

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias en ciencias de la Tierra con
orientación en Geociencias Ambientales**

**Estudio geomorfológico y paleosísmico del segmento norte de
la falla Detachment Cañada David**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Víctor Hugo Villaverde Villalobos

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por
Víctor Hugo Villaverde Villalobos

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. John Fletcher Mackrain
Codirector de Tesis

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Codirector de Tesis

Dr. Ronald Michael Spelz Madero

Dra. Lydia Betty Ladah

Dr. Juan Contreras Pérez

M.C. Francisco Suárez Vidal (†)



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la
Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Víctor Hugo Villaverde Villalobos © 2017

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Víctor Hugo Villaverde Villalobos** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Estudio Geomorfológico y paleosísmico del segmento norte de la falla Detachment Cañada David

Resumen aprobado por:

Dr. John Fletcher Mackrain
Codirector de tesis

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Codirector de tesis

Se realizó un estudio geomorfológico y paleosísmico del segmento sinforme norte de la falla Detachment Cañada David (CDD), el cual se extiende a lo largo de la margen oeste de la Sierra El Mayor en su extremo norte. Mediante un dron se realizó un levantamiento fotográfico de alta resolución de un área de 48Km², generándose Ortomosaicos, Modelos Digitales de Superficie y Nubes de Puntos que se utilizaron en la interpretación estructural y morfoestratigráfica de las diferentes secuencias de abanicos aluviales Cuaternarios. Los resultados obtenidos permitieron identificar rasgos estructurales y litológicos sin precedente, los cuales revelaron nuevas relaciones estructurales entre la falla maestra CDD y el arreglo de escarpes Cuaternarios que cortan las superficies aluviales. En la cuenca Cerro Colorado, entre la traza de la falla CDD y el arreglo de escarpes Cuaternarios asociados con el sismo Mw=7.2 (1892), se identificó un sistema relicto de fallas normales de alto ángulo con desplazamiento hacia el oeste, similar a la falla CDD. Esta relación fortalece la teoría del “Rolling-Hinge” que predice la migración de la deformación en dirección del transporte tectónico de la falla CDD. Proponemos que en respuesta a esta actividad, la falla CDD ha registrado al menos dos eventos: el primero generó el sistema de fallas relicto Cerro Colorado, localizado 6 km hacia el oeste de la falla CDD; y el segundo formó el nuevo arreglo de escarpes en la margen oriental de la cuenca Laguna Salada, a una distancia de 12 km al oeste del trazo de la falla CDD. Adicionalmente, se documentó por primera vez la ruptura superficial relacionada al evento ML=6.5 (1934), del cual se cartografiaron ~30 km de ruptura en superficie. Derivado de las relaciones cortantes, proponemos que la energía del sismo de 1934 propagó de sur a norte a través de la falla CDD, para posteriormente continuar a la falla Chupamirtos. Finalmente, se cartografiaron 4 km de rupturas superficiales, adicionales a los 58 km ya documentados por Rockwell et al (2015), del sismo Mw=7.2 (1892). Este nuevo segmento define la unión entre las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos, las cuales proponemos conforman una sola estructura geológica.

Palabras clave: Paleosismología, falla normal de bajo ángulo, Cañada David Detachment, percepción remota, sistemas de información geográfica (SIG), vehículo aéreo no tripulado (VANT), dron.

Abstract of the thesis presented by **Víctor Hugo Villaverde Villalobos** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Geomorphological and paleoseismic study of the northern segment of the Cañada David Detachment fault

Abstract approved by:

Dr. John Fletcher Mackrain
Thesis Codirector

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Thesis Codirector

A geomorphological and paleoseismic study was done on the northern synform segment of the Cañada David detachment fault (CDD), which extends along the western margin of Sierra El Mayor at its northern end. A high resolution photographic survey of an area of 48 km² was taken using a drone, from which orthomosaics, Digital Surface Models and Point Clouds were generated, and then used in structural and morphostratigraphic interpretations of Quaternary alluvial fans. The results obtained allowed unprecedented structural and lithological features to be identified, which revealed new structural relationships between the CDD master fault and the array of Quaternary escarpments that cut alluvial surfaces. In the Cerro Colorado basin, between the trace of the CDD fault and the Quaternary escarpment array associated with the Mw = 7.2 1892 earthquake, we identified a relict system of west dipping high angle normal faults, similar to the CDD. This relationship strengthens the "Rolling-Hinge" theory that predicts the migration of deformation in the direction of tectonic transport of the CDD fault. Based on our results, we propose that the CDD fault has recorded at least two events: the first generated the Cerro Colorado relict fault system, located 6 km west of the CDD fault; and the second formed the new escarpment array on the eastern margin of the Laguna Salada basin, 12 km west of CDD fault trace. Additionally, for the first time we documented the surface rupture related to the M_L = 6.5 1934 event, of which ~ 30 km of surface rupture were mapped. Based on cross-cutting relationships, we propose that the energy of the 1934 earthquake propagated from south to north through the CDD fault, and then continued to the Chupamirtos fault. Finally, 4 km of surface rupture of the M_w = 7.2 1892 earthquake were mapped, in addition to the 58 km already documented by Rockwell et al (2015). This new segment defines the union between the Red Canyon and Chupamirtos faults, which we now propose to be a single geological structure.

Keywords: Paleosismology, low angle normal fault, Cañada David Detachment, remote sensing, geographic information systems (GIS), unmanned aerial vehicle (UAV), drone.

Dedicatoria

*A mis padres, Matías Antonio y María del Refugio.
A mis hermanos, Antonio, Héctor, Elva y Alejandro.*

*“La fuerza de la manada es el lobo, la fuerza del lobo es la manada”
- Joseph Rudyard Kipling*

Agradecimientos

Agradezco a CONACYT por el financiamiento de mi grado y el proyecto, así mismo agradezco al CICESE y su personal técnico y administrativo por las facilidades prestadas para el desarrollo de esta investigación. En especial a Conchita González, Ana Rosa Soto y José Mojarro por su ayuda en las cuestiones administrativas y técnicas. Gracias.

A los directores de este proyecto de investigación el Doctor John Fletcher Mackrain y el Maestro Alejandro Hinojosa Corona, muchas gracias por su tiempo, su paciencia y sus enseñanzas.

A los miembros del comité, Doctores Ronald Michael Spelz Madero, Lydia Betty Lada, Juan Contreras Pérez y al Maestro Francisco Suárez Vidal[†]. Gracias.

A mis compañeros de proyecto: Abel, Laura y Jaziel. Por las experiencias compartidas en el laboratorio y fuera de él. La verdad sí estuvo divertido asolearnos bajo el cálido sol de la Laguna Salada durante nuestras vacaciones todo incluido. Gracias amigos.

A los pelícanos, muy en especial a mis amigos: Mariana, Luis, Mayra, Rigel, Juan Carlos, Valeria, Sergio, Hebert, Estrella, Daniela, Marianngy, Manuel, Karina y Diego. Gracias.

A mis amigos Zuhey, Edwin y Esmeralda, una prueba de que la distancia une y fortalece. Gracias amigos.

A Luly González y a su familia por abrir las puertas de su casa para mí, gracias.

A mis hermanos: Antonio, Héctor, Elva y Alejandro. Ustedes son como mis arterias, los amo. Gracias.

Y muy especialmente a mis papás. Muchas gracias viejos, porque son la motivación y el impulso que complementan mis ganas de hacer las cosas. Gracias, gracias, gracias!

Tabla de contenido

	Pagina
Resumen	ii
Abstract	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Tabla de contenido	vi
Lista de figuras	viii
1 Introducción	1
1.1 Actividad sísmica de la región	1
1.1.1 Evento sísmico 1892.....	1
1.1.2 Evento sísmico 1934.....	2
1.1.3 Evento sísmico 2010.....	2
1.2 Fallamiento normal de bajo ángulo.....	4
1.3 Hipótesis y Objetivos	7
1.3.1 Hipótesis	7
1.3.2 Objetivos Generales	7
1.3.3 Objetivos particulares	7
2 Marco geotectónico de Baja California Norte	8
2.1 Cuenca Laguna Salada	10
2.2 Litología	11
2.3 Fallas en la cuenca Laguna Salada	14
2.3.1 Cañada David Detachment (CDD).....	15
2.3.2 Falla Laguna Salada (FLS)	17
2.3.3 Falla Cañón Rojo (FCR).....	17
2.3.4 Falla Chupamirtos (FCH)	18
3 Materiales y métodos	19
3.1 Cartografía de abanicos aluviales y escarpes de falla.....	19
3.1.1 Introducción	19
3.1.2 Caracterización de abanicos aluviales y escarpes de falla Cuaternarios	19

3.1.3	Reconstrucción topográfica por fotogrametría (Structure from Motion)	20
3.2	Hardware y Software.....	21
3.3	Adquisición y procesamiento de datos	22
3.4	Productos obtenidos del proceso Structure from Motion	24
3.4.1	Ortomosaicos	24
3.4.2	Modelos digitales de superficie.....	25
3.4.3	Nube de puntos	26
3.5	Delimitación y clasificación de las unidades aluviales y escarpes de falla.....	28
3.5.1	Relaciones cortantes	35
4	Resultados	36
4.1	Sistema de fallas al frente de la Sierra El Mayor	36
4.1.1	Falla Cañada David Detachment.....	36
4.1.2	Falla Laguna Salada.....	40
4.2	Sistema de fallas Cañón Rojo-Chupamirtos (CRCH)	41
4.2.1	Falla Cañón Rojo	41
4.2.2	Falla Chupamirtos.....	42
4.3	Sistema de fallas Cerro Colorado	44
4.4	Relaciones Cortantes.....	45
4.5	Segmentos de falla Laguna Salada	45
4.6	Segmentos de falla Cañón Rojo – Chupamirtos	45
4.6.1	Falla Cerro Colorado	66
5	Discusiones.....	70
5.1	Extensión del límite sur del sismo $M_w = 7.2$ de 1892	70
5.2	Delimitación e identificación de la ruptura del sismo 1934	71
5.3	Brecha sísmica definida por ausencia de escarpes en el segmento CRCH3	73
5.4	Complejidades estructurales: Zonas de acomodamiento	74
5.5	Papel de la falla Cerro Colorado: Confirmación del mecanismo Rolling Hinge	76
6	Conclusiones.....	78
7	Bibliografía	80
8	Anexos.....	85
8.1	Anexo 1.....	85

