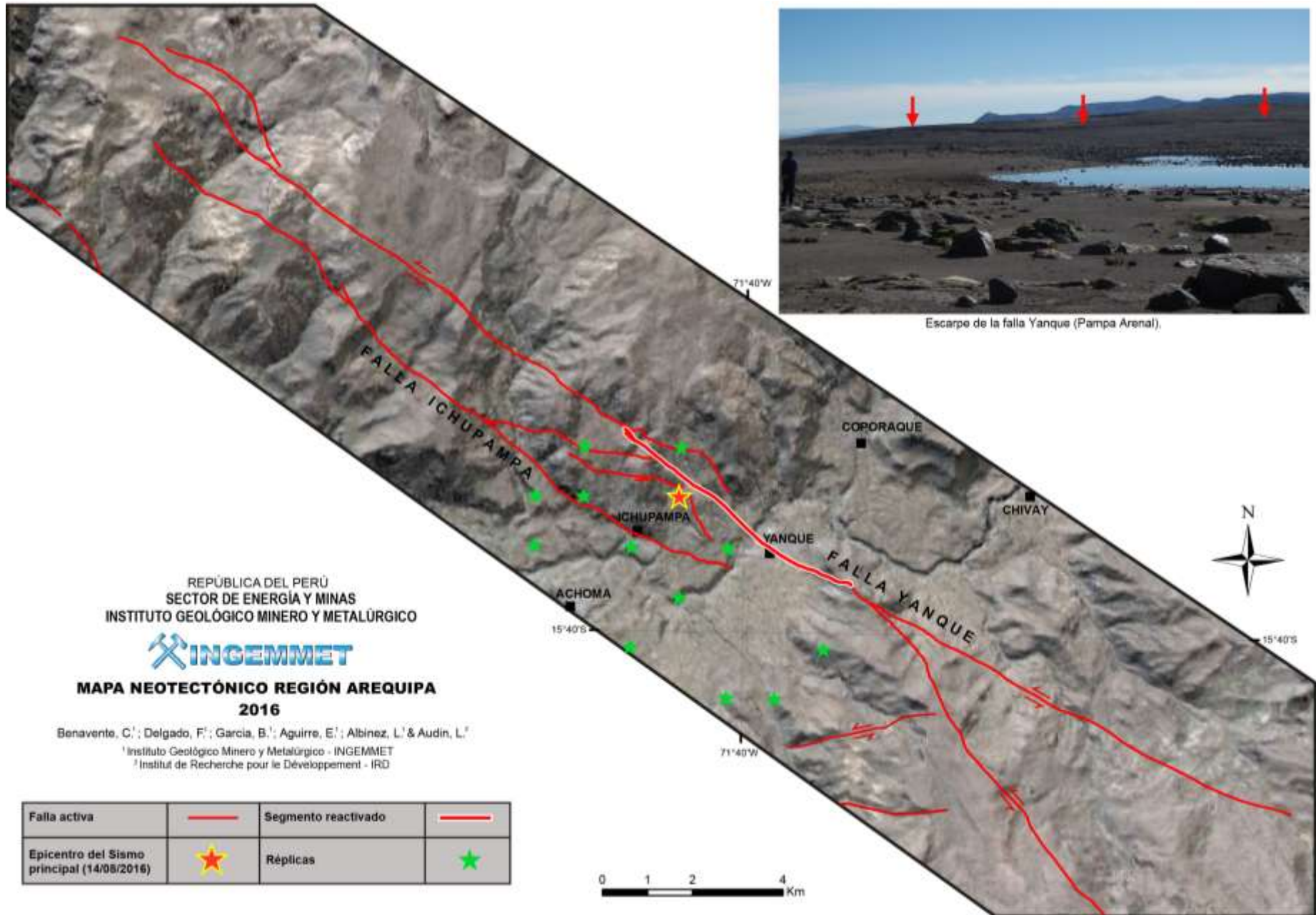


Figura 05. Falla Yanque y falla Ichupampa. La línea gruesa de color rojo con bordes blanco, es el segmento reactivado que generó el sismo del 14 de agosto.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

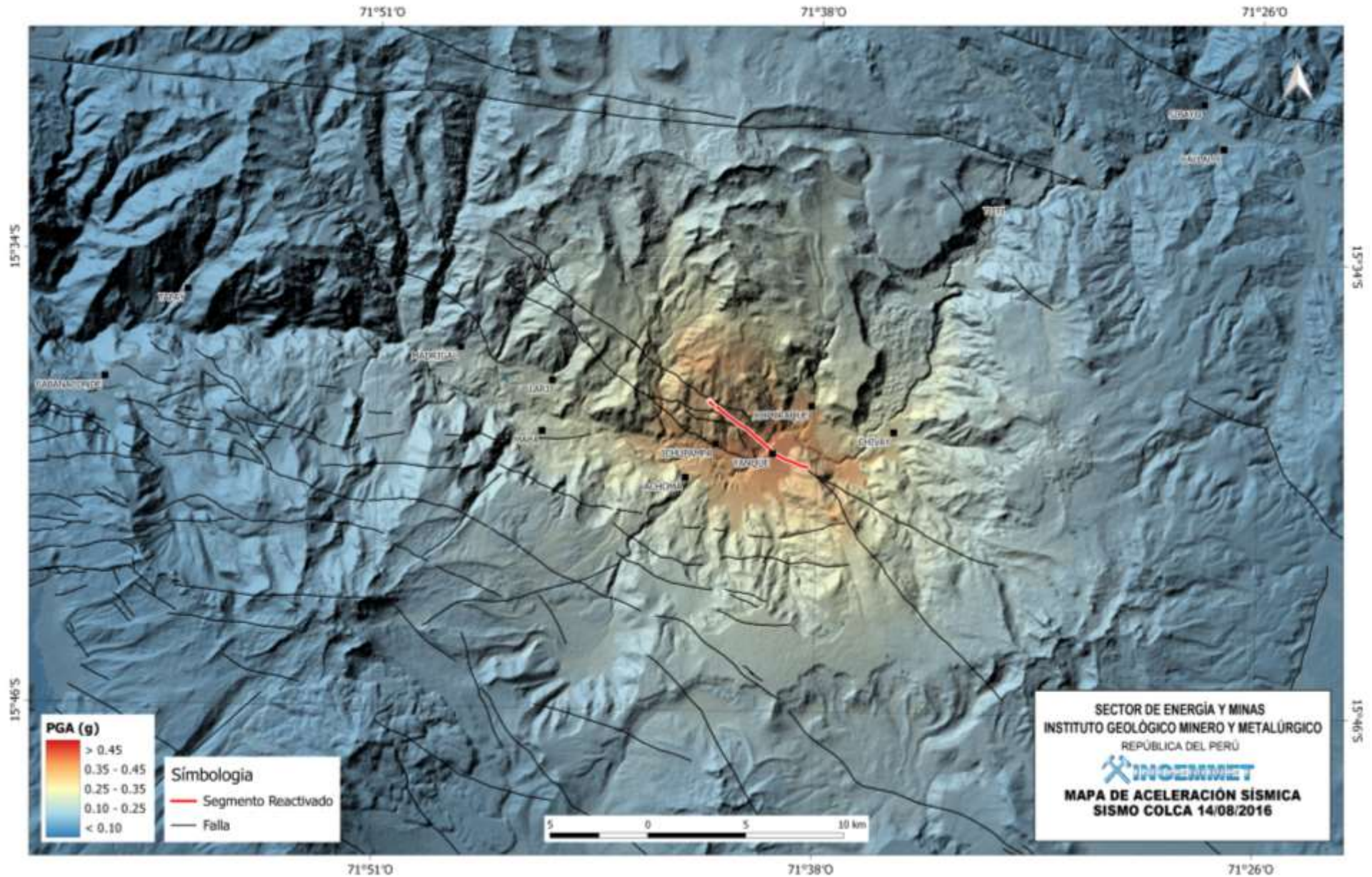


Figura 06: Mapa de aceleración sísmica. En línea roja se observa el segmento reactivado de la Falla Yanque que origino el sismo del 14 de agosto de 2016.

5.0 EFECTOS COSÍSMICOS

Los terremotos pueden producir, además del movimiento vibratorio característico, una serie de efectos inducidos (efectos cosísmicos), que dan lugar a grandes deformaciones y roturas del terreno, como son los fenómenos de movimientos en masa y los fenómenos de licuefacción de suelos. Estos efectos son los que muestran las deformaciones simultáneas a la ocurrencia del terremoto, y pueden estar asociadas, tanto a efectos geológicos, producidos por procesos y estructuras geológicas (ruptura superficial de una falla), como a los daños producidos directamente en la fábrica de las construcciones (poblados afectados). (ver figura 07).

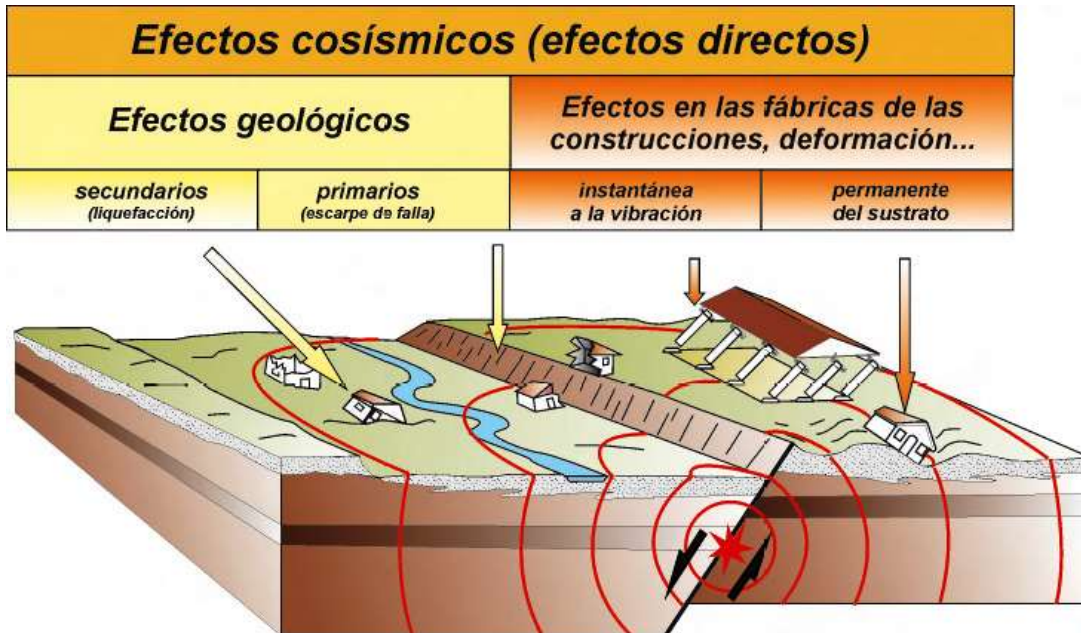


Figura 07: Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos). (Tomado de Rodríguez-Pascua et al., 2011)

5.1 Efectos Geológicos

Vienen a ser todos los procesos de movimientos en masa (deslizamiento, derrumbes, caída de roca, etc) y las grietas en el terreno que se generaron con el movimiento sísmico. La metodología de análisis aplicables a estos efectos, son las técnicas clásicas de geología, ya que se tienen análisis pre y post sismo.

Zavala et al., (2016) realizaron a lo largo del valle del Colca, en los últimos años, un inventario de movimientos en masa agrupándolos por flujos, deslizamientos, caídas, movimientos complejos, reptaciones y vuelcos como parte del inventario de peligros geológicos de la cuenca del río Colca, donde indica que los sectores con gran distribución de movimientos en masa están entre Sibayo-Tuti-Canocota-Chivay-Coporaque-Ichupampa-Lari-Achoma-Maca-Madrigal; las más importantes en dimensión son las avalanchas de rocas en Tuti antiguo, cerro Llanquiypiña, quebrada El Molino, río Sepina, quebrada Japo (Maca) y la falda sur del volcán Hualca Hualca; entre los abanicos de flujos de detritos destacan los de Challacone, Ccayachape, Coporaque, Tucullune, Sepina, Marcapampa entre otros. Entre los deslizamientos y movimientos complejos sobresalen el de Maca, Madrigal-Lari, Antahuilque, Sihuincha y en la quebrada Sahuayllo (mina Madrigal).

El sismo del 14 de agosto, generó procesos de movimientos en masa, muchos de ellos fueron reactivaciones de antiguos deslizamientos y avalanchas (Figura 08 y Anexo 2), los eventos que se cartografiaron fueron deslizamientos, derrumbes y caída de rocas que principalmente afectaron las vías de comunicación.

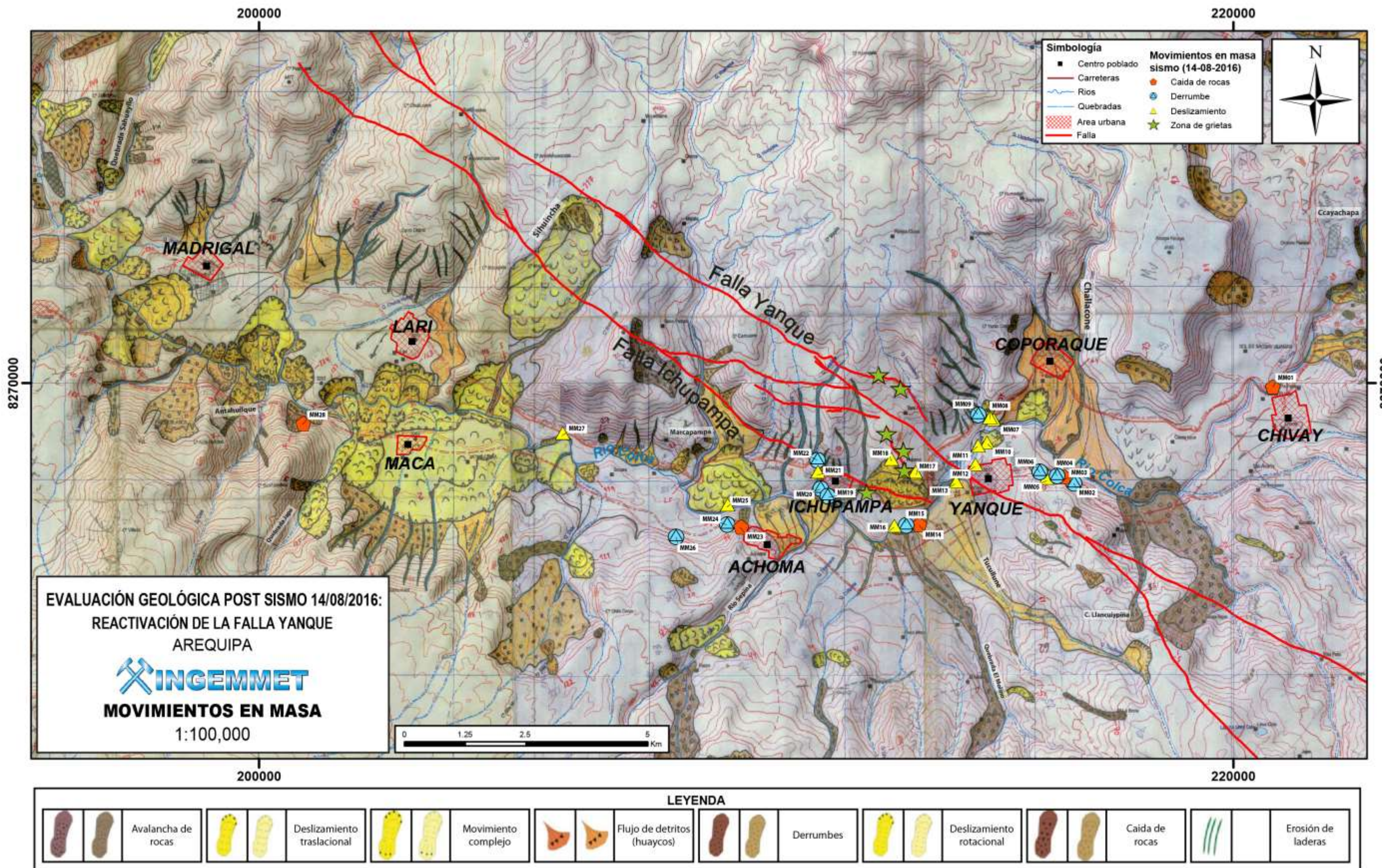


Figura 08: Mapa de inventario de movimientos en masa producidos por el sismo del 14/08/2016. (Mapa Base tomado de Zavala et al.2008)

Los fenómenos que se pudieron observar en campo fueron los siguientes:

DESLIZAMIENTOS: En la zona evaluada la mayoría de los deslizamientos observados son superficiales (Figura 08), estos se observan principalmente en los cortes de carretera (ej. En la carretera Coporaque-Ichupampa-Lari y en Yanque en la margen izquierda del río Colca, entre otros). Ver Fotos 1 y 2.



Foto 1: Deslizamiento en la carretera Coporaque – Ichupampa, margen derecha del río Colca.



Foto 2: Deslizamiento en la carretera Ichupampa – Lari, margen derecha del río Colca.

CAÍDA DE ROCAS – DERRUMBES: En la zona evaluada se observan caídas de roca y derrumbes en el Valle (Figura 08) y otros que afectan las carreteras que unen los centros poblados (ej. En la carretera Chivay-Yanque y Achoma-Maca). Fotos 3 y 4.



Foto 3: Caída de rocas en Chivay, margen izquierda del río Colca.



Foto 4: Caída de rocas (Derrumbe) en el tramo de la carretera Achoma-Maca. Margen izquierda del río Colca.

FRACTURAS Y GRIETAS: En la zona evaluada, estas afectan vías de comunicación carretera y terrenos de cultivo (Figura 08). Así tenemos agrietamientos en terrenos en zonas muy cercanas a los segmentos reactivados (fotos 5, 6, figura 09). En el sector de Hupana al noreste de Ichupampa la dirección preferente de las grietas son N120° y llegan a tener aberturas de hasta 10cm.



Foto 5: Grietas en el terreno generadas por el sismo del 14 de agosto, llegando a presentar abertura de hasta 10cm.



Foto 6: Se observa bloques movidos, en algunos casos volteados, por la vibración del terreno frente a las ondas sísmicas.

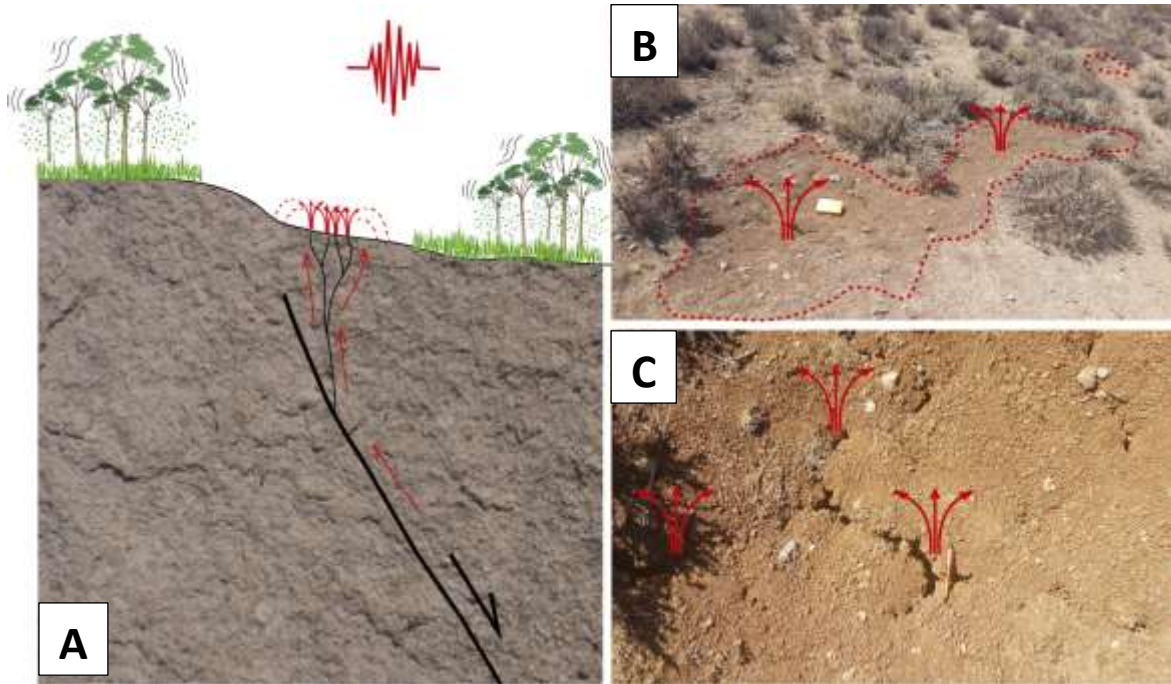
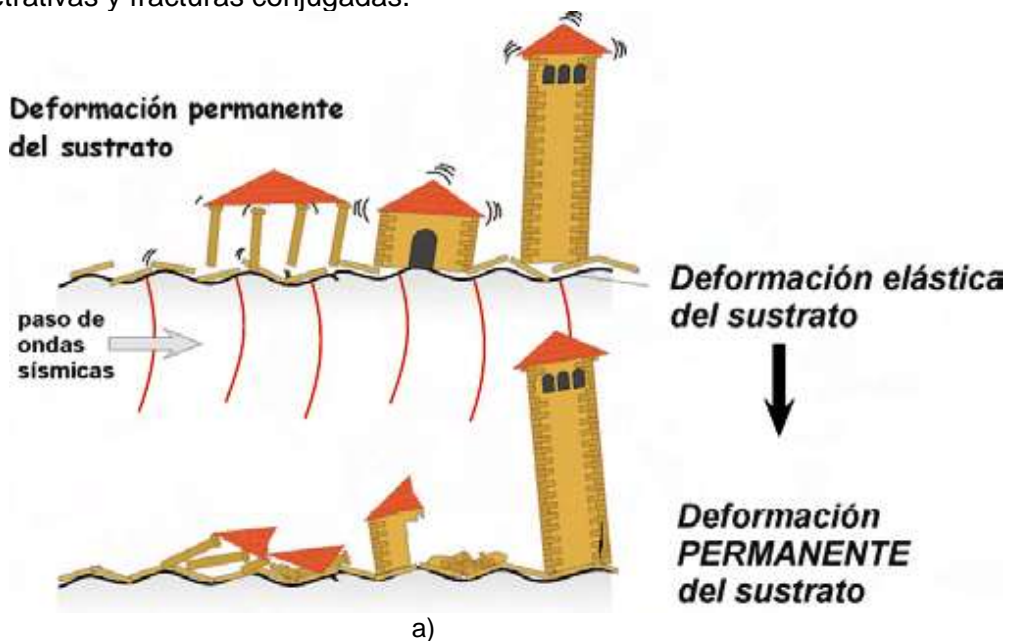


Figura 09: Grietas y licuefacción de suelos. Se observaron material expulsado del subsuelo a través de zonas de debilidad (grietas). Este material o depósitos son de color diferente al observado en superficie y con grado de cohesión bajo. A) muestra una interpretación sobre la relación de las grietas y la licuefacción; estos suelos expuestos en superficie están relacionados con la sacudida del terreno y sólo se observan a lo largo de la traza de la falla Yanque. B) esta figura muestra la disposición lineal de estos depósitos expulsados (ver la libreta de campo como escala). C) detalle de las grietas, en este caso con aberturas de 5 cm, y del material expulsado a través de ella.

5.2. Efectos en las construcciones (Localidades afectadas)

Estos efectos están representados por los daños generados en las poblaciones (edificaciones e infraestructuras) por efecto del paso de las ondas sísmicas (Figura 10). Se producen como respuesta frágil a las deformaciones elásticas del sustrato; este tipo de fracturación corresponde a los efectos del terremoto enmarcados dentro de las deformaciones instantáneas a la vibración (figura 11 y 12): fracturas penetrativas y fracturas conjugadas.



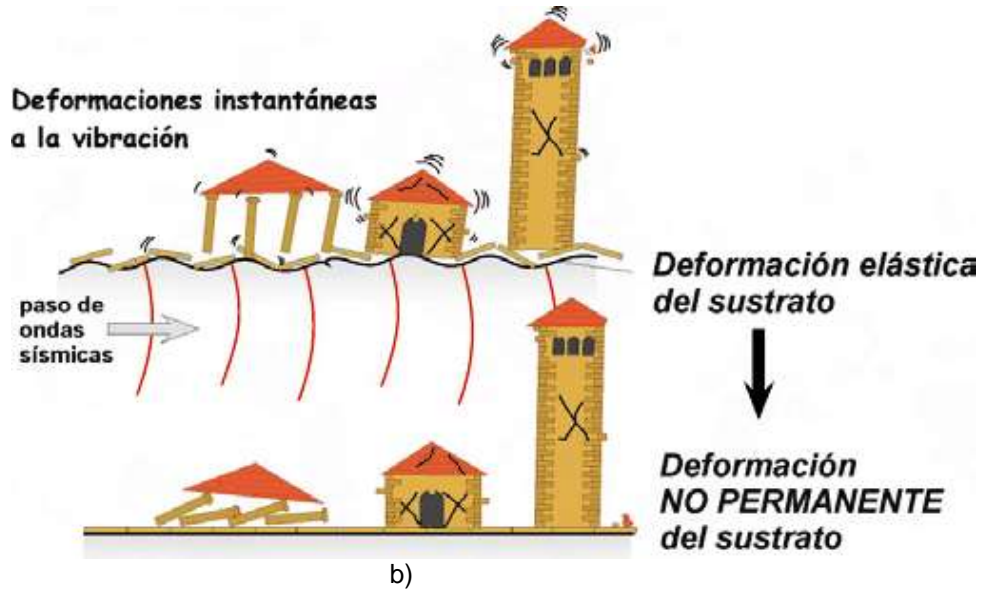


Figura 10: Momento de deformación de infraestructura y sustrato. a) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este puede quedar deformado permanentemente, pueden observarse en el terreno vasculamientos, plegamientos, fracturas y grietas. b) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este no sufre ninguna deformación permanentemente, solo se puede observar en el edificaciones debido a la dirección de agrietamientos y/o deformaciones las dirección de las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

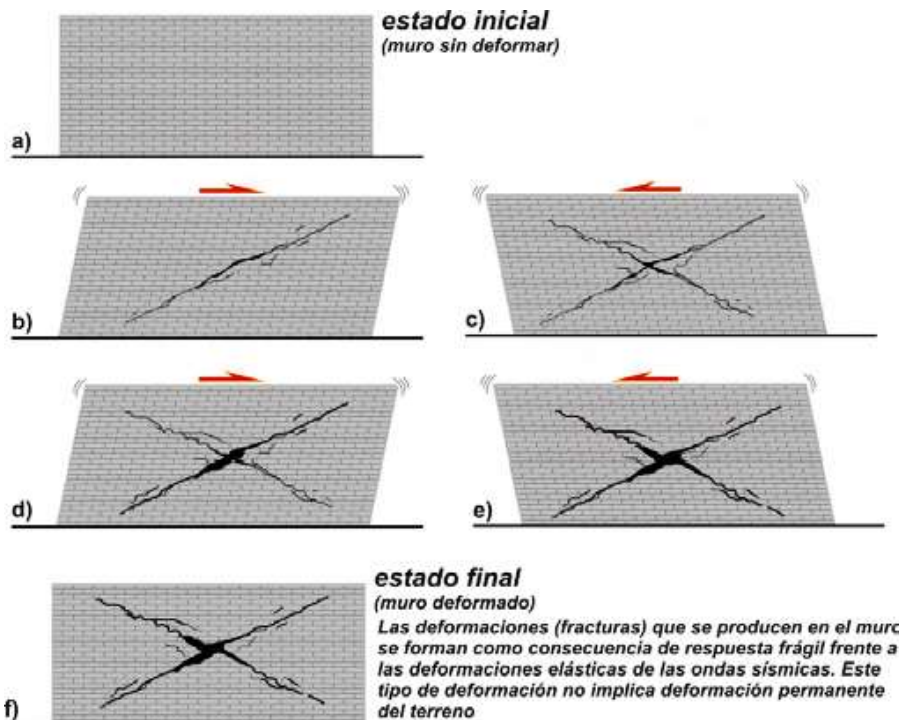


Figura 11: Fracturación de un muro por movimientos sísmicos de carácter cíclico y paralelos al mismo. Suelen aparecer con mucha frecuencia en muros de ladrillo. Se producen fisuras en cada uno de los ciclos, provocando fracturas conjugadas (en forma de cruz o aspa) que suelen aparecer con un ángulo de 45°. Este tipo de deformaciones son producidas por las ondas sísmicas y no implican la deformación permanente del terreno; son el resultado del comportamiento frágil del muro frente a las deformaciones elásticas inducidas por las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

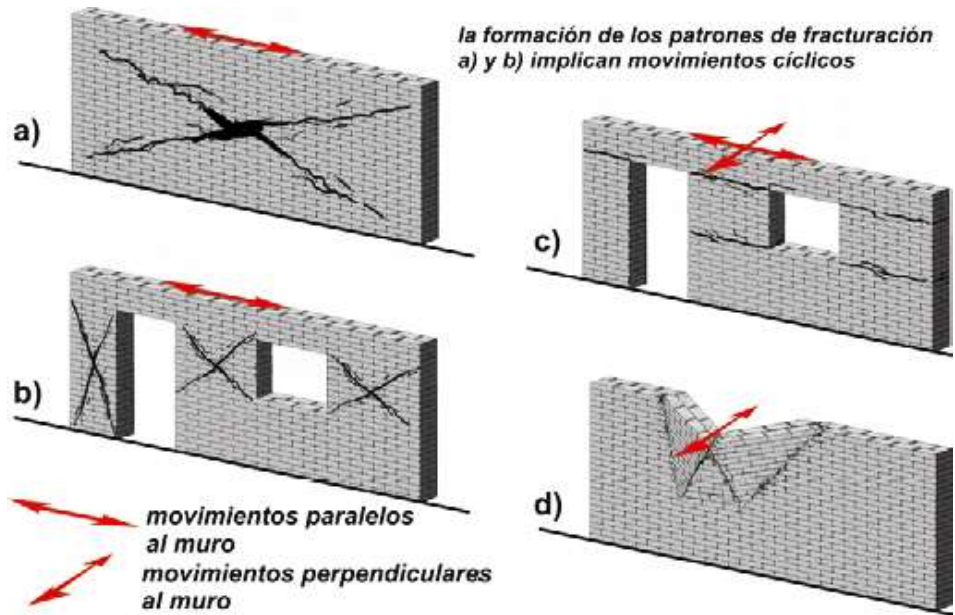


Figura 12: Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares al muro. En el caso del patrón de fisuración (c) puede estar producido tanto por movimientos perpendiculares como paralelos al muro. No obstante, en terremotos instrumentales este último tipo de fracturación suele indicar un movimiento perpendicular a la estructura muraria. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)

LOCALIDADES AFECTADAS

Debido al sismo generado por la reactivación de la Falla Yanque muchas de las poblaciones que se ubican dentro del Valle del Colca fueron afectadas, llegando a generar la destrucción de infraestructura y la muerte de 4 personas.

De la totalidad de viviendas empadronadas a lo largo del Valle de Colca, 2939 viviendas sufrieron daños y fueron catalogadas en tres tipos de viviendas (Indeci, 2016) [figura 13]:

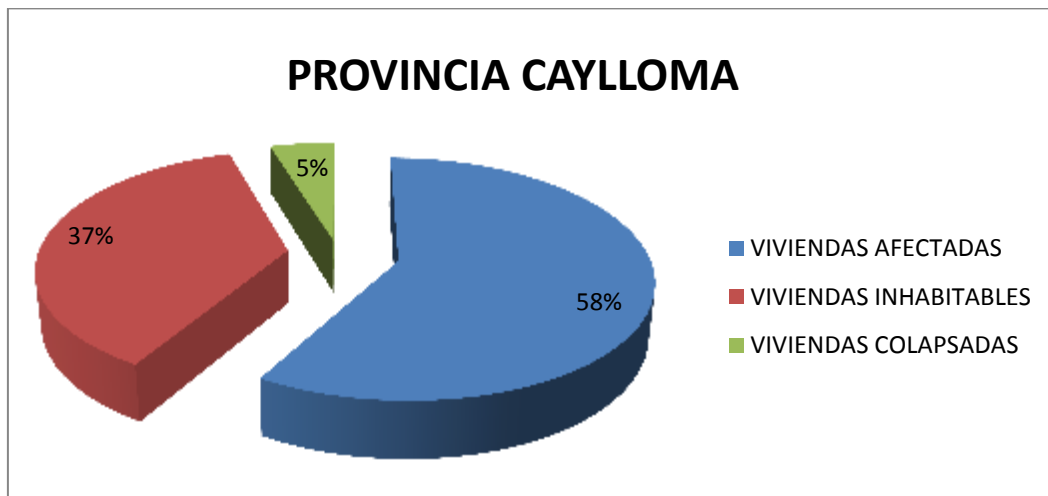


Figura 13. Distribución de las viviendas que sufrieron daños a lo largo del Valle del Colca.

- **Viviendas afectadas:** Son las viviendas con presencia de fisuras superficiales y poco importantes en paredes, las cuales no ponen en riesgo la integridad física de las personas, por tanto pueden ser reparadas y seguir siendo habitadas. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 1719 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016),
- **Viviendas inhabitables:** Son las viviendas con presencia de grietas y/o daños de consideración en paredes y techos, por tanto no pueden ser habitadas por presentar riesgo de colapso. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 1079 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016).
- **Viviendas colapsadas:** Son las viviendas cuyos techos y paredes han colapsado debido al movimiento sísmico y evidentemente no pueden ser habitadas. De este tipo de viviendas afectadas por el sismo del 14 de agosto se identificaron 141 en todo el valle del Colca (Indeci, 2016), de los cuales los distritos de Ichupampa, Yanque y Achoma, presentaron mayores viviendas colapsadas (figura 14 y 15).