Lista de figuras

Figura

Página

- 1 Rupturas principales y eventos sísmicos históricos. La figura muestra los datos gráficos de los sismos históricos de la región de la Laguna Salada: rupturas superficiales, ubicación de epicentros y magnitudes determinadas. La línea roja representa la ruptura relacionada con el sismo del 2010. La estrella roja representa el epicentro del sismo 2010. La línea roja hace referencia a la ruptura, la cual recorre alrededor de los 50 km en dirección de la frontera con U.S.A. a través de la Sierra Cucapah. La línea roja intermitente señala 53 km de ruptura en superficie ubicada dentro del delta del Río Colorado. Estrellas en color negro indican los epicentros de los eventos históricos 1892 ($M_w = 7.2$) y 1934 ($M_L = 6.5$). Líneas verdes: arreglo de escarpes relacionados a la falla de bajo ángulo Cañada David Detachment. línea amarilla con negro= falla Laguna Salada. Figura tomada de Fletcher et al., 2014..... 4
- 2 Secciones transversales esquemáticas de la corteza superior que muestra los dos modelos de evolución de una falla normal a una falla de bajo ángulo. Fallas por formarse se muestran con líneas discontinuas, fallas activas se muestran con líneas negras gruesas, y las fallas inactivas se muestran como líneas negras delgadas. (A) Modelo de rotación estilo dominó, donde la generación de fallas de alto ángulo más antiguas va rotando hasta lograr una extensión tan crítica, derivado de un ángulo de inclinación tan bajo que se vuelve desfavorable al fallamiento. Esto ocasiona que se forme un nuevo grupo de fallas de alto ángulo y este proceso se repita. (B) El modelo Rolling Hinge presenta el rebote isostático en dirección del transporte tectónico del bloque de piso, ocasionado por el abandono del bloque de techo. Generando que el ángulo de inclinación de la falla disminuya críticamente. (C) Modelo combinado, este modelo es una mezcla de los dos mecanismos anteriores (Brady y Wernicke, 2000). 6
- 3 Regiones geotectónicas que forman la frontera de placas Pacífico-Norteamérica. De sur a norte: El dominio Golfo de California caracterizado por transtensión. El dominio del Big Bend caracterizado por ser una zona transicional. El dominio de San Andrés que se caracteriza por compresión. Las flechas negras indican el movimiento relativo de las placas Pacífico-Norteamérica (tomada de Hernández-Flores, 2015)..... 9
- 4 Fallas regionales del norte de Baja California. las líneas continuas son fallas bien localizadas y las líneas discontinuas son fallas interpretadas. B=Falla Borrego, CA=Falla Calabazas, CH=Falla Chupamirtos, CP=centro de dispersión Cerro Prieto, CR=Falla Cañón Rojo, CU=Falla Cucapah, CW=Cuenca Wagner, E=Falla El Descanso-Estero, M=Falla Maximinos, ON=Falla Ojos Negros, P=Falla Pescaderos, S=Falla Bahía Soledad, SS=Salton Sea y TH=Falla Tres Hermanas. (Imagen tomada de Cruz-Castillo, 2002 y modificada Spelz, 2008). 10
- 5 Mapa geológico simple de la cuenca sedimentaria Laguna Salada donde se muestran las fallas principales y secuencias sedimentarias. CDa= Porción activa de Cañada David Detachment, CDi= Porción inactiva del Cañada David Detachment, CRF= Falla Cañón Rojo, LSF= Falla Laguna Salada, MBD= Monte Blanco Detachment, RF= Falla Frente de Montaña (Range Front) escarpes a través de la continuación de la CDD. (Imagen tomada de Dorsey y Martín-Barajas, 1999)..... 13
- 6 Sistema de fallas que dominan el movimiento tectónico de la cuenca Laguna Salada. Líneas moradas.- sistema de fallas Laguna Salada, la cual tiene 57 km de longitud de rumbo N 50 W y un buzamiento entre 55° - 70° con dirección al suroeste. Línea amarilla.- falla Cañón Rojo (FCR) con buzamiento 55° a 60°, un rumbo N30 - 35E y un

	desplazamiento normal dirección NW. Línea verde.- Falla Chupamirtos (FCH) se estima un buzamiento de 65°. Línea rosa.- La falla Cañada David Detachment (CDD) de longitud aproximada de 60 km al frente de la Sierra El Mayor, buza en un ángulo aproximado a 30°. Líneas negras.- arreglo de escarpes Cuaternarios. El recuadro blanco delimita la región del Domo Monte Blanco.....	16
7	La técnica SfM requiere múltiples fotografías de un mismo objeto tomadas de diferente posición, como entrada a la reconstrucción de ortomosaicos 2D y modelos 3D.	20
8	Área de estudio (48,6 km ²). zona de intersección de las Sierras Cucapah y El Mayor, mostrando el área de cobertura de los vuelos eBee sobre la zona de estudio (Polígonos naranjas) las cuales cubren los escarpes cuaternarios del nuevo frente de montaña de la Sierra El Mayor. El área fue dividida en 4 secciones, y cada sección fue cubierta por una misión de vuelo. La línea roja representa la falla Laguna Salada al pie de la sierra Cucapah. Línea verde representa la traza principal de la falla Detachment Cañada David. Las líneas negras son los escarpes de falla. El recuadro rojo muestra la zona de estudio en la macro-localización del área.	23
9	Figuras incluidas en el reporte PostFlight Terra en el procesado de las fotografías colectadas en la misión de vuelo 1. Secuencia del procesamiento progresivo de los datos colectados a partir de la primera misión de vuelo en el área de estudio (ver misión 1 en Figura 1). UBICACIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS A) puntos iniciales (azules) muestran la ubicación donde fue tomada la fotografía aérea y su posición corregida (verdes). En el recuadro principal se muestra la ubicación de los datos en el plano XY, El recuadro inferior muestra la ubicación de las imágenes en el plano XZ, y el recuadro lateral muestra la ubicación de las imágenes en el plano YZ. B) ZONAS DE TRASLAP: áreas rojas, naranjas y amarillas= zonas con bajo solapamiento entre las fotografías aéreas. Área verde= superposición de más de 5 imágenes por píxel (lo ideal). RESULTADOS (11.5 cm/Píxel) = C) Ortomosaico y D) Modelo Digital de la Superficie (MDS).....	24
10	Comparación de la calidad entre las imágenes utilizadas. A) Imagen de Google Earth (1m/píxel), B) Imagen eBee (11.6 cm/píxel). Nótese la diferencia en claridad y resolución de las imágenes colectadas en el presente estudio. La imagen B (eBee) muestra mayor detalle que A. Se pueden apreciar características como el camino cargado a la izquierda de la fotografía, las diferencias morfológicas de barras y canales de la unidad en la esquina superior derecha (Q6) y la unidad de la esquina inferior derecha (Q4), la vegetación y los canales activos característicos de las unidades más jóvenes (Q1 y Q2) entre estas unidades.....	25
11	Comparación entre Modelos de elevación Digital. A) MDS desarrollado por eBee 11.6 cm). B) MDE INEGI (5 m). C) MDE ALOS Prism (5 m). D) MDE SRTM 1 segundo de arco (30 m). Como se puede apreciar en la comparación de los modelos de elevación, en grado de detalle que se aprecia en el MDS generado a partir de las fotografías tomadas por Ebee es alto, y esto se puede apreciar en los canales activos de las unidades más jóvenes. Es fácil identificar también el arreglo de escarpes que se despliega de Noreste a Suroeste generando una diferencia de altura entre unidades aluviales. Las características morfológicas de dichas unidades son también fáciles de identificar en la imagen A. Los DEM B y C, aunque se presentan en la misma resolución, la calidad topográfica que se presenta en la B (INEGI) se debe a que este modelo se desarrolló a partir de tecnologías LiDAR, en cambio, el modelo en C (ALOS) deriva de fotografías satelitales de 2.5 m de resolución. EL modelo en la imagen D, tiene una resolución de 1 Arco segundo (aproximadamente ~30 m).....	27

- 12 Densidad de nube de puntos de la sección 1, al norte del frente de la Sierra El Mayor (A) permite identificar los abanicos aluviales mas elevados y a grandes rasgos el recuadro blanco enmarca la zona mostrada en la imagen B. La imagen (B) muestra la representación tridimensional de la superficie de la región a una escala de 600 m, donde es posible identificar las diferentes unidades aluviales, las diferencias litológicas y los cauces de los canales activos, densidad de vegetación. El recuadro en blanco muestra la zona mostrada en la imagen C. (C) muestra una escala de 95 metros que permite identificar un escarpe moderno que corta unidades aluviales modernas, mismas que ha sido erosionadas e intemperizados por canales modernos activos.28
- 13 Mapa representativo de la cartografía de las unidades en la margen NW de la Sierra El Mayor. Características de las unidades aluviales Q1, Q2, y Q3. Las unidades mostradas en esta imagen, se considera fueron desarrolladas en el mismo periodo glacial, debido a que las características son muy similares. La diferencia se registra en las alturas relativas entre las unidades Q1 y Q2, la cual se genera por rupturas cosísmicas. La unidad Q3 registra menos vegetación y menos canales activos, debido a que es la unidad de mayor edad de este pulso climático y ha sufrido mayores modificaciones por efectos climáticos.30
- 14 Características de las unidades aluviales Q4, Q5 y Q6. Las unidades aluviales Q4 cuentan con una superficie rugosa conformada por barras y canales marcados. Se caracteriza por un color marrón oscuro y cubierta de vegetación escasa. Q5 presenta una superficie accidentada, donde se registran barras y canales, pero en menor proporción que Q4, la cantidad de vegetación disminuye también. En Q6 la morfología de barras y canales casi desaparece al igual que la vegetación, en Q6 el color de la superficie se torna más oscuro que en Q5 y Q4.31
- 15 Características de las unidades aluviales Q6 y Q7. Q6 presenta un pavimento del desierto desarrollado donde muy levemente se logran distinguir barras y canales que han sido casi borrados por completo, es menos alto en comparación con Q7 y de color marrón claro. Las unidades Q7 se caracterizan por un color marrón oscuro. Es la unidad aluvial más elevada y generalmente se presenta en menor proporción a Q6.32
- 16 Ejemplo de delimitación de paleoescarpes. En la imagen de la izquierda se muestra un abanico aluvial Q6 ubicado al norte del dominio sinforme al norte del Detachment Cañada David, el cual cuenta con rupturas superficiales registradas en su superficie. En la imagen a la derecha se muestran los paleoescarpes identificados por líneas rojas33
- 17 Fotografía aérea de alta definición (11.5 cm/pixel) que muestran el proceso de delimitación de unidades aluviales e identificación de escarpes modernos y paleoescarpes. A) Fotografía aérea 11.6 cm por pixel de resolución. B) Delimitación de unidades aluviales (polígonos blancos), y etiquetado de las mismas conforme a las características geomorfológicas de acuerdo con Spelz (2009). C) Identificación de los escarpes modernos y paleoescarpes que cortan las unidades aluviales de la región (líneas rojas).34
- 18 Fotografía aérea de alta definición (11.5 cm/pixel) que muestra un ejemplo de relaciones cortantes. La relación de corte en este ejemplo es Q5 – Q6. Esto quiere decir, que las superficies aluviales afectadas por escarpes de falla son desde Q5, hasta Q6. Y aunque se presentan edades mas jóvenes que Q5 (la fotografía incluye una secuencia de unidades aluviales desde Q1 hasta Q4), éstas no han sido cortadas por el arreglo. Esto representa que en la región no se han registrado eventos sísmicos modernos. Más bien, los eventos registrados y cartografiados en la cobertura presentada, tienen edades de al menos 12,000 años (edad estimada de Q5).35
- 19 Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (INEGI) que muestra la estructura macroscópica de la falla Cañada David Detachment. La traza de la falla, en color verde, define cuatro