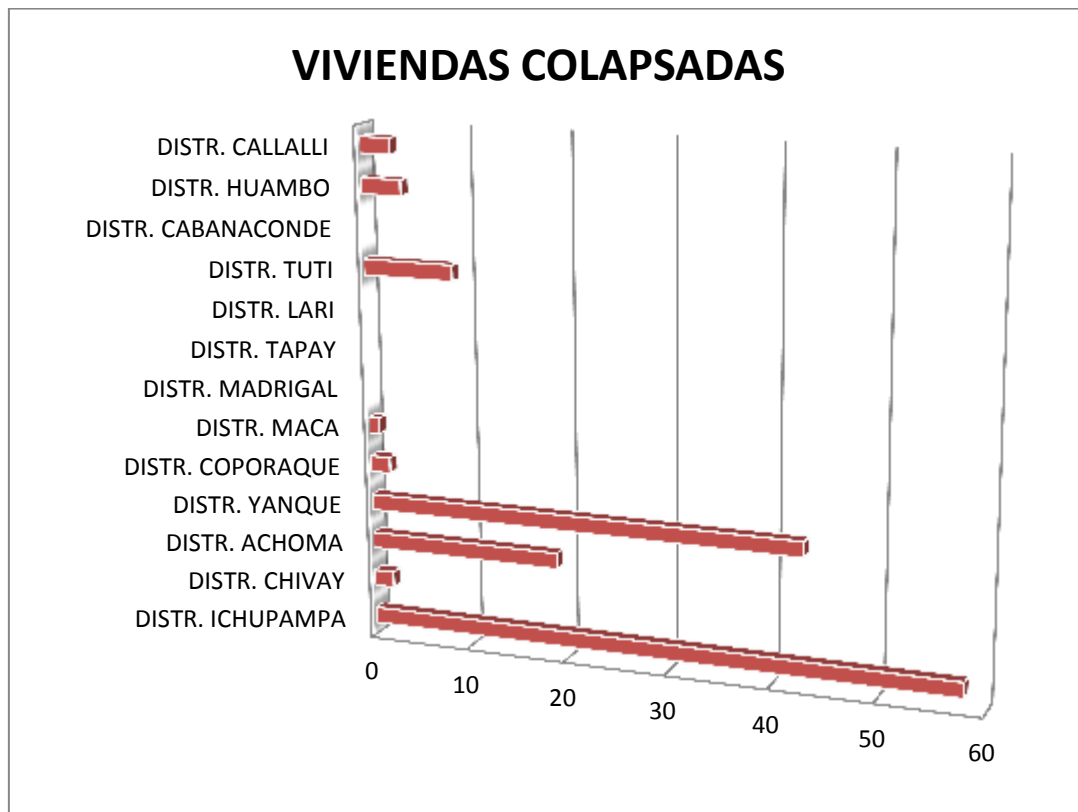


Figura 14. Distribución de viviendas colapsadas por distritos a lo largo del Valle del Colca, donde se observa que Ichupampa, Yanque y Achoma presentaron mayores daños.

COMPARACIÓN DEL MODELO DE ACELERACIÓN SÍSMICA CON MAPAS DE INFRAESTRUCTURA COLPSADA

Como mencionamos anteriormente, los trabajos detallados en fallas geológicas activas que se vienen realizando en el INGEMMET nos permite generar escenarios con relación a la atenuación de la aceleración teniendo en cuenta la fuente sismogénica (Falla geológica). Esto a partir de datos como la magnitud (máxima posible o registrada), cinemática, geometría de la falla y propiedades litológicas de la zona de influencia. En tal sentido, estos mapas nos permiten proponer escenarios de peligrosidad sísmica a partir de datos directos obtenidos en campo.

En la Figura 15 se observa en colores de tonalidades rojas (ver escala de colores), las aceleraciones máximas y la atenuación hacia los extremos. La zona en donde se concentra la mayor aceleración se ubica adyacente a la falla Yanque.

El inventario post sismo realizando por el Indeci muestra que las localidades más afectadas (> número de viviendas colapsadas) se ubican en zonas de coloración roja (aceleración alta), guardando coherencia el modelo numérico con lo observado durante la evaluación de campo. En conclusión, las localidades de Yanque e Ichupampa, las más próximas a la falla, muestran mayores daños en comparación con las localidades de Maca y Pinchollo, donde los daños fueron mínimos.

Cabe resaltar, que este tipo de modelos, teniendo en cuenta las magnitudes máximas posibles (>6.5), se realizaron para más fallas del valle del Colca y de la región Arequipa (Benavente et al., 2016), por lo tanto es necesario utilizar la información en la planificación del territorio.

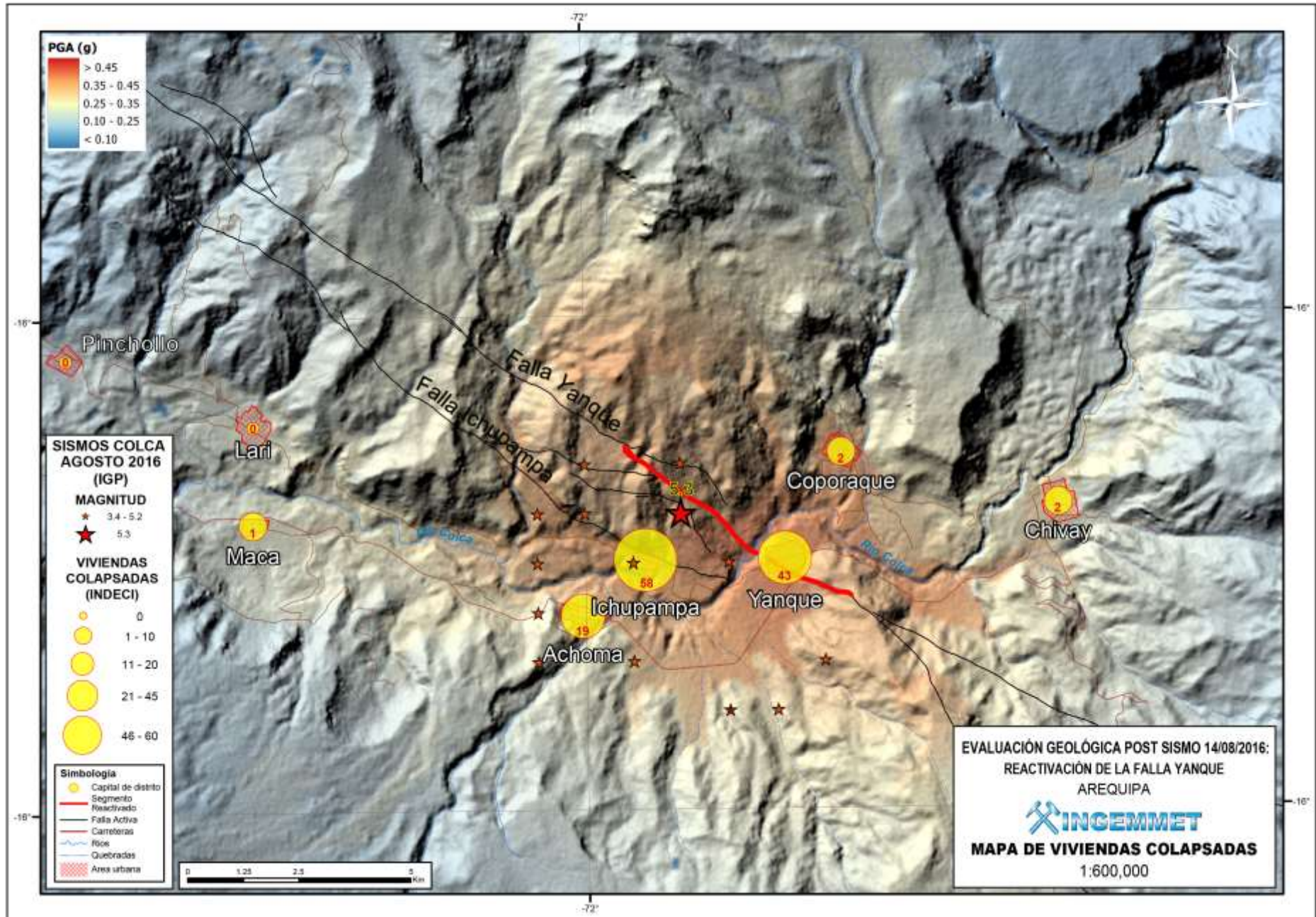


Figura 15: Mapa de distribución de viviendas colapsadas en el Valle del Colca, producto del sismo del 14/08/2016.

DESCRIPCIÓN DE DAÑOS POR LOCALIDADES

Las localidades que registraron más daños fueron Ichupampa, Yanque y Achoma (ver Anexo 3).

- LOCALIDAD DE ICHUPAMPA

La localidad de Ichupampa es uno de los poblados más afectados por el sismo del 14 de agosto, el segmento reactivado de la falla y el epicentro se encuentran cerca al poblado (Figura 15). La localidad de Ichupampa se emplazó sobre depósitos lacustres (Formación Colca) y coluviales, en la figura 08 se tiene la ubicación de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la localidad de Ichupampa.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno, determinados por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción (Fotos 07 y 08).

Haciendo un resumen de los saldos en daño (INDECI, 2016) se tiene:

- **Vida y salud:**

Personas Damnificadas	: 462
Personas afectadas	: 156
Personas fallecidas	: ----
Personas heridas	: 6

- **Viviendas y locales públicos:**

Viviendas colapsadas	: 58
Viviendas inhabitables	: 127
Viviendas afectadas	: 52
Iglesia Destruida	: 1
Il.EE. afectadas	: 2

- **Transporte**

Carreteras destruidas (Km)	: ---
Carreteras afectadas (Km)	: 1

- **Agricultura - Infraestructura**

Canal de regadío colapsado (Km)	: 2.35
Canal de regadío afectado (Km)	: 4.65
Reservorio afectado	: 5

- **Servicios básicos**

Agua afectados (%)	: 100%
--------------------	--------

Se realizó una serie de sobrevuelos utilizando el Drone *eBee sensefly* sobre el poblado de Ichupampa, con motivo de registrar los daños en las viviendas provocado por el sismo (figura 16), la resolución de la ortofoto por pixel es de 7 cm, resolución que permitió evaluar los daños.



Foto 07: Daños en la iglesia destruida, los campanarios de la iglesia colapsados por efectos del movimiento sísmico.



Foto 08: Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.

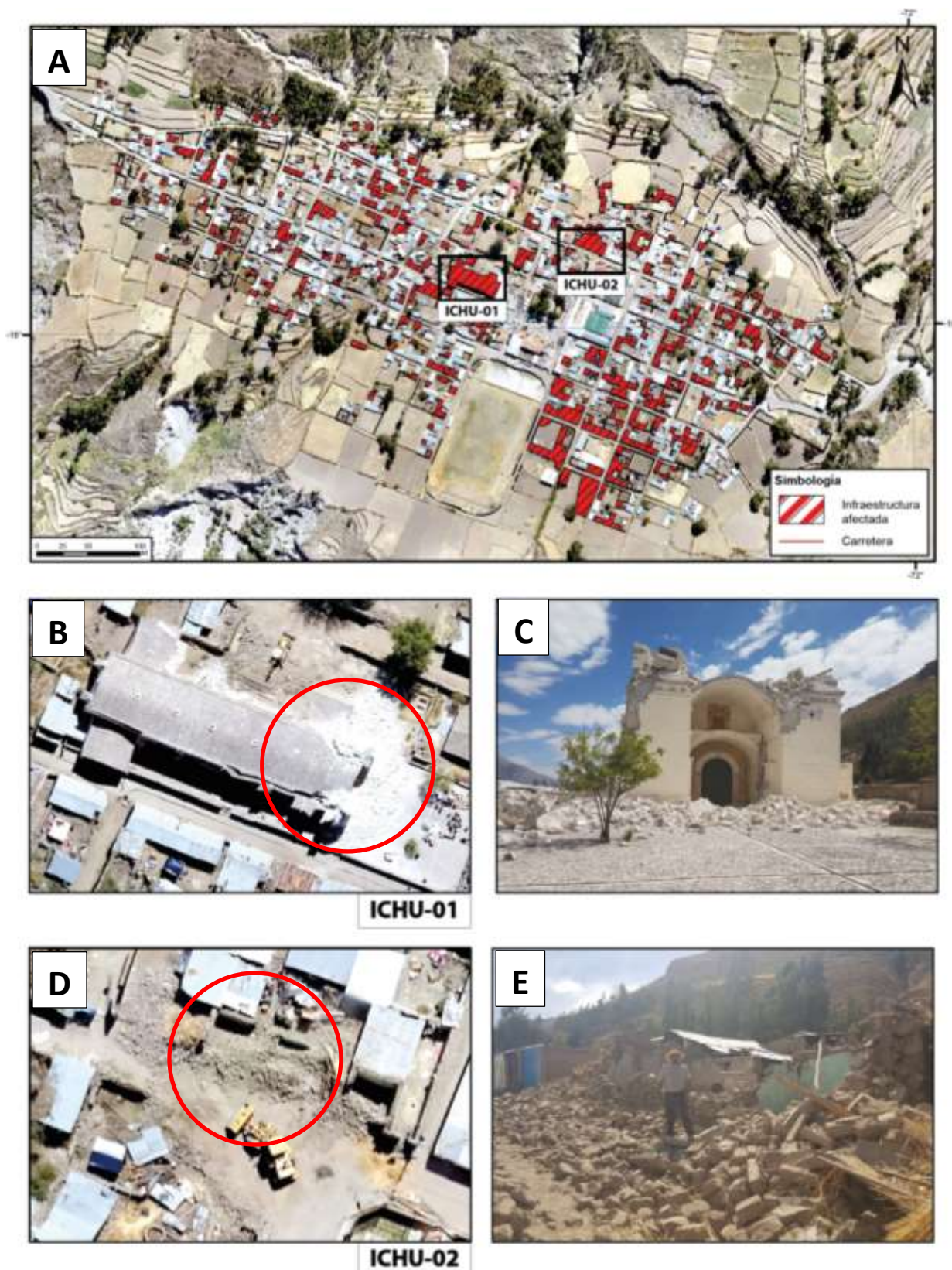


Figura 16: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de la iglesia de Ichupampa; C) Fotografía de campo de la iglesia de Ichupampa; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al norte la plaza principal de Ichupampa, donde se observa los muros colapsados; E) Fotografía de campo de las viviendas mostradas en la figura D.

ACCIONES A TOMAR:

- Para la reconstrucción de las viviendas afectadas en Ichupampa se debe de movilizar a las familias afectadas a zonas de **reubicación temporal** mientras se reconstruyen sus viviendas. En la figura 17 planteamos dos alternativas de reubicación. La determinación del lugar definitivo **dependerá del saneamiento de los mismos** y los estudios de suelos, con fines de cimentación, a realizar.
- Las zonas recomendadas que reúnen las condiciones geológicas adecuadas para la reubicación temporal (Figura 17) son:
 - 1) El estadio de Ichupampa.
 - 2) A 800 m al sureste de su actual localización.
- Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Ichupampa, incluyendo el templo.
- Al realizar el diseño de las nuevas viviendas en Ichupampa, se debe de considerar el drenaje para las aguas pluviales y también para las filtraciones que se podrían dar.
- Debido a la alta sismicidad por fallas activas en el Valle del Colca se recomienda viviendas de, máximo dos pisos con techo aligerado a dos aguas y material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos; se tienen ejemplos en Ichupampa de viviendas que no sufrieron daños (Fotos 09 y 10). Es importante que la reconstrucción contemple viviendas que no alteren la urbanidad del área, ya corresponden a una zona turística.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

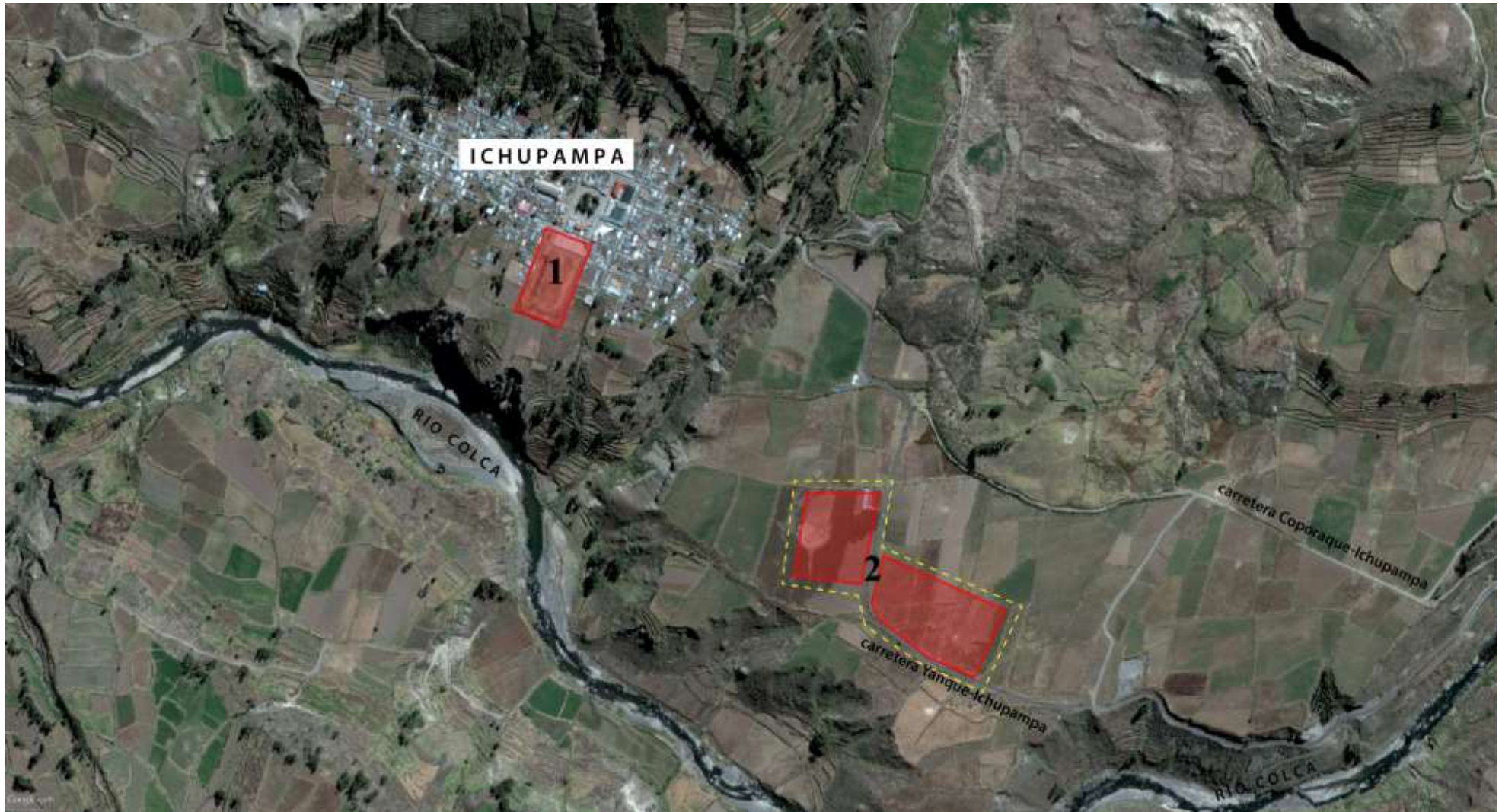


Figura 17: Posibles zonas de reubicación temporal para Ichupampa.