- dominios principales caracterizados por corrugaciones antiformes y sinformes. En los dominios sinformes los escarpes de falla cuaternarios (líneas de color rojo) se alejan del pie de montaña por algunos kilómetros (12 km en el norte, y 3 km en el sur) a diferencia de los dominios antiformes, en donde los escarpes se localizan a pocas decenas de metros del pie de montaña. Simbología: Línea anaranjada = Complejo de falla Laguna Salada. Los puntos amarillos representan la localización de los epicentros de los eventos sísmicos históricos de la región. 37
- 20 Sombreado del Continuo de Elevación Mexicano (15 m) de INEGI de la región del dominio Sinforme Norte. Línea anaranjada es la traza de la falla Laguna Salada dividida en segmentos (FLS1, FLS2 y FLS3). Línea verde= segmentos de traza de la Cañada David Detachment CDD1 segmento abandonado del Detachment y CDD2 en la región del antiforme norte, donde la traza de la falla principal está activa. Línea rosa= Segmentos de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos (CRCH1, CRCH2, CRCH3 y CRCH4 de norte a sur). Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado (CC1, CC2 y CC3). Como se puede apreciar en la figura, la región norte se caracteriza por una estructura sinforme, donde el arreglo de escarpes se aleja del frente de la Sierra El Mayor hasta por 12 km, donde actualmente se desarrolla un nuevo frente de montaña conformado por cuatro segmentos de falla CRCH1, 2, 3 y 4). Este nuevo sistema de fallas se aleja de la traza de falla inactiva (CDD1), por una distancia de hasta 12 km. Al Entre el nuevo arreglo de escarpes y la antigua traza de CDD, se encuentra el sistema de fallas Cerro Colorado (CC1 – CC3). 39
- 21 El segmento CRCH1 se delimita por las estrellas amarillas. El arreglo de escarpes cuaternarios en este segmento se torna ordenado, registrando pocos escarpes muy unidos entre sí, cortando únicamente unidades aluviales holocénicas. El norte del segmento CRCH1 intersecta los escarpes de falla relacionados a la falla Laguna Salada. Esta región se caracteriza por un color rojizo en la litología derivado del registro sedimentario Palm Springs conglomerático. El recuadro blanco indica la unidad aluvial que presenta la complejidad estructural ubicada en el segmento CRCH2, donde la deformación penetrativa se ve reflejada en un arreglo de escarpes en unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) mostrada en la figura 22. Las coordenadas se muestran en Universal Transversal de Mercator (UTM). 46
- 22 Modelo Digital del Terreno (11.5 mpp) de la zona de complejidad estructural ubicada al inicio del segmento CRCH2. Dicha complejidad esta caracterizada por un arreglo de hasta 16 escarpes de falla distribuidos en un ancho de aproximadamente 650 m. En esta región la altura de las superficies pleistocénicas Q6 y Q4 muestran una disminución de su altura relativa en dirección W (de hasta 40 m), en respuesta a la deformación penetrativa del arreglo de escarpes que cortan dichas superficies. Esta deformación se presenta en el bloque de techo de la falla. La línea negra al centro del abanico aluvial Q6 corresponde al perfil topográfico que se muestra bajo la imagen, las cruces en rojo sobre la gráfica del perfil corresponde a cada uno de los escarpes registrados. 47
- 23 Fotografía aérea de alta definición (30 cm/píxel) mostrando la longitud del segmento CRCH2 (un poco más de 3 km), el cual se encuentra delimitado por las estrellas de color amarillo. El arreglo de escarpes comienza de forma desordenada al norte, donde la complejidad estructural se manifiesta como un amplio arreglo de escarpes desordenados que rompen las unidades pleistocénicas presentes en el segmento (Q4 y Q6). Posteriormente, el arreglo se torna sencillo cortando unidades holocénicas (Q1, Q2 y Q3). Por este motivo el arreglo de escarpes que se despliega al sur por 4 km a través de este segmento se relaciona directamente con el evento de 1892. La intermitencia de rupturas superficiales deriva del efecto erosivo por remonte

- ocasionado por los canales activos de las unidades aluviales más jóvenes, los cuales han borrado o recorrido la pendiente generada por la ruptura superficial en dirección de la montaña.....49
- 24 Efecto de erosión remontante sobre los escarpes de falla relacionados con el evento de magnitud $M_w = 7.2$ de 1892. A) secciones transversales que muestran el modelo esquemático del efecto de la erosión remontante. El punto rojo indica la ubicación de la pendiente generada por la ruptura superficial resultado del sismo en los diferentes momentos. Las flechas verdes indican la dirección del movimiento de la pendiente con dirección del frente montañoso. La línea punteada es el indicador del material afectado por la erosión, el cual termina siendo depositado en la región marcada en amarillo, como respuesta a la actividad a lo largo de los canales activos. B) imagen aérea de alta resolución HD (30 cm/pixel) en la cual se aprecia el efecto de la erosión remontante en la región comprendida entre los segmentos de falla CRCH1 y CRCH2. Las flechas de color verde indican el retroceso del nivel base de erosión en dirección del frente de montaña. Este efecto erosivo ha borrado los escarpes originales generados por el evento 1892, recorriendo el nivel base alrededor de 1 km en dirección de la sierra El Mayor.50
- 25 Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp), la cual muestra el Segmento CRCH3 tiene una longitud aproximada de 3.5 km y está delimitado por las estrellas amarillas. En esta región no existe evidencia sísmica Holocénica, las unidades cortadas por el arreglo de escarpes cuaternarios son únicamente pleistocénicas (Q4 y Q6), por esto se considera que esta región esta cargada de esfuerzos diferenciales. En este segmento dicho arreglo se presenta en baja densidad con un estilo de deformación particionada donde tres grupos de escarpes proyectan en la misma dirección con distancias entre sí de ~100 m. El recuadro de color blanco (figura 28) muestra la unidad aluvial Pleistocénica (Q?) que presenta la complejidad estructural en el limite sur del segmento de falla, la cual registra un estilo de deformación penetrativa a diferencia del resto del segmento (ver Figura 28).52
- 26 A) Modelo Digital del Terreno eBee (11.5 cm/pixel) de la zona de complejidad estructural en el limite sur del segmento de falla CRCH3. La deformación penetrativa en esta región repite el mismo patrón que en el norte (i.e., en el limite entre los segmentos CRCH1 y CRCH2, con la salvedad que en esta región se localiza en el bloque de techo del arreglo de fallas). En esta zona, la complejidad estructural esta caracterizada por un conjunto de hasta 9 escarpes sintéticos y alineados a la falla maestra, que producen una disminución progresiva en la altura relativa del abanico aluvial Q6 en dirección de la cuenca Laguna Salada (aproximadamente de 20 m). La línea de color negro representa el perfil topográfico que se muestra en la figura B. B) perfil topográfico a través del abanico aluvial Q6, el cual muestra una disminución progresiva de la elevación a razón de la deformación penetrativa registrada en la región. Las cruces en rojo representan el arreglo de escarpes que componen la deformación penetrativa.....53
- 27 Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp), mostrando la localización y extensión del segmento CRCH4 norte, el cual se delimita por una estrella amarilla al norte y una estrella anaranjada al sur. En la parte norte de CRCH4 se puede apreciar la presencia de escarpes modernos en abanicos aluviales holocénicos (Q3), indicados entre flechas rojas. Los abanicos modernos (Q1 y Q2) al centro de la imagen se puede apreciar que aproximadamente 1 km no se registran escarpes modernos, debido a que en esta región estas unidades han sido afectadas por el proceso de erosión remontante producida por el descenso del nivel base (regiones indicadas por flechas verdes). El recuadro blanco señala la figura 28 que muestra un escarpe holocénico relacionado al

- evento 1934 $M_w = 6.5$. Es posible que dicho escarpe haya sido alterado o borrado por efectos de la erosión remontante.55
- 28 Fotografía aérea de alta definición eBee (11.5 cmpp) mostrando la ruptura superficial asociada con el evento sísmico $ML=6.5$ de 1934. Al centro de la imagen, y delimitado por las flechas de color rojo, se puede observar el escarpe de falla en forma de S invertida. El escarpe es fácilmente apreciable debido al contraste de iluminación generado por la diferencia de altura entre los bloques de techo y de piso localizados hacia la izquierda y derecha de la falla, respectivamente. Al oeste del escarpe entre flechas verdes se puede observar un camino de terracería paralelo al rumbo del escarpe, y otro camino oblicuo más al oeste entre flechas amarillas. Nótese como el bloque de techo, caracterizado por una superficie Q1, parece contar con menos vegetación que el bloque de piso el cual esta definido por una superficie aluvial Q2.....56
- 29 Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que muestra el Segmento CRCH4-S. El segmento CRCH4-S tiene una longitud aproximada de 3.5 km, desde la estrella anaranjada hasta la estrella amarilla. En esta sección el arreglo de escarpes modernos proyecta ordenado y alineado en dirección NW – SE. La ultima sección del segmento (aproximadamente 1.5 km) se torna desordenado y los escarpes comienzan a tomar una distancia de 500 m entre ellos. Una sección del segmento se proyecta al sur cortando principalmente unidades pleistocénicas, aunque se infieren escarpes modernos cortando las unidades aluviales holocénicas. La otra sección del segmento proyecta en dirección SE hasta topar contra el basamento cristalino de la Sierra El Mayor. Los recuadros de color blanco muestran casos donde el arreglo de escarpes modernos y el camino de terracería se unen (revisar la figura 30A y 30B). Líneas verdes: Segmentos de falla del Detachment Cañada David. Líneas rojas: arreglo de escarpes. Líneas blancas: delimitación de unidades aluviales.....57
- 30 Fotografías aéreas de alta definición (11.5 cm/pixel), mostrando como los escarpes relacionados al evento de 1934 en las unidades holocénicas mas jóvenes: Q1, Q2 y Q3 (entre flechas rojas). Las líneas blancas delimitan las unidades aluviales. Flechas amarillas indican el camino de terracería. La figura A muestra escarpes modernos cortando unidades modernas Q1-Q2 (entre flechas rojas). En esta fotografía se puede apreciar la cercanía del arreglo de escarpes con el camino de terracería (entre flechas amarillas). Y en algunas regiones se infiere que el escarpe coincide totalmente con el camino (sección del escarpe entre flechas verdes), dificultando identificar la evidencia del evento sísmico a través de la cartografía geológica. La figura B presenta un arreglo de escarpes modernos en unidades holocénicas y modernas. Aunque el efecto de los canales activos ha borrado parte de la evidencia del evento en las superficies más jóvenes, aun queda registro que permite evidenciar la ruptura superficial. Al igual que la figura A, podemos apreciar el acercamiento del arreglo de escarpes al camino de terracería.58
- 31 Fotografías tomadas en campo mostrando la serie de escarpes modernos asociados con el evento $ML = 6.5$ de 1934. la línea roja delimita el escarpe relacionado al evento de 1934 de $M_w 6.5$ y se estableció exactamente entre el contacto de los bloques que componen la falla. Como se puede apreciar el bloque de piso presenta clastos de mayor tamaño (figura A); a diferencia que en el bloque de techo que está cubierto por material mucho más fino (Figura C). Esto se debe a que el material más fino del bloque de techo se transporta hacia el bloque de piso, en respuesta al efecto erosivo de los canales activos. poca altura de los escarpes permite que la degradación de los mismos sea más rápida; sin embargo en la región se identificaron escarpes con caras libres de ángulos máximos de la pendiente son $\pm 25^\circ$ y una diferencia de altura entre los bloques de 30 cm, conforme a la información tomada en campo (figura B).59

- 32 Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que muestra las relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas) y los escarpes de falla asociados al sismo 1934 $M_L = 6.5$ (flechas de color rojo) a lo largo de la región antiforme norte. Las líneas rojas representan los paleoescarpes que cortan unidades pleistocénicas (Q5 y Qof). Podemos ver evidencia de eventos modernos que rompen las unidades más modernas (Q1) que se encuentran entre las flechas rojas. Se puede apreciar la diferencia de color generada por el contraste en la iluminación de los escarpes sintéticos de falla.....61
- 33 Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiforme, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. En la figura se muestran las relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas) y los escarpes asociados al sismo 1934 (flechas rojas). Las unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) de la región presentan paleoescarpes (líneas rojas). Las unidades holocénicas modernas (Q1) registran escarpes recientes que se encuentran identificados entre los pares de flechas rojas. La traza de los escarpes relacionados con el sismo $M_L = 6.5$ de 1934, se puede observar casi perpendicular a los lechos de los arroyos y cauces modernos.....62
- 34 Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiforme, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas). Las unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) registran paleoescarpes (líneas rojas), mientras que las unidades holocénicas (Q1) presentan escarpes modernos asociados al sismo de 1934. Como se puede apreciar, el flujo de las corrientes de los canales activos que erosionan la superficie son casi paralelos a los escarpes modernos. Aunque los escarpes modernos son más rectos y de menores distancias, además de ser paralelos entre ellos.63
- 35 Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiforme, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales holocénicos (líneas blancas). Los paleoescarpes (líneas rojas) en los abanicos aluviales pleistocénicos (Q4), coinciden con los escarpes modernos (entre flechas rojas) que se registran en las unidades aluviales holocénicas mas jóvenes (Q1). Dichos escarpes son perpendiculares a los canales fabricados por las corrientes activas. Se identifican derivado de la diferencia de coloración y contraste en las fotografías.....64
- 36 Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiforme, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales holocénicos modernos (Q1) y el escarpe moderno asociado al evento 1934 (entre las flechas rojas). En esta zona el escarpe moderno es identificado por el contraste de coloración que provoca la sombra de la pendiente. Este escarpe moderno cortando la unidad holocénica Q1 coincide también con los paleoescarpes (líneas rojas) que se registran en las unidades aluviales pleistocénicas Q5 y Qof que rodean el abanico moderno.65
- 37 Sistema de escarpes Cerro Colorado CC1 (debes mostrar la dirección de buzamiento de las fallas). Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. El segmento CC1 se determinó debido a que la diferencia de litología que se presenta entre sus bloques notoria. El bloque de techo a la izquierda de la falla se puede apreciar una coloración rosada de tonos claros característico de la formación Imperial. El bloque de piso esta compuesto por material de la formación Palm Springs conglomerático, de coloración marrón oscuro. El segmento CC1 parece presentó