Foto 09: Construcción de un piso de material noble que no sufrió daños por efecto del sismo.



Foto 10: Vivienda de dos pisos de material noble, las paredes y ventanas no sufrieron daños en comparación a la vivienda de adobe que se encuentra continua a esta.

- LOCALIDAD DE YANQUE

La localidad de Yanque es el segundo poblado más afectado por el sismo del 14 de agosto, debido a que el segmento reactivado de la falla cruza por la ciudad y el epicentro se encuentran cerca (Figura 15). La localidad de Yanque está emplazada sobre depósitos lacustres (Formación Colca), este tipo de depósitos inconsolidados hacen que las ondas sísmicas se amplifiquen ocasionando mayor vibración del terreno y por ende el colapso de viviendas y la generación de movimientos en masa.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque y el posterior sismo fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes, caídas de rocas y agrietamientos en el terreno, determinados por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción (Fotos 11 y 12). También ocasiono la muerte de tres personas.

Haciendo un resumen de los saldos en daño (INDECI, 2016) se tiene:

- **Vida y salud:**

Personas Damnificadas	: 737
Personas afectadas	: 589
Personas fallecidas	: 3
Personas heridas	: 16

- **Viviendas y locales públicos:**

Viviendas colapsadas	: 43
Viviendas inhabitables	: 178
Viviendas afectadas	: 166
Iglesia Afectada	: 1
Il.EE. afectadas	: 2

- **Agricultura - Infraestructura**

Canal de regadío colapsado (Km)	: 3.95
Canal de regadío afectado (Km)	: 1.5
Reservorio afectado	: 4

Se realizó una serie de sobrevuelos utilizando el Drone *eBee sensefly* sobre el poblado de Yanque, con motivo de registrar los daños en las viviendas provocado por el sismo (figura 18), la resolución de la ortofoto por pixel es de 7 cm, resolución que permitió evaluar los daños.



Foto 11: Vivienda afectada, los muros están agrietados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de material, es considerada una vivienda inhabitable.



Foto 12: Canal destruido por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.

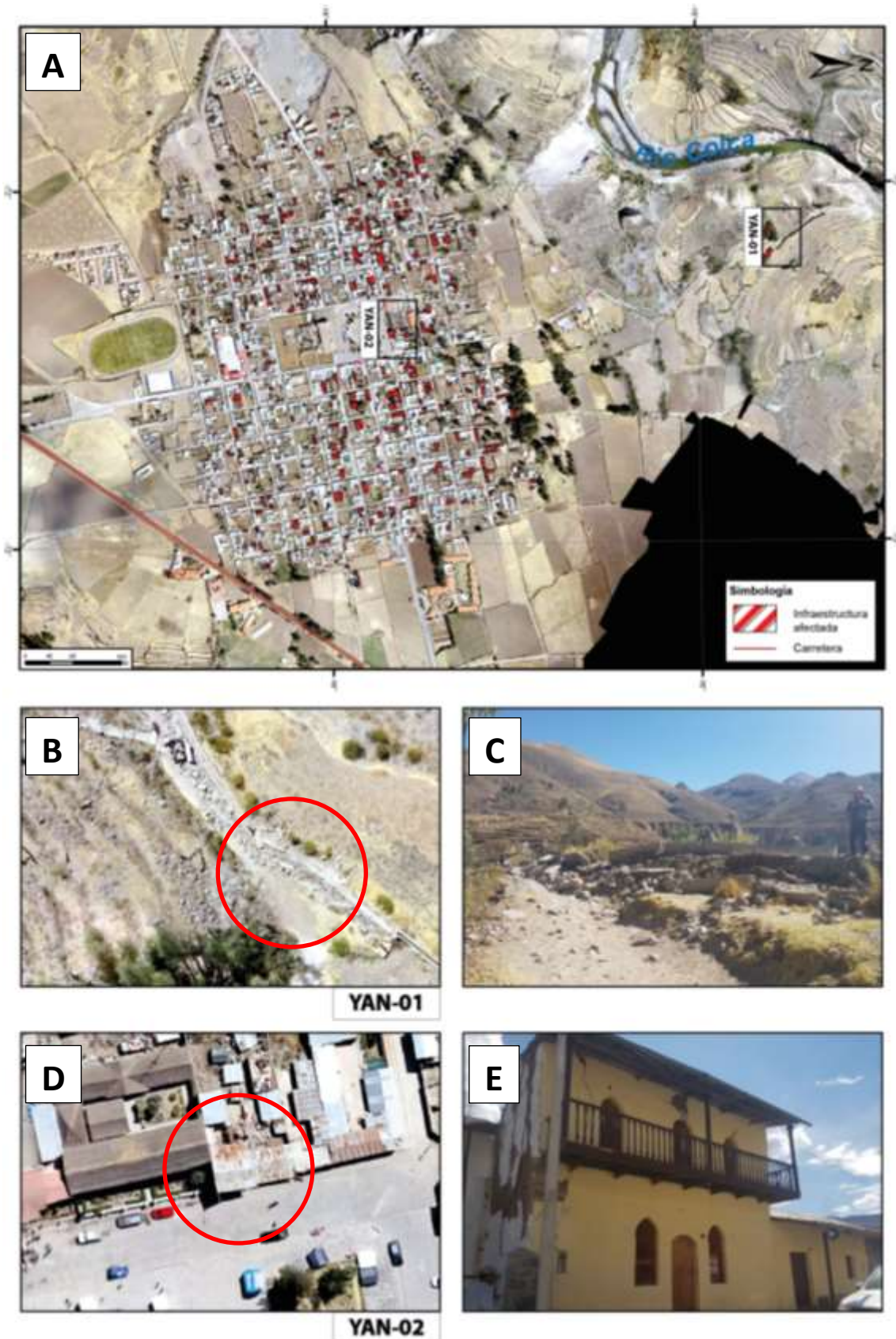


Figura 18: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle del canal de Yanque; C) Fotografía de campo del canal de Yanque; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas en la plaza principal de Yanque, donde se observa los muros agrietados; E) Fotografía de campo de una de las viviendas mostrada en la figura D.

ACCIONES A TOMAR:

- Para la reconstrucción de las viviendas afectadas en Yanque se cuenta con dos alternativas de **reubicación temporal** que se muestran en la figura 19. La determinación del lugar definitivo **dependerá del saneamiento de los mismos** y los estudios de suelos, con fines de cimentación, a realizar.

- Las zonas recomendadas que reúnen las condiciones geológicas adecuadas para la reubicación temporal (Figura 19) son:
 - 1) Terreno de cultivo al noreste de Yanque.
 - 2) Terreno de cultivo al suroeste de Yanque.

- Mientras se reconstruye Yanque, se recomienda trasladar la población afectada a la zona de reubicación temporal (Figura 19). Zona estable a movimientos en masa.

- Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Yanque, incluyendo el templo.

- Al realizar la reconstrucción se debe de considerar el drenaje para las aguas pluviales y también para las filtraciones y oconales localizados en el área.

- Debido a la alta sismicidad por fallas activas en el Valle del Colca se recomienda viviendas de máximo dos pisos con techo aligerado a dos aguas y material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos; si se harán construcciones mayores tomar en cuenta el coeficiente de sismicidad. se tienen ejemplos en Ichupampa de viviendas que no sufrieron daños (Fotos 08 y 09). Es importante que la reconstrucción contemple viviendas que no alteren la urbanidad del área, ya corresponden a una zona turística.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque



Figura 19: Posibles zonas de reubicación temporal para Yanque.

- LOCALIDAD DE ACHOMA

La localidad de Achoma es el tercer poblado más afectado por el sismo del 14 de agosto, el segmento reactivado de la falla se encuentra cerca (Figura 15). La localidad de Achoma está emplazada sobre depósitos coluviales y depósitos aluviales, en la figura 08 se tiene la ubicación de movimientos en masa que se encuentran alrededor de la localidad de Achoma.

Los daños ocasionados por la reactivación de la Falla Yanque y el posterior sismo fueron: viviendas colapsadas, deslizamiento, derrumbes y caída de rocas en la carretera (Fotos 13 y 14), estos procesos se generaron por la relación amplificación de onda, tipo de suelo y tipo de construcción. También ocasiono la muerte de una persona.

Haciendo un resumen de los saldos en daño (INDECI, 2016) se tiene:

- **Vida y salud:**
 - Personas Damnificadas : 488
 - Personas afectadas : 356
 - Personas fallecidas : 1
 - Personas heridas : 26

- **Viviendas y locales públicos:**
 - Viviendas colapsadas : 19
 - Viviendas inhabitables : 149
 - Viviendas afectadas : 118
 - Iglesia Afectada : 1
 - Il.EE. afectadas : 1

- **Transporte**
 - Carreteras destruidas (Km) : ---
 - Carreteras afectadas (Km) : 0.02

- **Agricultura - Infraestructura**
 - Canal de regadío colapsado (Km) : 1.9
 - Canal de regadío afectado (Km) : 6.5
 - Reservorio afectado : 7

- **Servicios básicos**
 - Agua afectados (%) : 100%

Se realizó una serie de sobrevuelos utilizando el Drone *eBee sensefly* sobre el poblado de Achoma, con motivo de registrar los daños en las viviendas provocado por el sismo (figura 20), la resolución de la ortofoto por pixel es de 7 cm, resolución que permitió evaluar los daños.



Foto 13: Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.



Foto 14: Muros colapsados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción, nótese la vivienda de material noble que no sufrió mayor daño.

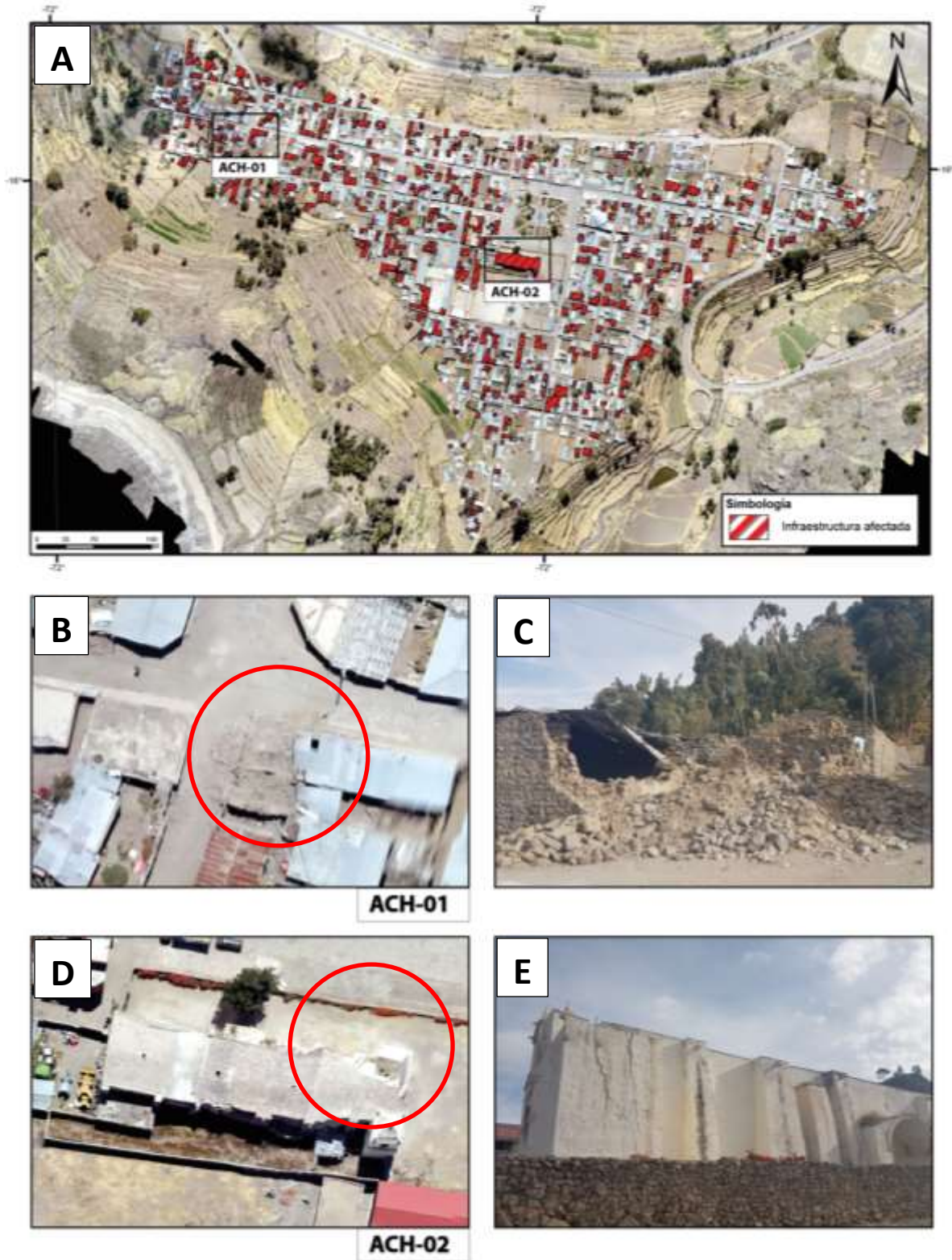


Figura 20: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Achoma por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al Ingreso de Achoma, donde se observa los muros colapsados; C) Fotografía de campo de la vivienda mostrada en la figura C; D) Detalle de la iglesia de Achoma; E) Fotografía de campo de la iglesia de Achoma con facturas en los muros.

ACCIONES A TOMAR:

- Para la reconstrucción de las viviendas de Achoma, se debe de movilizar a las familias afectadas a zonas de **reubicación temporal**, para el cual se cuenta con dos alternativas que se muestran en la figura 21. La determinación del lugar definitivo **dependerá del saneamiento de los mismos** y los estudios de suelos, con fines de cimentación, a realizar.
- Las zonas recomendadas que reúnen las condiciones geológicas adecuadas para la reubicación temporal son (Figura 21):
 - 1) Terreno de cultivo al este de Achoma en la carretera a Yanque.
 - 2) Terreno de cultivo al norte de Achoma.
- Mientras se reconstruye Achoma, se recomienda trasladar la población afectada a la zona de reubicación temporal (Figura 21). Zona estable a movimientos en masa.
- Luego de la reubicación se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Achoma, incluyendo el templo.
- Al realizar el diseño de Achoma se debe de considerar el drenaje para las aguas pluviales y también para las filtraciones y oconales localizados en el área.
- Debido a la alta sismicidad por fallas activas en el Valle del Colca se recomienda viviendas de máximo dos pisos con techo aligerado a dos aguas y material noble. Si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos; se tienen ejemplos en Ichupampa de viviendas que no sufrieron daños (Fotos 08 y 09). Es importante que la reconstrucción, se contemple viviendas que no alteren la urbanidad del área, ya corresponden a una zona turística.



Figura 21: Posibles zonas de reubicación temporal para Achoma.

5.3 FACTORES GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS

El último sismo deja una lección: sismos de “poca magnitud” originados por activación de fallas activas, provocan considerable destrucción en áreas con viviendas mal construidas y/o diseñadas. Los sismos de los últimos dos años como son Nepal, Italia y Tanzania, así como el de Misca en Cusco nos avisan que tenemos que darle importancia a la ocurrencia de sismos provocados por fallas activas.

En la evaluación post-sismo, se vio que los daños principalmente se deben a: a) la antigüedad y pésima calidad de construcción de las edificaciones que se ven a lo largo del valle del Colca (elaboradas en adobe o piedra), mismas que no cuentan con un diseño sismoresistente; b) Sumado a lo anterior, se evidencia que el valle del Colca presenta una litología que consta de depósitos de escombros, lacustres, aluviales y coluviales, donde destacan los depósitos lacustres por llegar a tener hasta 300m de espesor en promedio, lo que define una zona de características geotécnicas incompetentes frente a un evento sísmico, que debido a su estado poco o nada consolidado permite la amplificación de las ondas sísmicas retrasando su paso por el mismo, provocando un mayor tiempo de vibración del suelo que yace en superficie.

Así mismo, en el Valle del Colca se presenta un número importante de fallas geológicas activas, tanto en la margen derecha como en la izquierda, que le dan la condición de ser una zona de intensa actividad sísmica, misma que se evidencia en el registro geológico-estratigráfico (figura 22), además se han encontrado escarpes de más de 30m como es el caso de las fallas Trigal y Solarpampa (Sebrier et al., 1985), que nos permiten afirmar que en el valle del Colca pueden ocurrir eventos con una magnitud máxima de hasta 7 Mw.



Figura 22: Columna estratigráfica de los depósitos lacustres cuaternarios del valle del Colca. A la derecha se observan fotografías generales y de detalle de las secuencias (I, II y III) y fotografías con las estructuras deformadas “simitas” A, B, C, D y E las cuales vienen a ser evidencias de sismos pasados) (tomado de Benavente et al., 2010)

CONCLUSIONES

1. El sismo del 14 de agosto fue producto de la reactivación de la Falla Yanque (zona de fallas del Colca) que por sus características morfológicas, geométricas y cinemáticas se determinó que es una estructura geológica **activa (falla)**, donde el sismo mencionado confirmó su actividad.
2. En observaciones de campo y cartografiado post-sismo no se evidencia ruptura superficial primaria, pero si se observan grietas cosísmicas alineadas y localizadas a lo largo y alrededor del segmento reactivado.
3. En el estudio “Evaluación del Relieve, Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Arequipa”, realizado por INGEMMET (Benavente et al., 2016, en revisión), mediante la metodología expuesta en el mismo, se logró generar mapas de amenaza sísmica para movimientos en masa y procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos (Anexo I). Verificando, el sismo, lo expresado en el informe.
4. Los efectos cosísmicos (desprendimientos de rocas, derrumbes, deslizamientos, grietas en el terreno y otros) en el área de influencia, del sismo del 14 de agosto, han afectado las vías de comunicación (carreteras y caminos vecinales), terrenos de cultivo y viviendas. Cabe mencionar que los derrumbes, deslizamientos y caídas de rocas se han producido principalmente en los taludes carreteros.
5. Las localidades de Ichupampa, Yanque y Achoma son los poblados más afectados, debido a que el segmento reactivado y el epicentro del sismo se encuentra muy cerca a estas poblaciones.
6. El valle del Colca se considera como Zona Crítica por peligros geológicos detonados por eventos sísmicos (reactivación de fallas geológicas) y climáticos.
7. Los suelos en todo el valle yacen sobre depósitos no consolidados, que por sus características geotécnicas amplifican las ondas sísmicas dando lugar a una mayor vibración en superficie que al generar el reacomodo de partículas ocasiona hundimientos, asentamientos, colapso de viviendas y en zonas donde la napa freática es superficial puede producirse licuefacción de suelos..
8. Los daños en viviendas se deben principalmente a que no han sido diseñadas y construidas profesionalmente (antigüedad de las mismas); dando como resultado viviendas vulnerables frente a sismos. No se contempla, tampoco, el tipo de suelo donde se asienta la vivienda. Esto es corroborado por viviendas e infraestructura, construidas con material noble, siguiendo las normas de construcción pertinentes, al no sufrir daños significativos.

Nota:

Se denomina **falla geológica activa** a la estructura tectónica (falla geológica) que puede generar terremotos o deformaciones en la superficie. El concepto de falla geológica activa se define en función de la edad de su último desplazamiento y en estos casos corresponden a movimiento en los últimos 10 000 años.

RECOMENDACIONES

1. Para Ichupampa, Yanque y Achoma se recomiendan dos alternativas para la **reubicación temporal**. La determinación del lugar definitivo **dependerá del saneamiento de los mismos**. Las zonas determinadas reúnen mejores condiciones geológicas y de seguridad física requeridas.
2. Luego de la reubicación temporal, se recomienda la demolición total de las casas dañadas en Ichupampa, Yanque y Achoma, incluyendo para Ichupampa el templo.
3. Se recomienda viviendas de hasta dos pisos con techo aligerado a dos aguas de diseño sismoresistente que contemple las características intrínsecas de la litología de la zona. Dichas viviendas pueden ser de material noble o adobe, sin embargo si se trabaja con adobe, diseñar los refuerzos y/o amarres correspondientes y columnas en cantidad y ubicación suficientes para su resistencia a los sismos. Se tienen ejemplos en Ichupampa, Yanque y Achoma de infraestructura urbana con estas características que no han sufrido daños o fueron poco afectados. Para los diseños de viviendas se recomienda utilizar el manual para la reducción del riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú (Kuroiwa, 2016)
4. Es importante que, en la reconstrucción, se contemple viviendas que no alteren la urbanidad del área, ya que corresponden a una zona turística.
5. Es recomendable, que para la ubicación de obras de infraestructura importante, se debe considerar la localización de las fallas geológicas (en el caso de Arequipa ver el estudio “Evaluación del relieve, Neotectónica y Peligro Sísmico en la región Arequipa” Benavente et al., 2016 en revisión)
6. Para la construcción de obras de infraestructura de mediana a gran envergadura y urbana, dentro del área de influencia de las fallas activas, se recomienda realizar el análisis sísmico determinístico, que relaciona los eventos sísmicos a fallas activas o potencialmente activas para representar su atenuación en el lugar. De esta manera tendremos el diseño sísmico apropiado.
7. Se recomienda un programa de monitoreo de las principales fallas activas y de trabajos de paleosismología en la región Arequipa especialmente en el Valle del Colca. Trabajos que deberán ser coordinados con INGEMMET, siendo el Gobierno Regional un aliado importante.

Lima, 12 de setiembre de 2016.

REFERENCIAS

Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I. & Aguilar, V. (2002) - Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998) región del volcán Sabancaya (Arequipa). Sociedad Geológica del Perú, Boletín, n. 93, pp. 63-71.

Benavente, C et al. (2016, en revisión) Evolución del relieve, Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región Arequipa, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

Benavente, C.; Delgado, F. & Audin, L. (2012) - Estratigrafía de las cuencas lacustres Colca y Omate: ejemplos de paleosismicidad y tectónica activa del arco volcánico cuaternario y actual de los Andes centrales del sur del Perú. En: Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2012, 6 p.

Benavente, C.; Delgado, F.; Taibe, E.; Audin, L & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 55, 245p.

Benavente, C.; Fidel, L. & Delgado, G.F. (2010) - Evolución estratigráfica y tectónica de la cuenca pleistocena Colca, Cordillera Occidental-sur del Perú. Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, PE, 27 setiembre - 1 octubre 2010, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2010, p. 758-761. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial.

David, C. (2007). Deformación actual de ante-arco t del arco del Oroclino de los Andes Centrales. Tesis optar grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Pp. 292.

Delacour, A., Gerbe, M.-C., Thouret, J.-C., Wörner, G. & Paquereau-Lebti, P. (2007) - Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in Southern Peru, Central Andes. Bull. Volcanol. 69, 581–606.

Giner-Robles, J.L.; Silva Barroso, P.G.; Pérez-López, R.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Bajardí Azcárate, T.; Garduño-Monroy, V.H. y Lario Gómez, J. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE; 96 p

Indeci, 2016. Movimiento Sísmico Afecta a la provincia de Caylloma – Arequipa. Informe de Emergencia N° 624 - 25/08/2016 / COEN - INDECI / 07:00 HORAS (Informe N° 28)

Kuroiwa, J. (2016). Manual para la reducción del riesgo sísmico de viviendas en el Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Dirección General de Programas y Proyectos en Vivienda y Urbanismo. 110 p.

Palacios, O; De la Cruz, 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) - Condorama 31-t - [Boletín A 42]

Rodríguez-Pascua, M. A.; Pérez-López, R.; Giner-Robles, J. L.; Silva, P.G.; Garduño-Monroy, V.H. & Reicherter, K. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. Quaternary International. In press. QUATINT-D-10-00171R2.

Sébrier, M.; Mercier, J.L.; Mégard, F.; Laubacher, G. & Carey-Gailhardis, E. (1985) - Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in central Andes of Southern Peru: Tectonics, 4(7): 739-780.

Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994) - Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surfacedisplacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

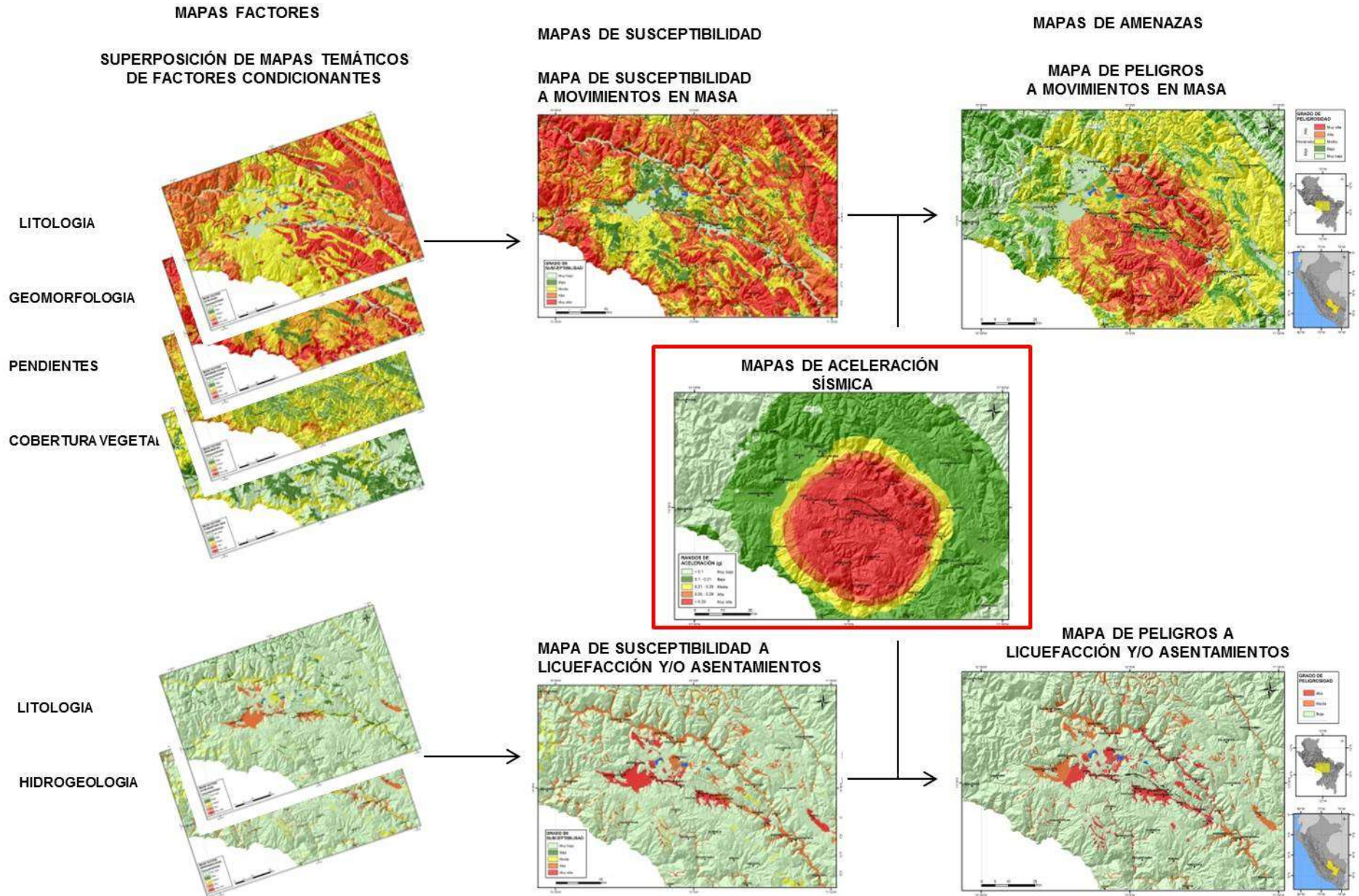
Zavala, B.; Vilchez, M.; & Rosado, M (2008). Zonas críticas por peligros geológicos en la cuenca del río Camaná -Majes-Colca, Primer reporte. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET, 40 p.

Zavala, B.; Vilchez, M.; Rosado, M.; Pari, W. & Peña, F. (2014). Estudio Geoambiental en la Cuenca del Río Colca, INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 57, 222 p., 11 mapas.

ANEXO 1

MAPAS DE PELIGROSIDAD EN EL VALLE DEL COLCA

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
 Reactivación de la falla Yanque



Metodología de la elaboración de los mapas de Amenazas a movimientos en masa y a licuefacción de suelos y/o asentamientos (Benavente et.al, 2013, 2015).

FALLA TRIGAL

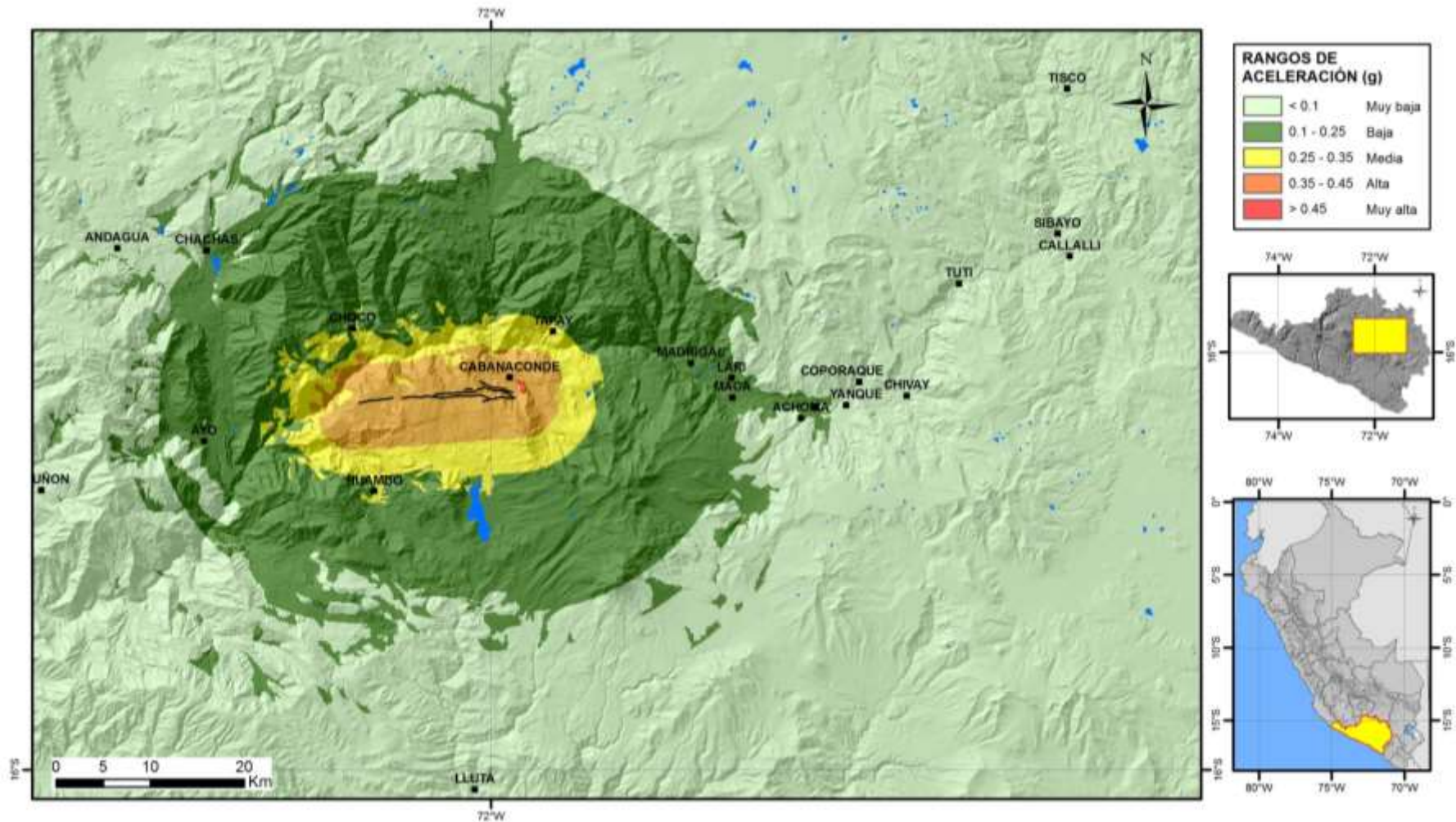


Figura 1. Aceleración sísmica para 6.55Mw que es la máxima magnitud estimada para falla Trigo.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