- transporte tectónico en dirección NO, y tiene una proyección NE – SW, por aproximadamente 2.5 km, cortando desde Q6 hasta TQps.....67
- 38 Sistema de escarpes Cerro Colorado CC2. Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. El Segmento CC2 corta las superficies aluviales más jóvenes de la región (Q6 y Q7) y el basamento cristalino. CC2 presenta evidencia de un transporte tectónico en dirección al oeste y una proyección N-S con un trazo curvado en dirección de la cuenca sedimentaria Laguna Salada. Es una falla de contacto entre formación Palm Spring Conglomerático en su bloque de piso y Formación Palm Spring en bloque de techo. Esta región presenta un arreglo de paleoescarpes que proyectan paralelos con una distancia entre sí de aproximadamente 250 m.....68
- 39 Sistema de escarpes Cerro Colorado CC3. Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. Línea verde: Cañada David Detachment. A diferencia de los segmentos CC1 y CC2, el segmento CC3 se delimitó considerando el aspecto estructural de la región. En este segmento los bloques comparten la misma litología, pero se presenta un arreglo de escarpes de falla que proyecta de sur a norte por alrededor de 1.5 km (línea continua color negro). Se infiere que la proyección de este segmento de falla desprende desde la región de Monte Blanco, en la Sierra El Mayor (esquina inferior derecha) como un desprendimiento estructural de la falla maestra CDD (línea intermitente color negro) cortando las superficies aluviales desde Q4 hasta TQpsc.....69
- 40 Nuevo límite al sur del la ruptura superficial del sismo 1892. La ruptura del evento sísmico de 1892 que se desplazó por el frente de la sierra Cucapá a través de la falla Laguna Salada para posteriormente curvar a la derecha, rumbo al sur rompiendo los segmentos CRCH1 y 2 de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos. Rockwell (2015) cartografió 58 km de ruptura superficial(línea roja). Derivado del efecto erosivo de los canales activos de las unidades aluviales más jóvenes, se ha borrado importante evidencia de dicha ruptura. El uso de información con alta definición permitió en este estudio permitió determinar el limite real al sur de dicho evento, el cual extiende un aproximado de 5 km más (línea anaranjada). Como se puede apreciar en la macro localización de la ruptura, esta marca la pauta que permite vincular las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos, que terminan por unirse al centro del nuevo frente de montaña. Línea verde= Cañada David Detachment.71
- 41 Evento sísmico de 1934. Línea azul= Propuesta de ruptura superficial determinada por la ruta de escarpes modernos que cortan unidades aluviales holocénicas (Q1,Q2 y Q3). La ruptura de 1934 se estima, tiene una longitud de 30 km. Conforme a lo interpretado, se propone que la ruptura del evento sísmico de 1934 M_L 6.5 propagó de sur a norte comenzando al centro del dominio antiformal sur, terminando en el límite norte del segmento CRCH4. Esto debido a que derivado del evento se generaron al menos 4 fallas desprendimiento en el antiformal norte que brotan desde la falla principal del CDD en dirección NW entre los 4 km. Así mismo se generó un desprendimiento en la región norte de dicho antiformal, que además registró dos pequeños desprendimientos en la misma dirección de no mas de 3 km. Línea verde= Cañada David Detachment. Línea Anaranjada= Falla Laguna Salada. Línea roja = estimación de la ruptura de 1892. Línea amarilla = segmento asísmico.....72
- 42 El segmento CRCH3 (en el recuadro negro) de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos ha sido el único que no ha roto en eventos históricos recientes. Las unidades aluviales afectadas en este segmento son únicamente pleistocénicas (Q6), los eventos registrados en este segmento son pleistocénicos. El evento de 1892 termina justo al norte del segmento CRCH3 y el evento de 1934 termina en el límite sur de dicho

segmento. Ninguno de los eventos ha sido lo suficientemente fuerte como para romperlo. Por esto, consideramos que este segmento está cargado de esfuerzos. Hipotéticamente hablando, se infieren posibles estructuras que rompan la continuidad de la falla CRCH. O bien, que ningún evento ha tenido la suficiente energía para romper esta región. Línea roja= Ruptura del sismo 1892. Línea verde= Cañada David Detachment. Línea Anaranjada= Falla Laguna Salada. 74

- 43 La figura en el recuadro azul muestra la zona de transferencia relacionada a la complejidad estructural norte entre los segmentos al CRCH1 y CRCH2, que pasa de un arreglo de escarpes alineados dando un brinco a la derecha (con una distancia de 500 m) para comenzar con una zona de deformación penetrativa. Ambos segmentos conforman el límite sur de la ruptura de 1892 M_w 7.2. El recuadro en morado muestra la relación entre los segmentos al sur CRCH3 que presenta una complejidad estructural similar que en el segmento CRCH2 en el norte, donde unidades aluviales pleistocénicas presentan deformación penetrativa por un arreglo de escarpes paralelos entre sí que generan una disminución en la altura relativa en el abanico, para posteriormente registrar un salto a la izquierda de 900 m y comenzar el segmento CRCH4, el cual presenta un arreglo ordenado y lineal de escarpes hasta topar de nuevo con la falla CDD, al pie de la Sierra el mayor. Esta zona es el límite del evento de 1934 M_w 6.5. 75
- 44 Delimitación del frente de montaña relictos en la intermediación de la cuenca Cerro Colorado. Podemos ver que el movimiento se ha desarrollado en dos eventos claramente definidos: El primero se registra a aproximadamente 6 km de la CCD en su parte inactiva (CCD1), por el arreglo de fallas que compone el sistema de Cerro Colorado (CC1, 2 y 3). El segundo está definido por el sistema moderno de escarpes que componen los segmentos de la Falla Cañón Rojo – Chupamirtos (CRCH1 al CRCH4), ubicado a 12 km de la traza principal e inactiva de la CDD (CDD1). Líneas negras= segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rosas= Segmentos de falla Cañón Rojo – Chupamirtos, que componen el frente de montaña actual. Línea verde= traza de la falla maestra CDD. Línea anaranjada= Segmentos de falla Laguna Salada. 77

1 Introducción

1.1 Actividad sísmica de la región

En la actualidad la placa Pacífico diverge de la placa de Norteamérica en dirección noroeste a una velocidad de 46 mm/año. La frontera entre las placas Pacífico-Norteamérica se extiende por 2500 km, entre los puntos triples Mendocino al norte y Riviera al Sur (Wei et al. 2011).

El municipio de Mexicali se encuentra justo en la región del dominio estructural del Big Bend, el cual se ubica al centro de la frontera de placas Pacífico-Norteamérica, y se caracteriza por ser un dominio estructural de transición entre el dominio extensional del Golfo y el dominio transpresivo a lo largo de la falla San Andrés. Derivado de los altos esfuerzos normales presentes en la región del Big Bend, la zona se caracteriza por presentar sismos de gran magnitud M_w (Magnitud momento) ≈ 7 (Armstrong et al., 2010; Mueller y Rockwell, 1991).

La actividad sísmica en la región de Mexicali es alta ($M > 7$), pero es muy corto su registro histórico debido a que se encuentra habitada desde hace poco más de 100 años. Durante el paso del tiempo se han ido registrando diferentes números de eventos sísmicos en esta zona: Entre ellos, se encuentran los sismos de 1892 $M_w=7.2$, 1934 $M_L=6.5$ y 2010 $M_w=7.2$ (García et al., 2011).

1.1.1 Evento sísmico 1892

El sismo de $M_w = 7.2$ ocurrido el 23 de febrero de 1892 en el sur de California está bien documentado y fue sentido con gran intensidad (Hough y Elliot, 2004). Con base en los efectos del movimiento ocasionado, Strand (1980) estimó que el evento se originó sobre la Falla Laguna Salada, a través de los escarpes documentados por Barnard (1968). El sismo generó una ruptura superficial de al menos 22 km a través de la falla oblicua-dextral Laguna Salada, para luego curvar en 100° en la intersección con la falla lateral noreste Cañón Rojo, generando un desplazamiento dextral de 4 m y 3.5 m de movimiento normal (Dorsey y Martín-Barajas, 1999; Mueller y Rockwell, 1995). Mueller y Rockwell (1995) realizaron un análisis geomorfológico de la zona, considerando las relaciones cortantes entre los depósitos aluviales cuaternarios y las rupturas superficiales al pie de montaña de la Sierra El Mayor.

Rockwell et al., (2015) realizaron una investigación en campo sobre un arreglo de escarpes de edad Holocénica registrados a través de la falla Laguna Salada (LS), y en la falla Cañón Rojo (FCR). Las unidades aluviales más jóvenes (Q2, de edad < 150 años) registran escarpes relacionados a rupturas superficiales. Por este motivo, dichos escarpes se relacionan al sismo $M_w = 7.2$ de 1892. Como resultado, se estimó que el evento generó una ruptura superficial de ~58 km, dos veces más grande que las estimaciones previas. El evento registró un deslizamiento oblicuo con una relación muy cercana a 1:1. A partir de este estudio, se determinó que el sismo tuvo una M_w entre 7.1 y 7.3. Derivado del análisis desarrollado por Rockwell et al., (2015) se estimó un periodo de recurrencia de 1-2 mil años, y tasas de movimiento lateral de 4 mm/año y de deslizamiento normal de 7 mm/año a través de la Sierra Cucapah.

1.1.2 Evento sísmico 1934

El sismo ocurrido entre la frontera entre México y Estados Unidos el 30 de diciembre de 1934 tuvo una $M_L = 6.5$ y seis réplicas de 4.5. El epicentro fue ubicado por Caltech (California Institute of Technology) aproximadamente a 10 km del Río Hardy. Posteriormente, fue relocalizado por Leeds (1979) dentro de la región de Laguna Salada, estimando que produjo cantidades similares de movimiento normal y de cizalla que el sismo de 1892, considerando que el sismo tuvo una magnitud aproximada a los 7.8; sin embargo, el primer movimiento de 1934 no parece ser consistente con el evento de 1892. El mecanismo focal determinado por Doser (1994) para el evento de 1934, indica cizalla pura lateral derecha, en un plano de deslizamiento noroeste. Un mecanismo focal similar al evento de 1934 fue el de diciembre 21 en el evento Cerro Prieto, sugiriendo que la M_w fue de 6.5.