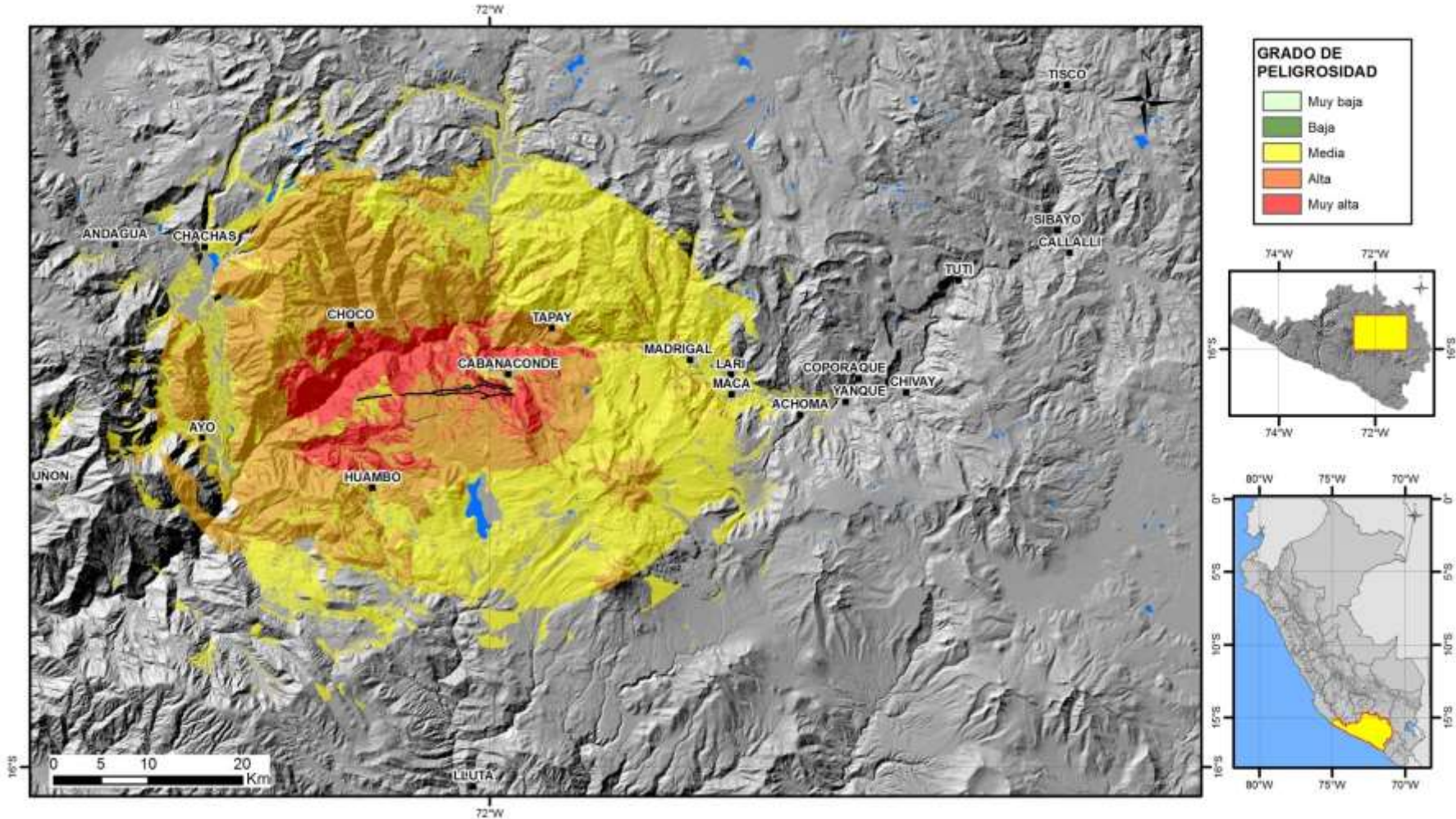


Figura 1.a. Peligrosidad por movimientos en masa detonados por sismo (6.55Mw), falla Trigal.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

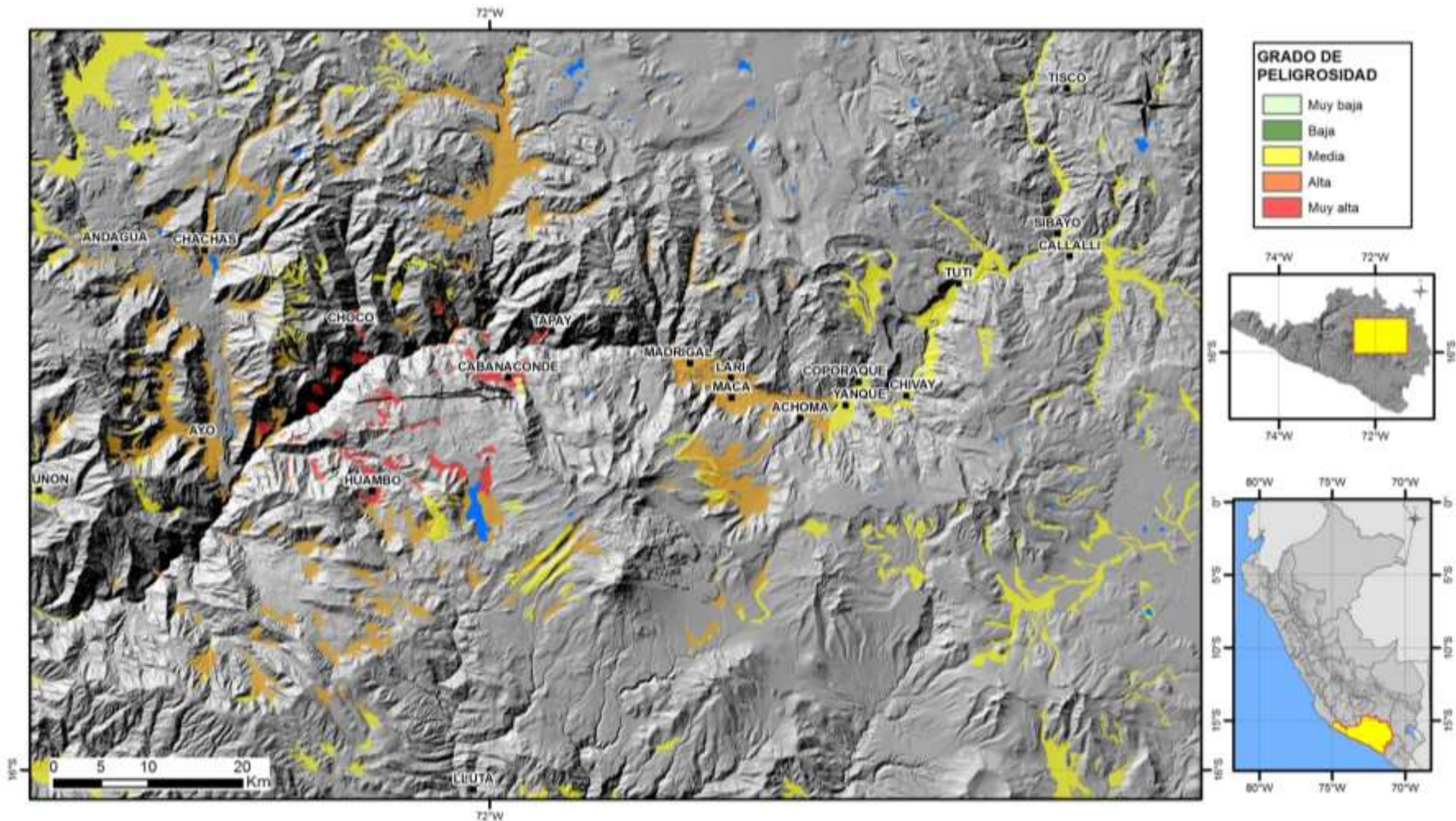


Figura 1.b. Peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismo (6.55Mw), falla Trigo.

FALLA SOLARPAMPA

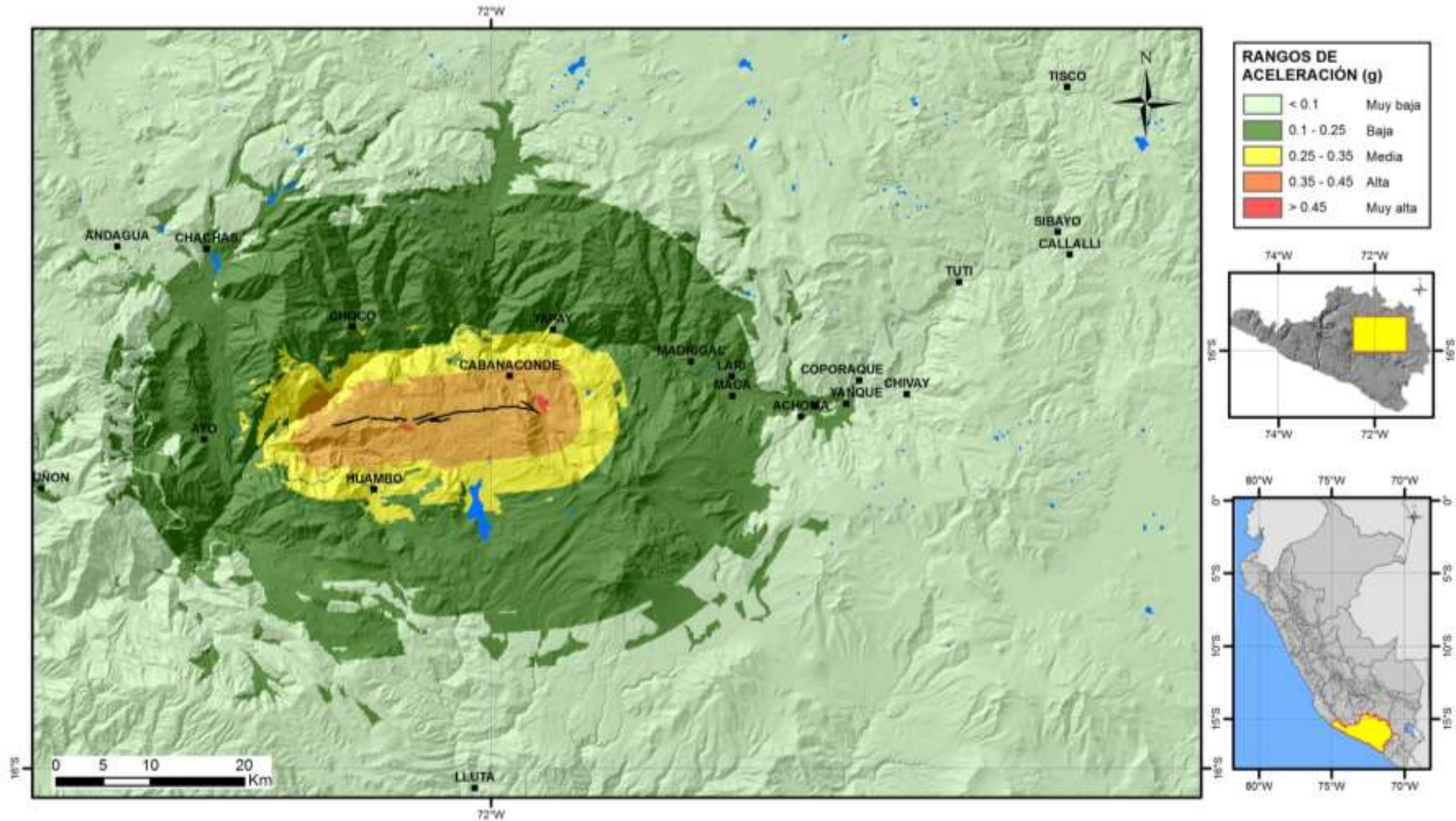


Figura 2. Aceleración sísmica para 6.55Mw que es la máxima magnitud estimada para la falla Solarpampa.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

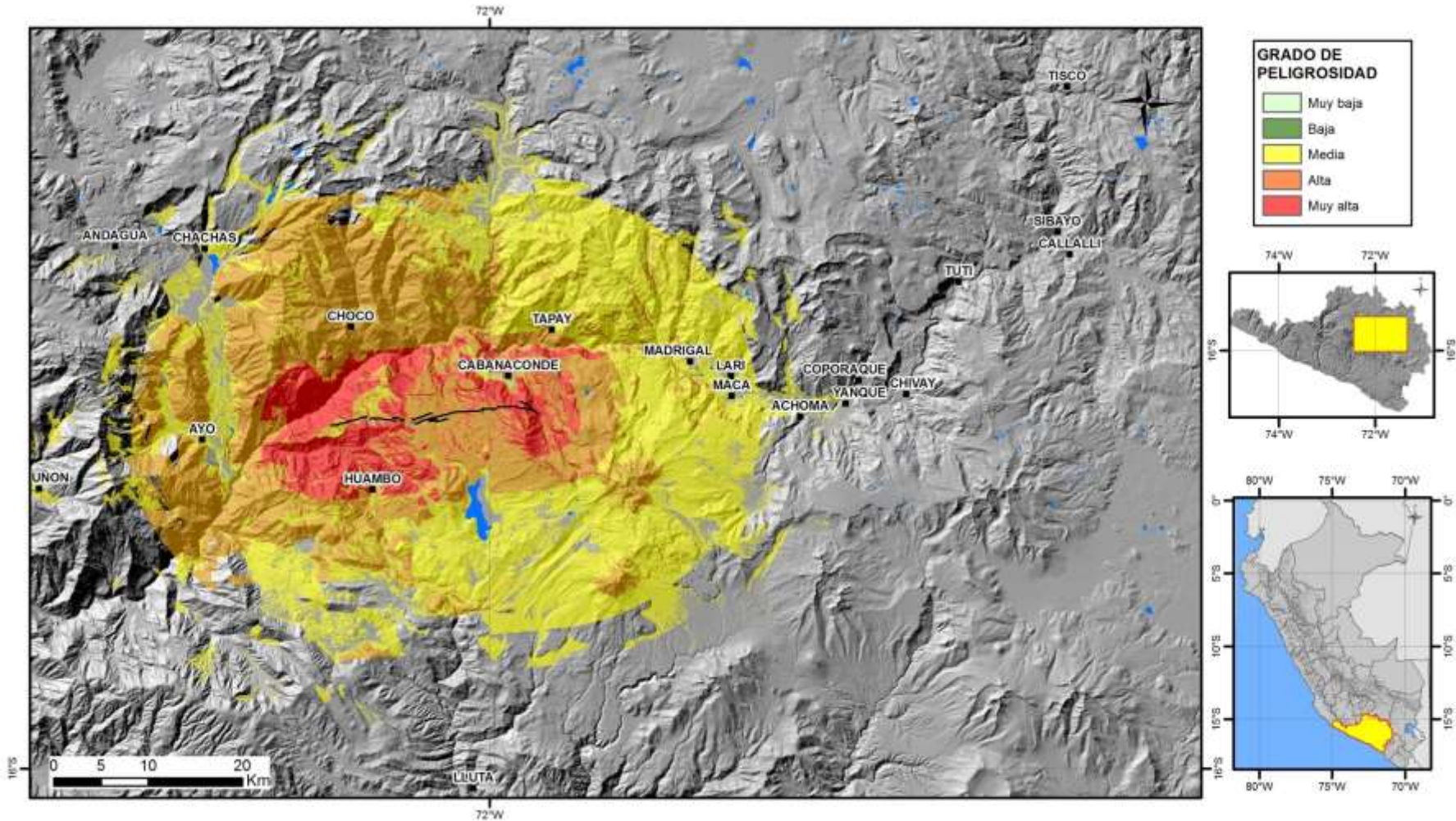


Figura 2.a. Peligrosidad por movimientos en masa detonados por sismo (6.55Mw), falla Solarpampa.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

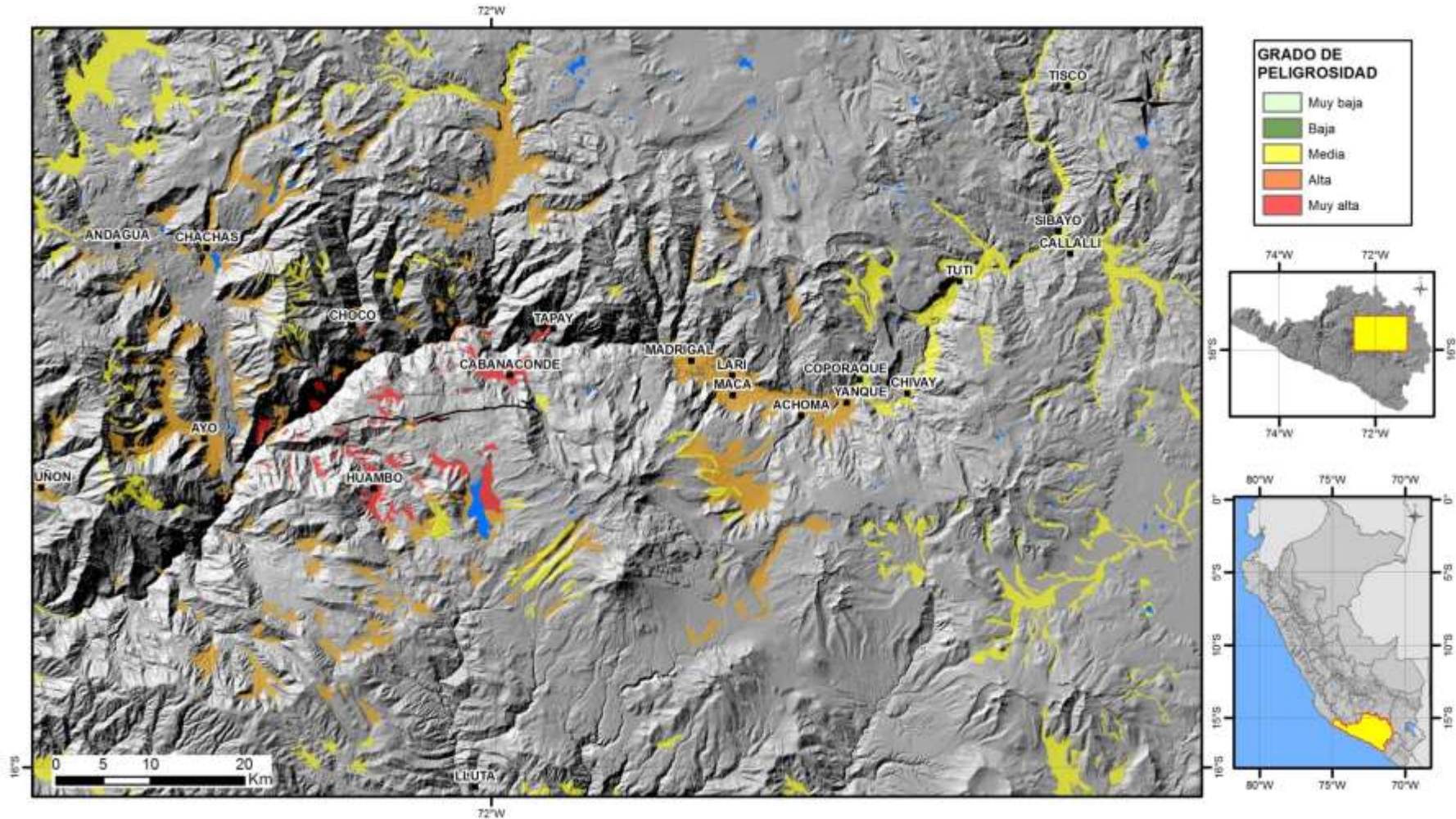


Figura 2.b. Peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismo (6.55Mw), falla Solarpampa.

FALLA MACA SEGMENTO OESTE

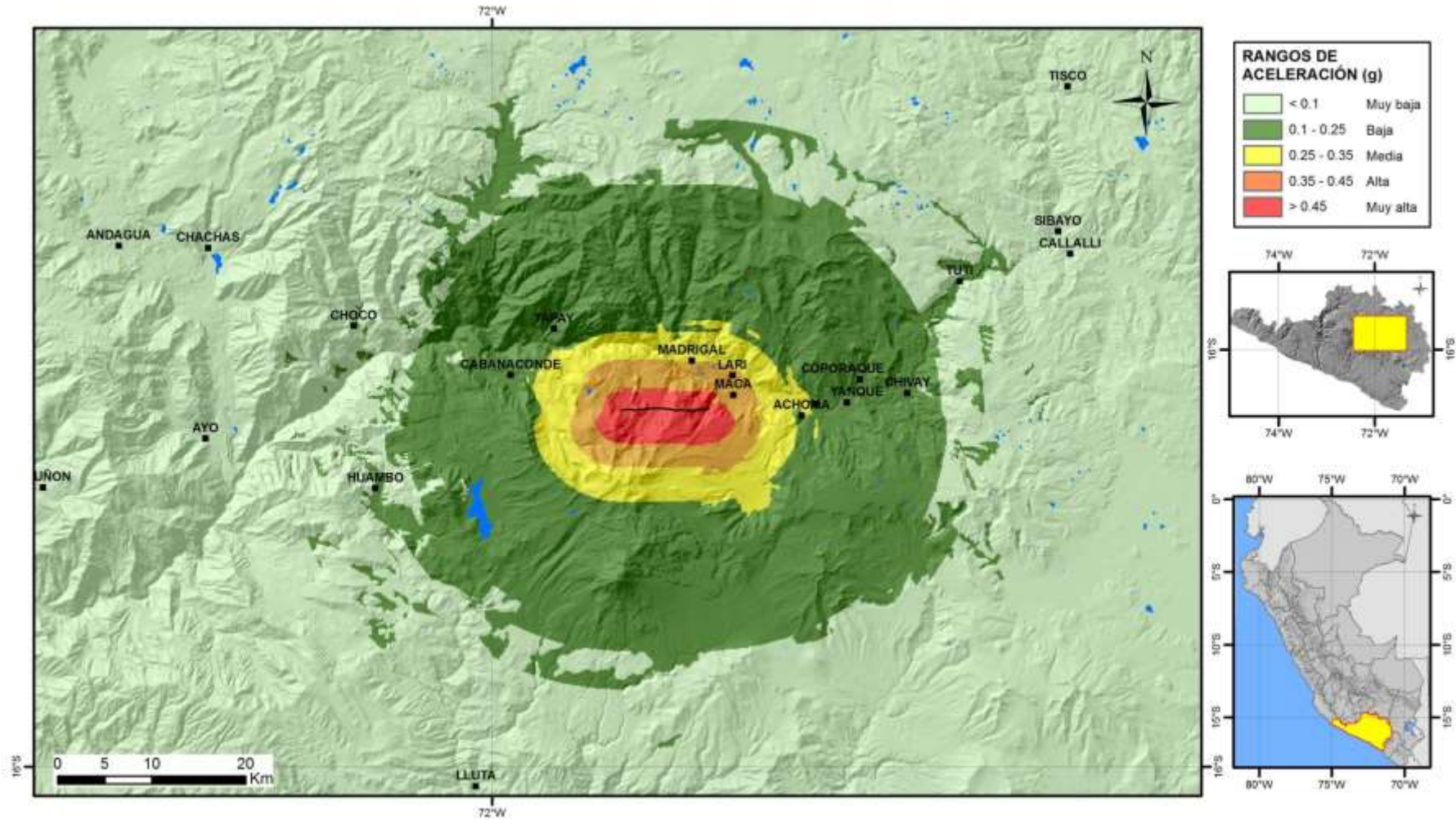


Figura 3. Aceleración sísmica para 6.71Mw que es la máxima magnitud estimada para la falla Maca segmento oeste.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

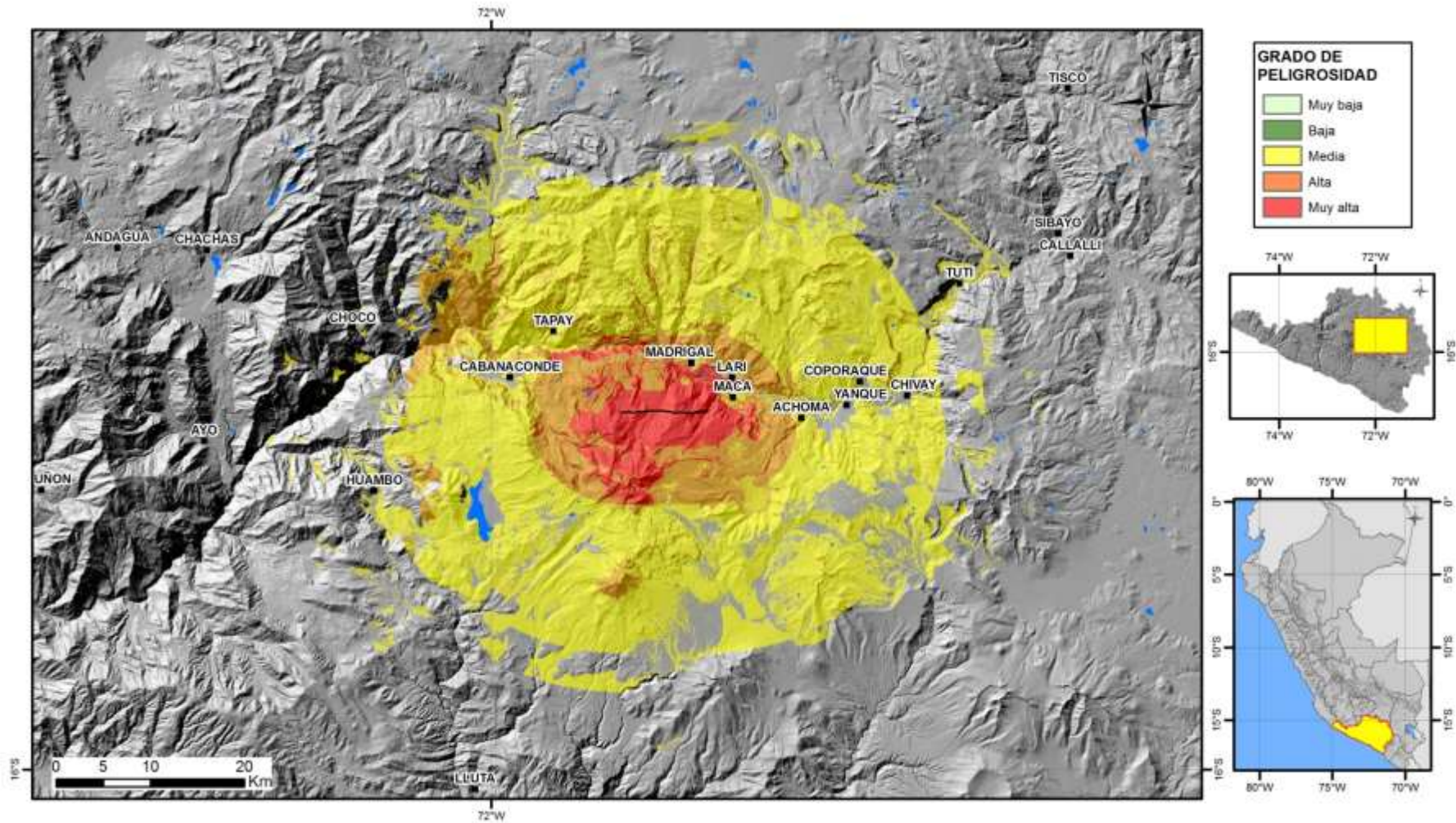


Figura 3.a. Peligrosidad por movimientos en masa detonados por sismo (6.71Mw), falla Maca segmento oeste.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

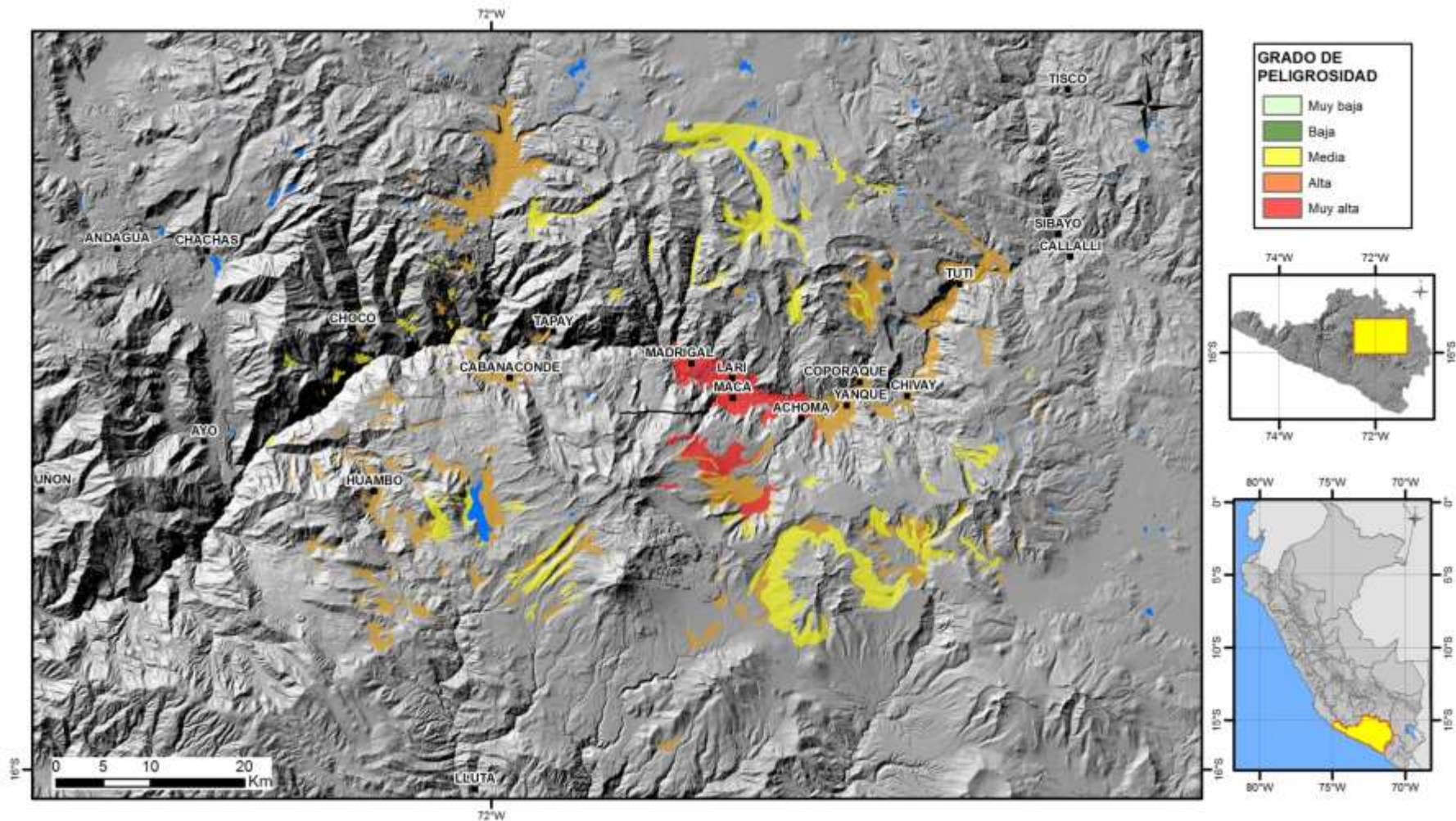


Figura 3.b. Peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismo (6.71Mw), falla Maca segmento oeste.

FALLA MACA SEGMENTO ESTE

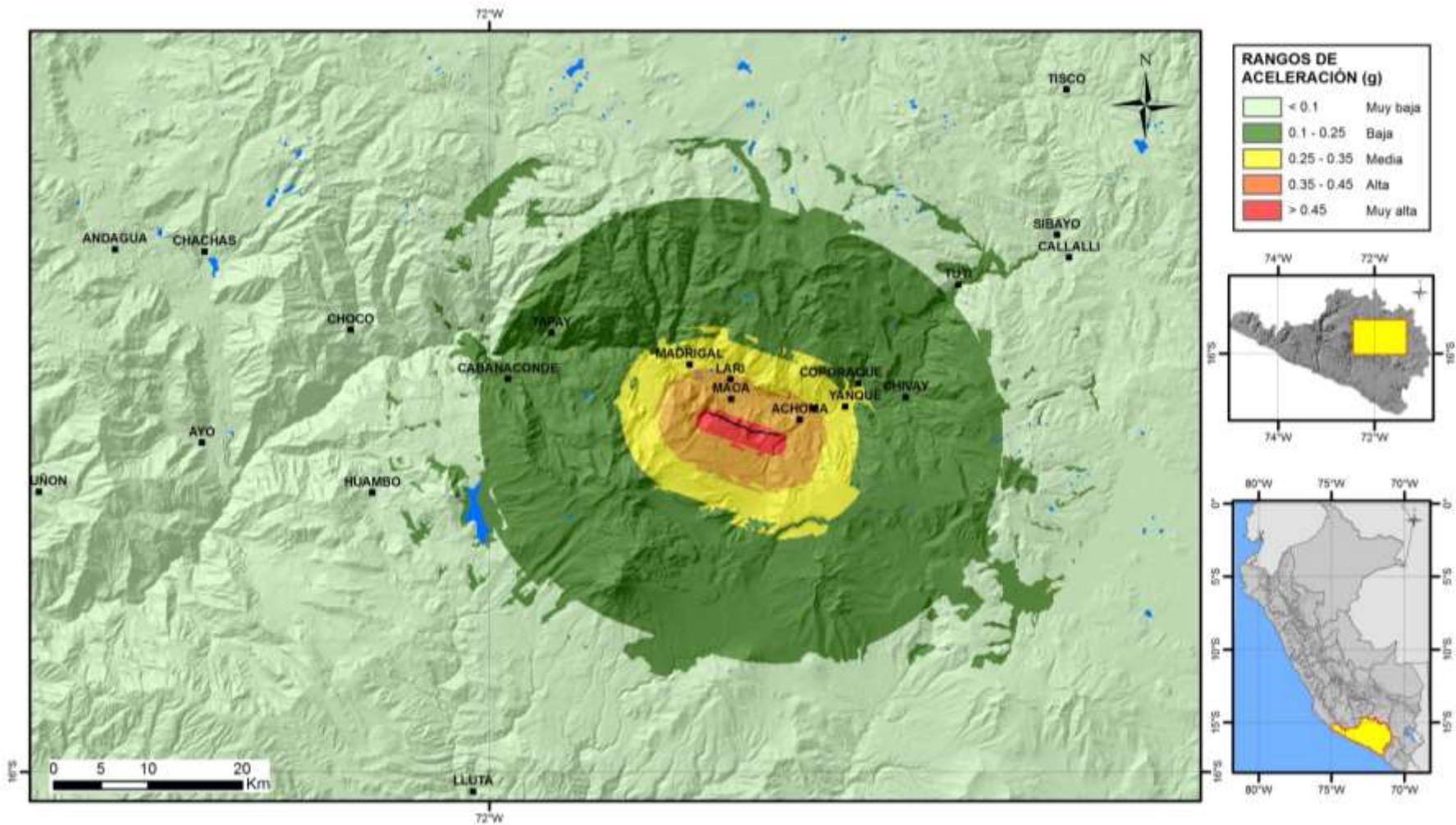


Figura 4. Aceleración sísmica para 6.58Mw que es la máxima magnitud estimada para la falla Maca segmento este.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