1.1.3 Evento sísmico 2010

El 4 de abril del 2010 se registró un sismo de $M_w = 7.2$, con epicentro en el valle de Mexicali, a una profundidad entre 6 - 10 km generando una ruptura en superficie que se desplazó a lo largo de la falla LS (Meneses, 2010). El evento produjo gran cantidad de réplicas sísmicas que fueron registradas por estaciones de la Red de Acelerógrafos del Norte de México (RANM) del CICESE, a distancias que van desde 10 hasta 140 km (Munguía, Navarro y Valdez, 2010).

El sismo ocurrió en la porción más al sur del Big Bend de la falla San Andrés (figura 3), zona que se caracteriza por presentar alta actividad sísmica originada por los elevados esfuerzos normales a los que está sometida la región. Es por esto que el sismo del 2010 representa el evento que ha liberado la mayor cantidad de energía, produciendo una de las rupturas en superficie más complejas en el margen

de placas Pacífico – Norteamérica desde el evento de 1892. El desplazamiento dextral-normal fue en promedio 2 m, aunque al noroeste de la ruptura, donde la falla se torna mayormente inclinada en la Sierra Cucapah, se registró el máximo desplazamiento de alrededor de 4 m (Fletcher et al., 2014; Gold et al., 2013).

Además, éste evento causó un efecto cascada a través de 120 km de longitud en la Sierra Cucapah, ubicada entre el Golfo de California y la frontera México - E. U. A., en un arreglo imbricado compuesto por al menos 7 fallas de sentido dextral-normal, generando una amplia deformación en superficie con un azimut de 315° (Hinojosa et al., 2010; Fletcher et al., 2014). El epicentro se ubicó en el límite sureste de la Sierra Cucapah, generando una ruptura que desplazó lechos rocosos, superficies fluviales y aluviales en dos direcciones: al noroeste el sistema de fallas rompió una extensión aproximada a los 50 km a través de las Sierras El Mayor y Cucapah, mientras que al sureste, la ruptura se propagó por 53 km a través del delta del Río Colorado (Wei et al., 2011; Gold et al., 2013; Fletcher et al., 2014; Terán et al., 2015).

El sismo $M_w = 7.2$ fue sentido en el noreste de México y en el sur de California, a más de 400 km del epicentro. Su efecto causó graves daños a la población, principalmente en las áreas agrícolas del valle de Mexicali. En la Ciudad se presentaron daños estructurales significativos causados por fracturación y licuefacción del suelo, provocando la muerte a dos personas y cerca de cien lesionados (Jaimes, 2010). Los daños reportados fueron menores a los que podrían haberse esperado debido a su magnitud (Fregoso-Becerra, 2010; Wei et al., 2011). La figura 1 muestra los epicentros de los sismos históricos registrados en la región de la Laguna Salada (1892 $M_w = 7.2$, 1934 $M_L = 6.5$ y 2010 $M_w = 7.2$).

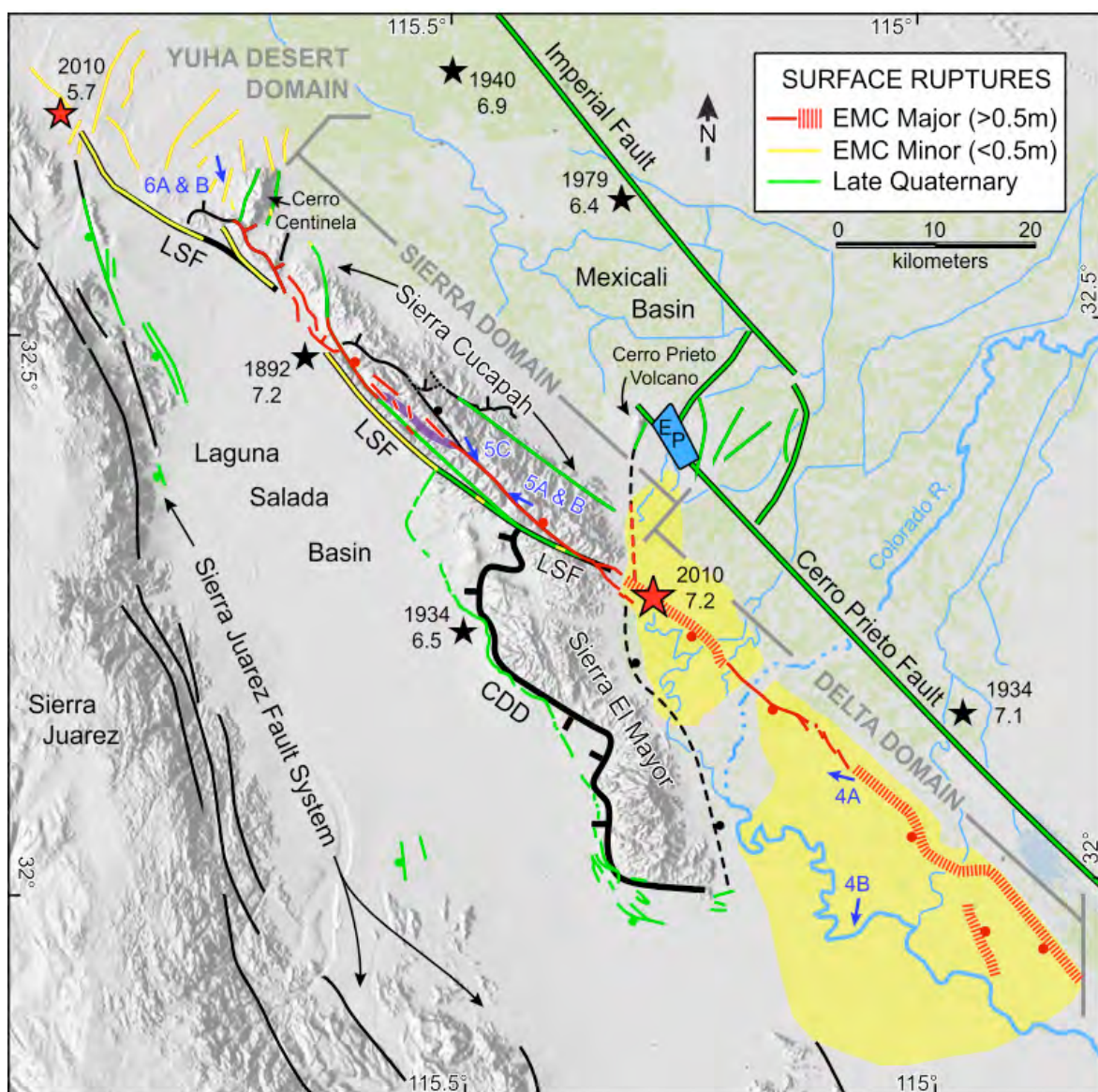


Figura 1. Rupturas principales y eventos sísmicos históricos. La figura muestra los datos gráficos de los sismos históricos de la región de la Laguna Salada: rupturas superficiales, ubicación de epicentros y magnitudes determinadas. La línea roja representa la ruptura relacionada con el sismo del 2010. La estrella roja representa el epicentro del sismo 2010. La línea roja hace referencia a la ruptura, la cual recorre alrededor de los 50 km en dirección de la frontera con U.S.A. a través de la Sierra Cucapah. La línea roja intermitente señala 53 km de ruptura en superficie ubicada dentro del delta del Río Colorado. Estrellas en color negro indican los epicentros de los eventos históricos 1892 ($M_w = 7.2$) y 1934 ($M_L = 6.5$). Líneas verdes: arreglo de escarpes relacionados a la falla de bajo ángulo Cañada David Detachment. línea amarilla con negro= falla Laguna Salada. Figura tomada de Fletcher et al., 2014.

1.2 Fallamiento normal de bajo ángulo

Las fallas normales de bajo ángulo (FNBA) son unas de las estructuras geológicas menos comprendidas; ya que a pesar de ser ampliamente reconocidas, aún quedan dudas de la mecánica de su

formación y evolución tectónica. No ha quedado claro si inician con un ángulo bajo o si comenzaron con un alto ángulo y este ha ido disminuyendo conforme evoluciona la tectónica regional a la que se exponen.

La relación que tienen las FNBA con los procesos sismológicos también es altamente cuestionada. Se piensa que las FNBA pueden desplazarse asísmicamente, aunque algunos ejemplos a nivel mundial (al menos ocho posibles ejemplares) han dejado registro de paleosismicidad que se han asociado a sismos históricos de gran magnitud, de los cuales, como mínimo 6 de ellos buzaban en no más de 35°: Dixie Valley, Nevada en 1954 generó una ruptura en superficie de aproximadamente 100 km; en Aleshir, Turkía 1969, una falla que buza entre los 32° a 34° rompió 35 km de superficie; Gediz, Turkía (1970) el sismo generó una ruptura de 45 km de longitud. Donde la falla principal presenta un buzamiento de 35° y las estructuras secundarias muestran inclinaciones de 20° y 25°; Irpinam, Italia (1980) un sismo gran magnitud rompió 38 km (Axen, 1999; Boncio et al., 2000).

Por lo antes mencionado, dos de los principales objetivos de estudio de dichas fallas son: 1) la factibilidad mecánico-geológica de la generación de una falla normal con una inclinación menor a 30° (Westaway, 1999) y 2) el efecto sísmico derivado del fallamiento normal de bajo ángulo, ya que la sismicidad que puede ser directamente relacionados a las FNBA soy muy raros (Fletcher y Spelz, 2009).

Wernicke (1995) propone que las fallas normales de bajo ángulo cubren una superficie más extensa que las de alto ángulo; por lo tanto, los terremotos relacionados a estas fallas deben ser de mayor magnitud, pero menos frecuentes que los generados por fallas más inclinadas. Westaway (1999) sugiere que un esfuerzo de cizalla de este tipo, puede desarrollarse debido a la combinación de efectos de flujo de calor en el interior de la corteza (cizallamiento de tracción horizontal en la base de la capa frágil), y de carga (cizallamiento en el plano vertical), asociados a la respuesta isostática de la zona al desarrollarse una falla de bajo ángulo conforme el modelo del *Rolling Hinge*. En los continentes, esto puede suceder cuando la litósfera es delgada y está desacoplada de la astenósfera que se encuentra en contacto con el manto. Esto quiere decir que las fallas normales comienzan con ángulos altos, y en áreas de litósfera muy delgada, por compensación isostática, se desplazan, se acomodan y se inclinan lo suficiente como para producir fallas de bajo ángulo (Buck, 1991).

Según Brady et al., (2000) las FNBA se desarrollan en un sistema integrado por fallas normales de alto ángulo de diferentes generaciones. En Este proceso de rotación tipo dominó, los bloques rotan y se desplazan como fichas de juego hasta alcanzar una cierta extensión crítica, después de la cual el modelo

se hace mecánicamente desfavorable debido a que el rozamiento de planos de falla aumenta su inclinación, ocasionando que las fallas normales de alto ángulo más antiguas se inclinen hasta lograr ángulos bajos. Para que la extensión continúe, es preciso que se desarrolle una nueva serie de fallas jóvenes más verticales, que comienzan a rotar hasta llegar de nuevo al punto de extensión crítica para este conjunto de fallas. Esta mecánica se repetirá hasta lograr una FNBA más joven y el ciclo se repita (Figura 2A). Las FNBA se atribuyen también a la rotación de fallas originalmente muy inclinadas, que responden con una flexión hacia arriba como resultado de la liberación de la superficie del bloque de piso, posterior al abandono del bloque de techo, lo cual disminuye el ángulo de inclinación de la falla. Este mecanismo es explicado por el modelo *Rolling Hinge*, el cual plantea que una superficie de falla normal consiste en una pendiente activa, donde el bloque de piso tiende a rebotar isostáticamente formando una protuberancia antiformal que migra en dirección del transporte tectónico, siguiendo el desplazamiento de la placa superior. La mayor actividad de deslizamiento se registra en el segmento de alto ángulo, que constituye el borde de la protuberancia antiformal donde se van registrando segmentos de la falla maestra, que van girando en ángulos poco inclinados y se van abandonando progresivamente (Figura 2B). Otros pueden describirse como resultado de la combinación de los dos ejemplos anteriores (Figura 2C). Algunos otros no se pueden explicar por ninguno de estos mecanismos y probablemente iniciaron su deslizamiento con bajos ángulos (Buck, 1991), (Wernicke y Axen, 1988).