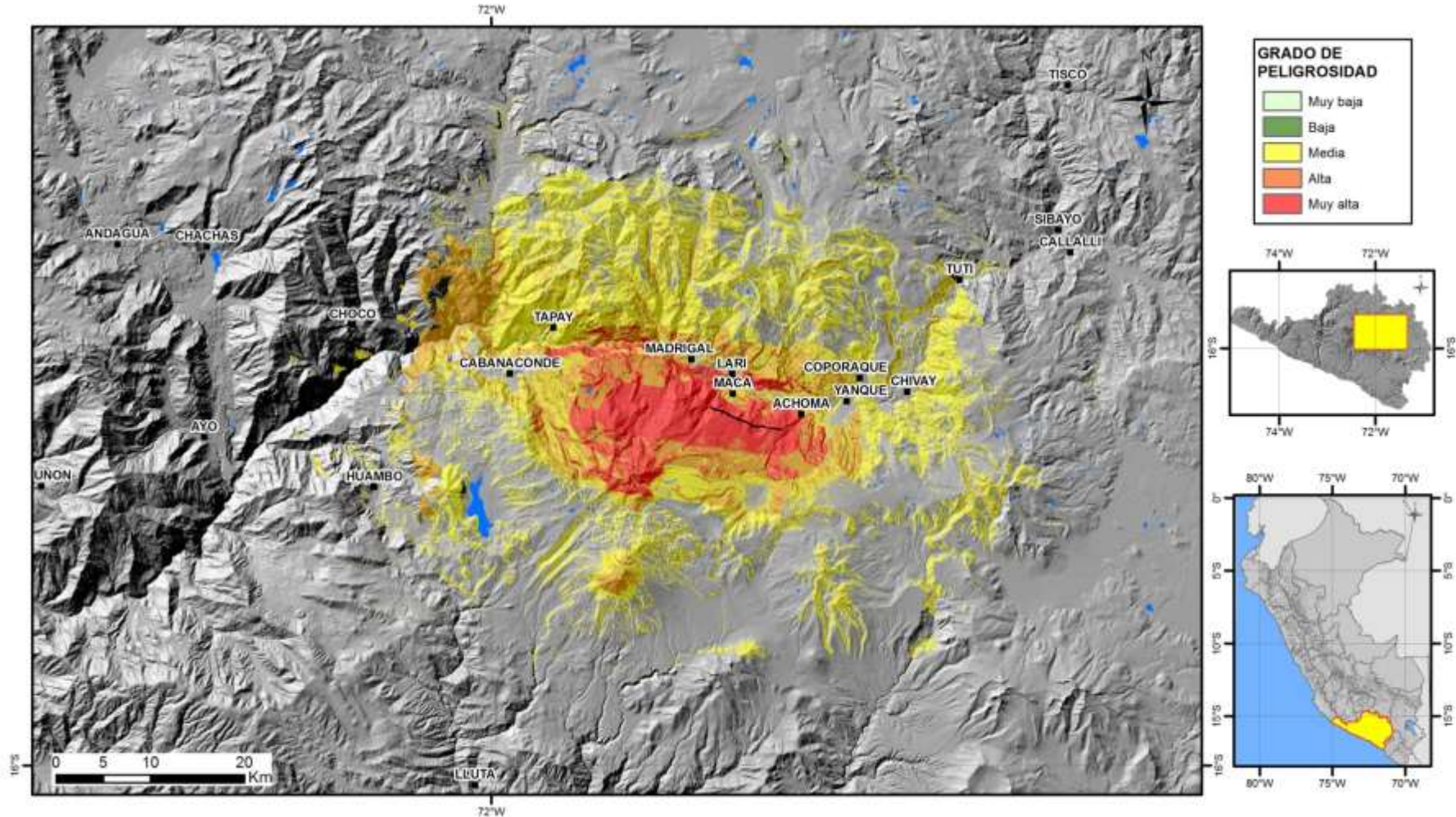


Figura 4.a. Peligrosidad por movimientos en masa detonados por sismo (6.58Mw), falla Maca segmento este.

Evaluación geológica post sismo del 14 de agosto del 2016:
Reactivación de la falla Yanque

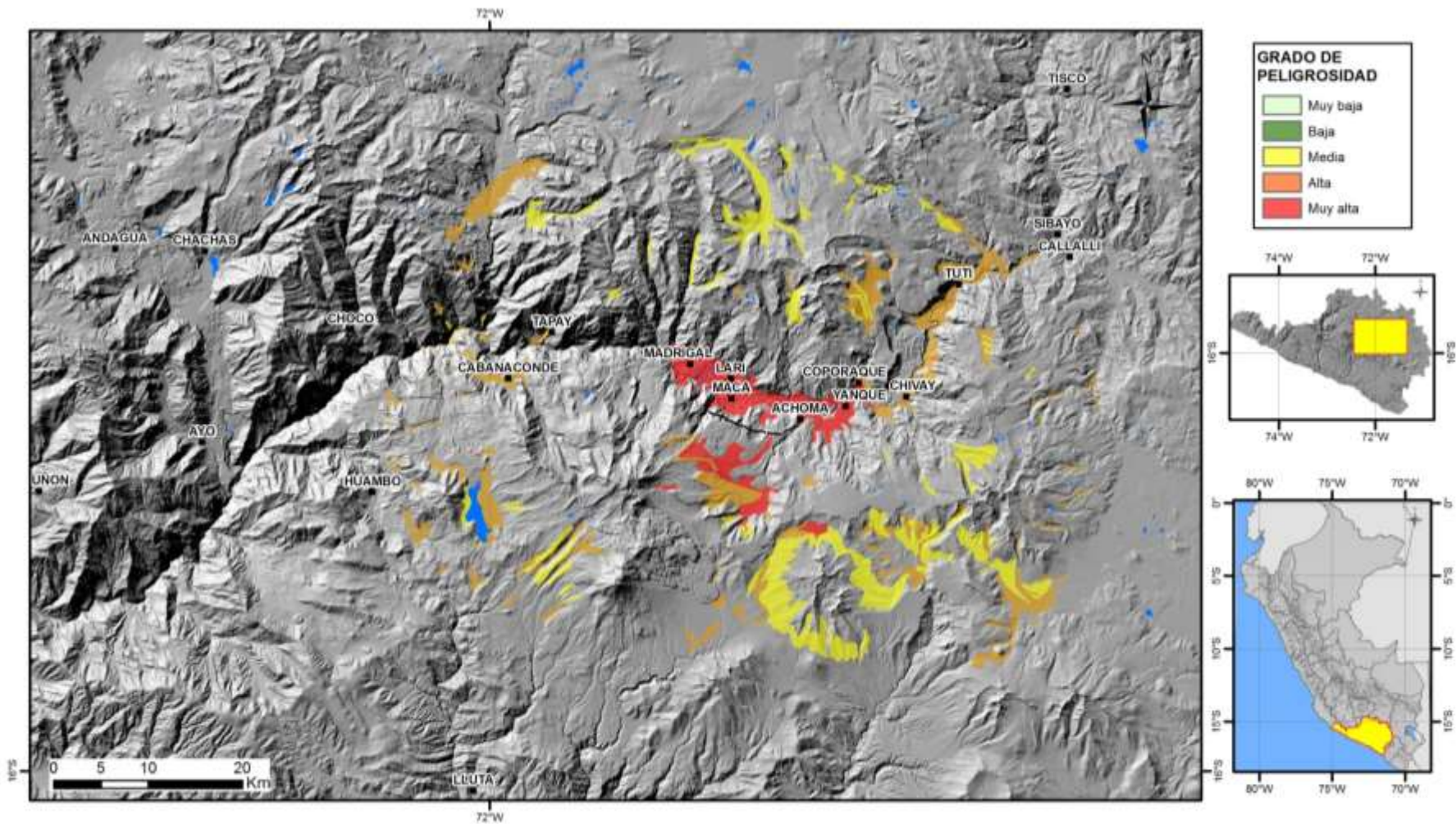


Figura 4.b. Peligrosidad a procesos de licuefacción de suelos y/o asentamientos detonados por sismo (6.58Mw), falla Maca segmento este.

ANEXO 2

INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA

SISMO 14/08/2016



MM01: Caída de rocas.



MM02: Derrumbe.



MM03: Derrumbe.



MM04: Caída de rocas.



MM05: Deslizamiento.



MM06: Derrumbe.



MM07: Deslizamiento



MM08: Deslizamiento



MM09: Derrumbe



MM10: Deslizamiento afectando la andenería.



MM11: Deslizamiento afectando el camino y canal.



MM12: Deslizamiento.



MM13: Deslizamiento.



MM15: Derrumbe.



MM17: Deslizamiento.



MM18: Deslizamiento. (Fotografía aérea - Drone)



MM19: Derrumbes. (Fotografía aérea - Drone)



MM20: Derrumbe. (Fotografía aérea - Drone)



MM21: Deslizamiento. (Fotografía aérea - Drone)



MM22: Caída de detritos.



MM23: Caída de rocas.



MM24: Caída de rocas - Derrumbe.



MM25: Derrumbes.



MM27: Deslizamiento.

ANEXO 2

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE POBLADOS

AFECTADOS

SISMO 14/08/2016

ICHUPAMPA



a)



b)

Fotos a) y b) Iglesia de Ichupampa destruida. Las torres del campanario colapsaron.



a)



b)

Fotos a) y b) muestran el colapso de los muros de viviendas y los techos colapsados.



a)



b)

Fotos a) y b) muestran viviendas completamente colapsadas.

YANQUE



Las fotos muestran la Iglesia de Yanque afectada por el sismo, se observan agrietamientos en la torre del campanario.



a)



a)

En a) se observa una vivienda de adobe con los muros agrietados, esta viviendas está considerada inhabitable. En b) se muestran muros de piedra colapsados; nótese la vivienda con muros de material noble, no sufrió daño alguno.



a)



b)

Las fotos a) y b) se observa parte de la estructura del puente inca colapsada.



a)



b)

En las Fotos a) y b) se puede observar los daños causados por el sismo del 14/08/2016 al canal de Yanque que transporta agua de la margen izquierda a la margen derecha del valle a través de un sifón.

ACHOMA



a)



b)

Las fotos a) y b) muestran la Iglesia de Achoma afectada por el sismo, se observan agrietamientos en una de las paredes de la iglesia.



a)



b)

Las fotos a) y b) muestran muros de piedra y barro colapsados, nótese en b) una vivienda de material noble que no sufrió daños.



a)



b)

En a) se muestran muros colapsados y completamente agrietados. En b) se observa agrietamientos junto al canal Majes-Siguas, se deben probablemente a un asentamiento de la estructura por el movimiento sísmico.

LISTADO DE FOTOS Y FIGURAS

FOTOS

- Foto 1: Deslizamiento en la carretera Coporaque – Ichupampa, margen derecha del río Colca.
- Foto 2: Deslizamiento en la carretera Ichupampa – Lari, margen derecha del río Colca.
- Foto 3: Caída de rocas en Chivay, margen izquierda del río Colca.
- Foto 4: Caída de rocas (Derrumbe) en el tramo de la carretera Achoma-Maca. Margen izquierda del río Colca.
- Foto 5: Grietas en el terreno generadas por el sismo del 14 de agosto, llegando a presentar abertura de hasta 10cm.
- Foto 6: Se observa bloques movidos, en algunos casos volteados, por la vibración del terreno frente a las ondas sísmicas.
- Foto 7: Daños en la iglesia destruida, los campanarios de la iglesia colapsados por efectos del movimiento sísmico.
- Foto 8: Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.
- Foto 9: Construcción de un piso de material noble que no sufrió daños por efecto del sismo.
- Foto 10: Vivienda de dos pisos de material noble, las paredes y ventanas no sufrieron daños en comparación a la vivienda de adobe que se encuentra continua a esta.
- Foto 11: Vivienda afectada, los muros están agrietados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de material, es considerada una vivienda inhabitable.
- Foto 12: Canal destruido por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.
- Foto 13: Vivienda colapsada por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción.
- Foto 14: Muros colapsados por efecto de la amplificación de ondas sísmicas, el suelo y el tipo de construcción, nótese la vivienda de material noble que no sufrió mayor daño.

FIGURAS

- Figura 01: Mapa de ubicación del sismo del 14 de agosto del 2016.
- Figura 02: Mapa geomorfológico del Valle del Colca. Modificado de Zavala et al, 2014.
- Figura 03: Mapa geológico del Valle del Colca. Modificado de Palacios et al, 1993.
- Figura 04: Mapa neotectónico del valle del Colca, las líneas rojas indican las fallas activas de las zonas, estudiadas e identificadas en campo. La recopilación de eventos sísmicos registrados desde el año 1991 hasta la fecha (IGP), demuestra la alta actividad sísmica de la zona.
- Figura 05: Falla Yanque y falla Ichupampa. La línea gruesa de color rojo con bordes blanco, es el segmento reactivado que generó el sismo del 14 de agosto.
- Figura 06: Mapa de aceleración sísmica. En línea roja se observa el segmento reactivado de la Falla Yanque que origino el sismo del 14 de agosto de 2016.
- Figura 07: Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos). (Tomado de Rodríguez-Pascua et al., 2011)
- Figura 08: Mapa de inventario de movimientos en masa producidos por el sismo del 14/08/2016. (Mapa Base tomado de Zavala et al.2008)
- Figura 09: Grietas y licuefacción de suelos. Se observaron material expulsado del subsuelo a través de zonas de debilidad (grietas). Este material o depósitos son de color diferente al observado en superficie y con grado de cohesión bajo. A) muestra una interpretación sobre la relación de las grietas y la licuefacción; estos suelos expuestos en superficie están relacionados con la sacudida del terreno y sólo se observan a lo largo de la traza de la falla Yanque. B) esta figura muestra la disposición lineal de estos depósitos expulsados (ver la libreta de campo como escala). C) detalle

- de las grietas, en este caso con aberturas de 5 cm, y del material expulsado a través de ella.
- Figura 10: Momento de deformación de infraestructura y sustrato. a) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este puede quedar deformado permanentemente, pueden observarse en el terreno vasculamientos, plegamientos, fracturas y grietas. b) se observa el paso de las ondas sísmicas, afecta las edificaciones debido a la deformación elástica del sustrato (suelo), pero debido al tipo de suelo este no sufre ninguna deformación permanentemente, solo se puede observar en el edificaciones debido a la dirección de agrietamientos y/o deformaciones las dirección de las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)
 - Figura 11: Fracturación de un muro por movimientos sísmicos de carácter cíclico y paralelos al mismo. Suelen aparecer con mucha frecuencia en muros de ladrillo. Se producen fisuras en cada uno de los ciclos, provocando fracturas conjugadas (en forma de cruz o aspa) que suelen aparecer con un ángulo de 45°. Este tipo de deformaciones son producidas por las ondas sísmicas y no implican la deformación permanente del terreno; son el resultado del comportamiento frágil del muro frente a las deformaciones elásticas inducidas por las ondas sísmicas. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)
 - Figura 12: Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares al muro. En el caso del patrón de fisuración (c) puede estar producido tanto por movimientos perpendiculares como paralelos al muro. No obstante, en terremotos instrumentales este último tipo de fracturación suele indicar un movimiento perpendicular a la estructura muraria. (Tomado de Giner-Robles et al., 2011)
 - Figura 13: Distribución de las viviendas que sufrieron daños a lo largo del Valle del Colca.
 - Figura 14: Distribución de viviendas colapsadas por distritos a lo largo del Valle del Colca, donde se observa que Ichupampa, Yanque y Achoma presentaron mayores daños.
 - Figura 15: Mapa de distribución de viviendas colapsadas en el Valle del Colca, producto del sismo del 14/08/2016.
 - Figura 16: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de la iglesia de Ichupampa; C) Fotografía de campo de la iglesia de Ichupampa; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al norte la plaza principal de Ichupampa, donde se observa los muros colapsados; E) Fotografía de campo de las viviendas mostradas en la figura D.
 - Figura 17: Posibles zonas de reubicación temporal para Ichupampa.
 - Figura 18: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Ichupampa por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle del canal de Yanque; C) Fotografía de campo del canal de Yanque; D) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas en la plaza principal de Yanque, donde se observa los muros agrietados; E) Fotografía de campo de una de las viviendas mostrada en la figura D.
 - Figura 19: Posibles zonas de reubicación temporal para Yanque.
 - Figura 20: A) Registro aéreo de viviendas dañadas en Achoma por efecto del sismo del 14/08/2016, los polígonos en rojo muestran la infraestructura afectada; B) Detalle de imagen aérea de viviendas afectadas al Ingreso de Achoma, donde se observa los muros colapsados; C) Fotografía de campo de la vivienda mostrada en la figura C; D) Detalle de la iglesia de Achoma; E) Fotografía de campo de la iglesia de Achoma con facturas en los muros.
 - Figura 21: Posibles zonas de reubicación temporal para Achoma.
 - Figura 22: Columna estratigráfica de los depósitos lacustres cuaternarios del valle del Colca. A la derecha se observan fotografías generales y de detalle de las secuencias (I, II y III) y fotografías con las estructuras deformadas "sismitas" A, B, C, D y E las cuales vienen a ser evidencias de sismos pasados) (tomado de Benavente et al., 2010)