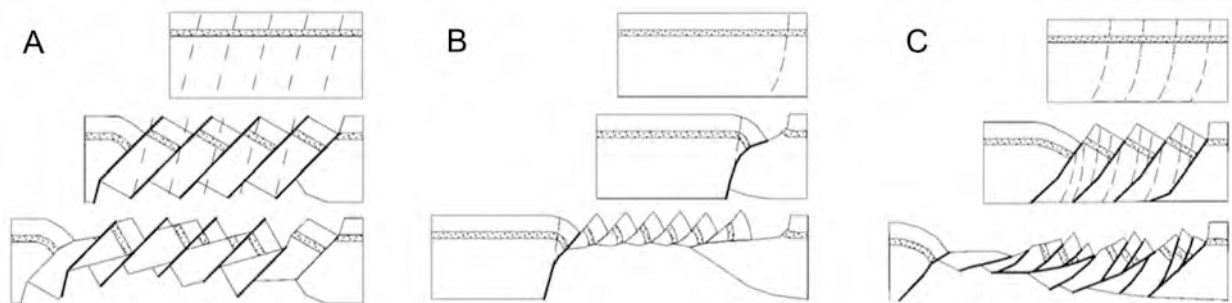


Figura 2. Secciones transversales esquemáticas de la corteza superior que muestra los dos modelos de evolución de una falla normal a una falla de bajo ángulo. Fallas por formarse se muestran con líneas discontinuas, fallas activas se muestran con líneas negras gruesas, y las fallas inactivas se muestran como líneas negras delgadas. (A) Modelo de rotación estilo dominó, donde la generación de fallas de alto ángulo más antiguas va rotando hasta lograr una extensión tan crítica, derivado de un ángulo de inclinación tan bajo que se vuelve desfavorable al fallamiento. Esto ocasiona que se forme un nuevo grupo de fallas de alto ángulo y este proceso se repita. (B) El modelo *Rolling Hinge* presenta el rebote isostático en dirección del transporte tectónico del bloque de piso, ocasionado por el abandono del bloque de techo. Generando que el ángulo de inclinación de la falla disminuya críticamente. (C) Modelo combinado, este modelo es una mezcla de los dos mecanismos anteriores (Brady y Wernicke, 2000).

1.3 Hipótesis y Objetivos

1.3.1 Hipótesis

Aunque las fallas normales de bajo ángulo son sub-óptimamente orientadas y sismos asociados con ellas son muy escasos, se propone que el comportamiento sísmico de la falla Cañada David Detachment (CDD) es similar a una falla óptimamente orientada en términos de características claves tales como longitud de ruptura en superficie, magnitud de desplazamiento e intervalos de recurrencia.

1.3.2 Objetivo General

Determinar el comportamiento sismogénico de la falla normal de bajo ángulo CDD.

1.3.3 Objetivos particulares

- a) Realizar una cobertura fotográfica de alta resolución a lo largo del frente oeste de la Sierra El Mayor en su sección norte.
- b) Caracterizar las superficies de los abanicos aluviales cuaternarios asociados a los sistemas de drenaje en el pie de montaña.
- c) Clasificar secuencias y edades de los Paleoescarpes dentro de la zona de interés.
- d) Integrar un Sistema de Información Geográfica (SIG) de las características geomorfológicas de abanicos aluviales y escarpes vinculados a la CDD.
- e) Realizar un análisis geomorfológico y paleosísmico para estimar el comportamiento sismogénico de las fallas geológicas del área de estudio.
- f) Formalizar intervalos de recurrencia, magnitud de sismos previos y la distribución y relación de rupturas superficiales relacionadas.

2 Marco geotectónico de Baja California Norte

El Big Bend está ubicado en el dominio transicional central de la frontera entre las placas Pacífico – Norteamérica. Estructuralmente, se describe como un prominente escalonamiento curvado al sur de la falla San Andrés, que se caracteriza por su alta actividad sísmica, registrando sismos de gran magnitud debido a lo elevado de los esfuerzos normales de la región (Figura 3). En la región sur se genera un cambio estructural entre el dominio extensional del Golfo de Baja California y el dominio transpresivo de la falla San Andrés. Por esto, en esta región se presentan sismos de $M_w \geq 7$ (Fletcher et al., 2014). El sur del Big Bend conecta con un arreglo de fallas en forma de abanico, integrado por diferentes sistemas ubicados al norte de la provincia extensional del Golfo de California (Hernández-Flores, 2015)

La península de Baja California forma parte de la placa Pacífico, la cual se desplaza hacia el NW con respecto a la placa Norteamericana a una velocidad de 46 mm/año, generando una frontera de placas que conforma un conjunto de fallas tectónicas de diferentes orientaciones, las cuales producen deformación particionada en la región (Axen y Fletcher, 1998). En la parte norte de Baja California, el deslizamiento entre las placas se manifiesta en una zona de actividad tectónica que genera sismos de gran magnitud ($M_w = 7$) conocida como: la zona de cizalla del sur de California, la cual está conformada por una microplaca rodeada por un sistema de fallas dextrales que ocupan el borde continental californiano y están rotando en sentido anti-horario. Debido a esto, Baja California se ve afectada por fallas dextrales con orientación N 30° W, N 40° W y N 70° W asociadas al sistema de fallas de San Andrés – Golfo de California (Cruz-Castillo, 2002).

Spelz (2008) describe el sistema de fallas del norte de Baja California con 4 principales dominios estructurales: al noreste se ubica el sistema Imperial - Cerro Prieto (SI –CP), compuesto por fallas de cizalla lateral derecha, separadas por un salto a la izquierda, generando un pull-apart magmático activo con alta actividad sísmica en las cercanías del volcán Cerro Prieto. Al oeste del SI –CP, se encuentra el sistema Laguna Salada – Cañada David Detachment (LS-CDD), el cual está conformado por la falla activa normal-dextral y de alto ángulo (60°) LS, integrada por varias rupturas, que aunque son de sentido variado, en conjunto forman un escarpe principal que buza en dirección SE, y tiene un rumbo NW; y la falla normal de bajo ángulo CDD (20°). La CDD tiene una longitud de 60 km que se extiende en forma de escarpes de falla a través del margen oeste de la Sierra El Mayor en la región de la Laguna Salada. Este sistema de fallas controla la subsidencia y delimitan la margen Noreste de la cuenca sedimentaria Laguna Salada, así como el levantamiento de las Sierras Cucapah y El Mayor, respectivamente (Hernández-

Flores, 2015). Al oeste de LS – CDD se encuentra San Pedro Mártir y la zona de falla de Sierra Juárez (SPM – SJ). Las fallas SPM y SJ definen el escarpe principal del golfo. Al SW de la LS y CDD, se ubica la falla Agua Blanca (FAB), que cuenta con una longitud de aproximadamente 130 km con un rumbo N 72° W, siendo la falla más antigua en el norte de Baja California y delimitando el sur del Big Bend (Cruz-Castillo, 2002) (Figura 4).

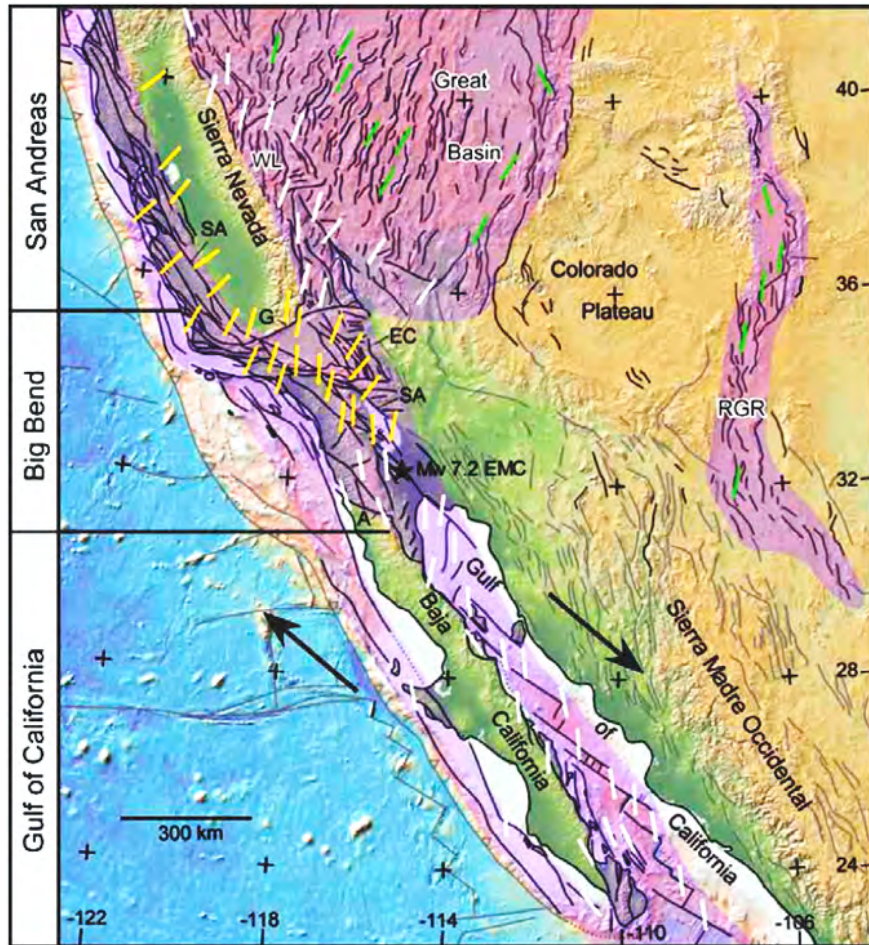


Figura 3. Regiones geotectónicas que forman la frontera de placas Pacífico-Norteamérica. De sur a norte: El dominio Golfo de California caracterizado por transtensión. El dominio del Big Bend caracterizado por ser una zona transicional. El dominio de San Andrés que se caracteriza por transpresión. Las flechas negras indican el movimiento relativo de las placas Pacífico-Norteamérica (tomada de Hernández-Flores, 2015).

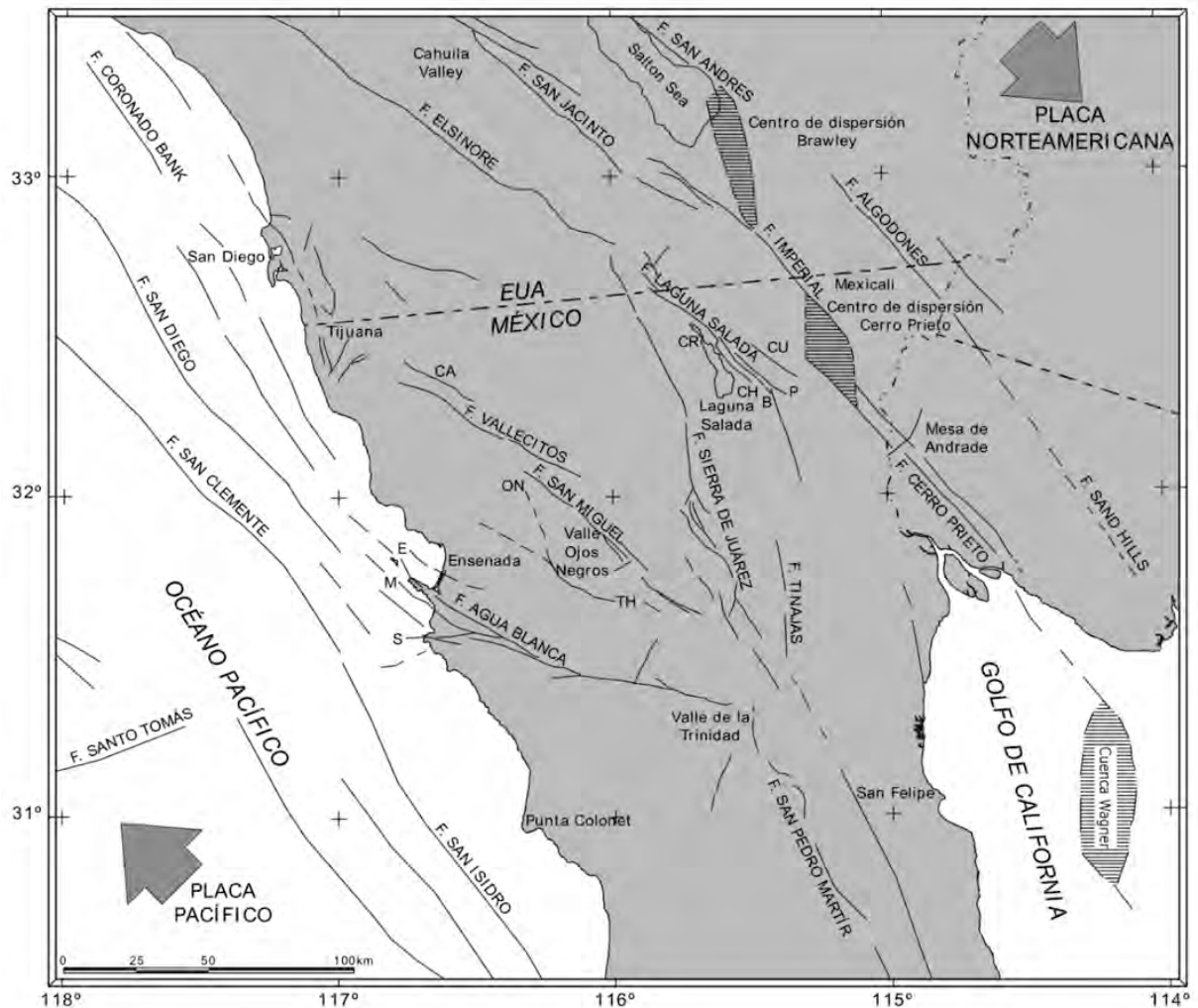


Figura 4. Fallas regionales del norte de Baja California. las líneas continuas son fallas bien localizadas y las líneas discontinuas son fallas interpretadas. B=Falla Borrego, CA=Falla Calabazas, CH=Falla Chupamirtos, CP=centro de dispersión Cerro Prieto, CR=Falla Cañón Rojo, CU=Falla Cucapah, CW=Cuenca Wagner, E=Falla El Descanso-Estero, M=Falla Maximinos, ON=Falla Ojos Negros, P=Falla Pescaderos, S=Falla Bahía Soledad, SS=Salton Sea y TH=Falla Tres Hermanas. (Imagen tomada de Cruz-Castillo, 2002 y modificada Spelz, 2008).

2.1 Cuenca Laguna Salada

La cuenca Laguna Salada se ubica al noroeste de México, entre las Sierras Juárez, Cucapah y El Mayor. Es una cuenca sedimentaria transtensional que estructuralmente se describe como un medio graben asimétrico y activo de sismicidad abundante, con mayor subsidencia a lo largo de su margen oriental. La cuenca Laguna Salada resulta de la extensión asociada a la apertura del Golfo de California y el desplazamiento NW de la Península de Baja California a lo largo de la falla de San Andrés FSA. Su subsidencia está controlada por dos grandes fallas: FLS (60°), y CDD (20°). En conjunto, éstas fallas componen el margen noreste de la cuenca, y han acomodado más de 10 km de extensión E – W, desde el

Mioceno medio-tardío hasta la actualidad (Fletcher y Spelz, 2009; Dorsey y Martín-Barajas, 1999; y Contreras et al., 2005; Chavez et al., 2000).).

La región de la cuenca Laguna Salada se puede dividir en tres dominios geológicos dominantes: 1) la cuenca sedimentaria, que inició su formación a partir del levantamiento de la Sierra Cucapah durante el pleistoceno, formando un depocentro alargado con orientación NW - SE relleno de abanicos aluviales y sedimentos lacustres transportados por el río Colorado y por arroyos de las sierras adyacentes; 2) la Sierra Juárez, ubicada al oeste de la cuenca, donde predominan las fallas de alto ángulo sin actividad sísmica activa, y los flujos volcánicos que se superponen a las rocas graníticas de la Sierra de la Tinaja, ubicada al suroeste de la Sierra Juárez y 3) al noreste se ubican las Sierras El Mayor y Cucapah, compuestas por un sistema montañoso rugoso, internamente cortado por fallas de alto y bajo ángulo. Ambas integran un rasgo topográfico prominente que contrasta con las cuencas sedimentarias de nivel inferior al del mar que las rodean (Laguna Salada y Valle de Mexicali).

Al occidente de la Sierra El Mayor se ubica la falla CDD, la cual se extiende por más de 50 km a lo largo de la cordillera oeste de la Sierra El Mayor. En esta región los efectos erosivos y deposicionales del Río Colorado han formado el límite de la cuenca (Axen y Fletcher, 1998; Fletcher y Spelz, 2009; Spelz et al., 2008; Chavez et al., 2000; Dorsey y Martín-Barajas, 1999; Armstrong, 2010; Fletcher y Spelz, 2009 y Hernández-Flores, 2015).

2.2 Litología

La formación de la geometría de medio *graben* de la cuenca Laguna Salada deriva del levantamiento de la Sierra Cucapah. Como respuesta al levantamiento y a la interacción de los factores ambientales que interactúan en la región, se desarrolla la sedimentación de la cuenca, que comenzó durante el Pleistoceno y sigue activa hasta la actualidad, registrando sensibles cambios estratigráficos que se relacionan con los ciclos de Milankovitch (Contreras et al., 2005). Conforme a lo descrito por Spelz (2008), la clasificación litológica de la cuenca Laguna Salada se puede dividir en dos grupos principales:

El primer grupo se constituye por las unidades pre-tectónicas, y este grupo considera a las rocas que existían antes del fallamiento: rocas metamórficas polideformadas y prebatolíticas mesozoicas del basamento cristalino; rocas volcánicas del Terciario medio-tardío al norte de la Sierra Cucapah; y diques basáltico-andesíticos que se encuentran en algunas regiones de la Sierra El Mayor.

El segundo grupo se compone por la litología post-tectónica, que considera la cubierta sedimentaria registrada posterior a los eventos de fallamiento. Las unidades post-tectónicas se componen de sedimentos marinos y deltaicos provenientes del Río Colorado, principalmente de la Formación Imperial y la Formación Palm Spring, que fueron acumulados durante eventos glaciares e interglaciares. En las temporadas globales cálidas la Laguna recibió materiales directamente del Río Colorado y durante los ventos fríos, la laguna se rellenó por fuentes locales debido a que el nivel del mar disminuyó, generando que el alto Golfo provocará una progradación directa al mar del Río Colorado (Contreras et al., 2005).

Los sedimentos de la Formación Imperial (Tim), representan la secuencia sedimentaria más antigua depositada durante el Plioceno temprano. El contacto de la Formación Imperial con el basamento cristalino es meramente por fallas y se divide en tres categorías: Tim1 Inferior, el cual se caracteriza por una facie conglomerática constituida por depósitos generados por flujos provenientes de las sierras; Tim2 Intermedio, conformado por lodolitas y lutitas que gradan secuencia arriba y son depositados en plataformas continentales de ambiente marino y Tim3, que se define por una composición de areniscas y lodotitas (Spelz, 2008). De acuerdo a Dorsey y Martín-Barajas (1999) la Formación Palm Spring se compone por arenisca, limolita, lutita y arcillas en cantidades similares que fueron acumulados por sistemas deposicionales no marinos. Esta secuencia refleja la progradación del delta del Río Colorado y el cambio en las condiciones marinas a no marinas durante el Plioceno superior.

Los depósitos conglomeráticos aluviales de edad Plio-Pleistoceno (Tcgl), según lo mencionado por Martín-Barajas et al.(2001) en Spelz (2008) son depósitos de abanicos aluviales de alto gradiente provenientes de la Sierra Cucapah. Las pendientes grises conformadas por Tcgl muestran una concentración uniforme de tonalitas de 40 a 100 cm de diámetro.

Depósitos sedimentarios aluviales más jóvenes (Cuaternario) son los derivados de las Sierras El Mayor y Cucapah. Estas unidades se acompañan de areniscas conglomeráticas cuarzograníticas de grano medio – fino, compuestas por tonalitas derivadas de la Sierra Cucapah, depositadas por capas de lodos en la parte baja de los abanicos aluviales. El norte de la Sierra El Mayor consiste principalmente de areniscas pobremente cementadas, con alto contenido de cuarzo al cual Martín-Barajas et al., (2001) llamaron “Secuencia de lechos rojos Cañón Rojo”. La Figura 5 muestra la distribución litológica a través de la falla CDD al frente de la Sierra El Mayor.

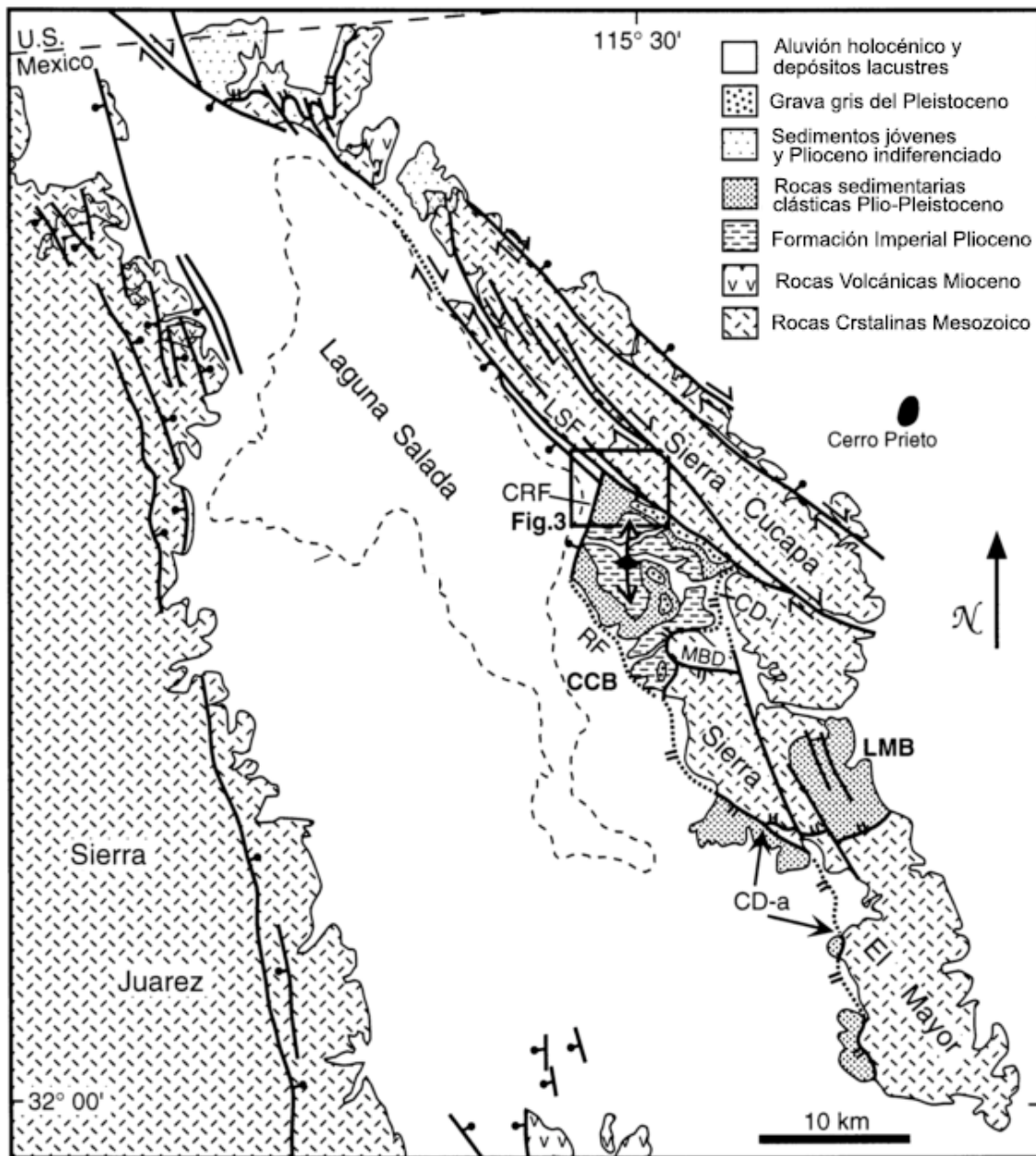


Figura 5. Mapa geológico simple de la cuenca sedimentaria Laguna Salada donde se muestran las fallas principales y secuencias sedimentarias. CDa= Porción activa de Cañada David Detachment, CDi= Porción inactiva del Cañada David Detachment, CRF= Falla Cañón Rojo, LSF= Falla Laguna Salada, MBD= Monte Blanco Detachment, RF= Falla Frente de Montaña (Range Front) escarpes a través de la continuación de la CDD. (Imagen tomada de Dorsey y Martín-Barajas, 1999).

En la región noreste de la cuenca Laguna Salada, justo donde intersectan las Sierras El Mayor y Cucapah, se encuentra la cuenca Cerro Colorado (CC), la cual se integra por rocas sedimentarias del Plioceno – Pleistoceno que cubren la parte inactiva del CDD, al NE de la Laguna Salada. La sedimentación en la región de CC deriva de la subsidencia producida por las fallas CDD y Monte Blanco Detachment (MBD), que ocasiona el levantamiento de la Sierras El Mayor y Cucapah. En esta región de la Laguna

Salada se ubica la parte inactiva de la falla CDD, y el bloque de piso se compone de brechas submarinas y areniscas, en la parte baja de la Formación Imperial, cerca de la falla CDD; esto indica que la falla estuvo activa desde el Plioceno hasta el Pleistoceno medio (Dorsey y Martín-Barajas, 1999).

La zona norte de la falla CDD se ha visto afectada por un evento sísmico de $M_w = 7.2$, registrado en 1892. El evento rompió la falla Laguna Salada frente a la Sierra Cucapah y el extremo norte de la falla Cañón Rojo. Este evento marcó una pauta en la subsidencia y la sedimentación de la cuenca CC, donde el registro estratigráfico revela subsidencia: 900 m de limo y arenas finas y medias producidas por deposición lacustre, y lodos del río Colorado, sobre 800 m de areniscas y conglomerados de basamento granítico, que se posa sobre 700 m de arenisca cuarzosa roja-beige, derivadas de la formación Palm Springs (Dorsey y Martín-Barajas, 1999).

2.3 Fallas en la cuenca Laguna Salada

El margen noreste de la cuenca Laguna Salada es integrado por un arreglo tectónico extensional, dominado por extensión E - W, ocasionado por la FNBA (CDD) desde el Pleistoceno hasta la actualidad. La relación de movimiento de la CDD ha sido de 1:1 los últimos 50 mil años, con un promedio de 3mm/año para cada uno de los componentes, normal y lateral. El periodo de recurrencia sísmica de la CDD está estimada en mil años (Dorsey y Martín-Barajas, 1999).

La región norte de la Sierra El Mayor está conformada por un arreglo de fallas activas e inactivas (figura 6). La parte inactiva se compone por una falla curvada entre el basamento cristalino de la Sierra el Mayor en el bloque de piso, y rocas sedimentarias del Plioceno - Pleistoceno provenientes del río Colorado compuestas por brechas submarinas y areniscas en su bloque de techo, indicando así que la falla estuvo activa desde el Plioceno hasta el Pleistoceno medio. La parte activa de la falla CDD está integrada por un arreglo de abundantes escarpes cuaternarios, desarrollados durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Este nuevo arreglo de escarpes se ubica en el margen noreste de la cuenca moderna Laguna Salada, al noroeste de la Sierra El Mayor (aproximadamente a 10 km). Al norte, los escarpes intersectan con el pie de Sierra Cucapah y proyectan hasta la parte inactiva de la falla CDD en el frente de la Sierra El Mayor, en la región del Domo Monte Blanco. Este nuevo arreglo de escarpes deriva del fallamiento tipo *Detachment* (29°) según lo descrito por Dorsey y Martín Barajas (1999).

2.3.1 Cañada David Detachment (CDD)

La falla de bajo ángulo CDD está integrada por un arreglo de escarpes de diferentes orientaciones, que forma una traza curvada compuesta por dos pliegues antiformes y dos pliegues sinformes a través de 60 km de longitud, al frente noreste de la Sierra El Mayor. Tiene un buzamiento aproximado a los 20° y ha acomodado 12 km de extensión horizontal en dirección E-W durante los últimos 12 Ma (Axen y Fletcher, 1998; Axen et al., 2000; Spelz et al., 2008; Hernández-Flores, 2015).

En un análisis de las relaciones cortantes derivado del mapeo de los escarpes a lo largo del frente de la Sierra El Mayor realizado por Axen et al. (1999), se establece que dicho arreglo está ligado a una falla poco inclinada ubicada a poca profundidad (<200-300 m). En el mismo estudio se analizaron 15 perfiles topográficos de escarpes en la región norte, los cuales permitieron determinar que la relación del movimiento vertical neto es ~ 2 m, consistente con el fallamiento de bajo ángulo ($\sim 30^\circ$). Posteriormente, Axen et al., (2000) realizaron un estudio de la evolución termal en la región del Domo Monte Blanco en la Sierra El Mayor (la región del Domo Monte Blanco está indicada en la figura 6), donde analizaron las variaciones térmicas a través del tiempo (entre el Eoceno y el Neógeno), registradas en las rocas del bloque de piso de la falla CDD. El resultado del análisis sugiere que la CDD ha registrado de 5 - 7 km de extensión vertical y 10 - 12 km de extensión horizontal, para lograr descubrir las muestras adquiridas con edades de 2 Ma.

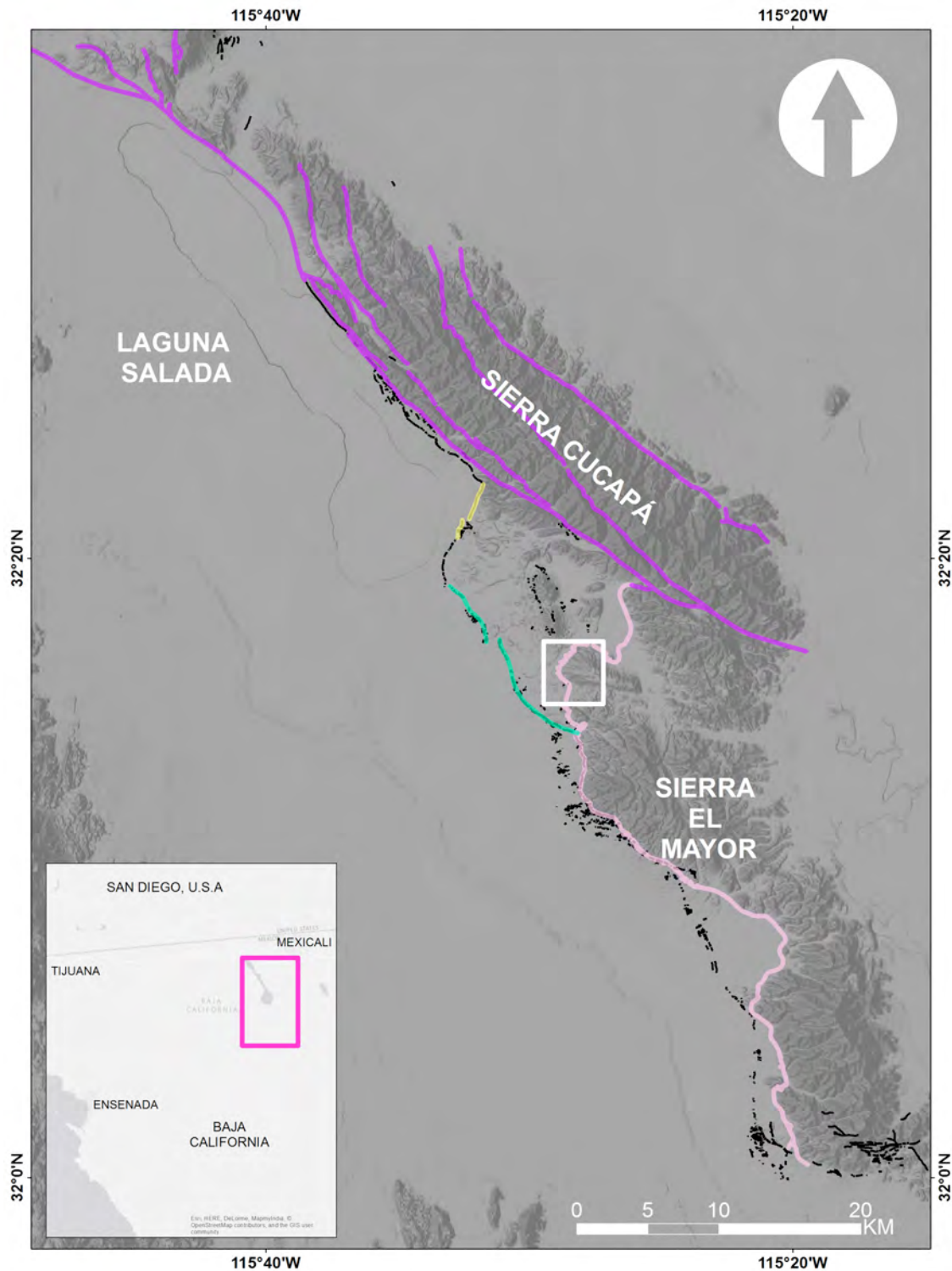


Figura 6. Sistema de fallas que dominan el movimiento tectónico de la cuenca Laguna Salada. Líneas moradas.- sistema de fallas Laguna Salada, la cual tiene 57 km de longitud de rumbo N 50 W y un buzamiento entre 55° - 70° con dirección al suroeste. Línea amarilla.- falla Cañón Rojo (FCR) con buzamiento 55° a 60°, un rumbo N30 - 35E y un desplazamiento normal dirección NW. Línea verde.- Falla Chupamirtos (FCH) se estima un buzamiento de 65°. Línea rosa.- La falla Cañada David Detachment (CDD) de longitud aproximada de 60 km al frente de la Sierra El Mayor, buza en un ángulo aproximado a 30°. Líneas negras.- arreglo de escarpes Cuaternarios. El recuadro blanco delimita la región del Domo Monte Blanco.

Spelz et al., (2008) realizaron una caracterización y clasificación geomorfológica de las superficies de los abanicos aluviales al frente la Sierra El Mayor. Para la determinación de las unidades aluviales se consideraron factores identificables a través del uso de fotografías aéreas: el grado de conservación de la geomorfología de las barras y canales, desarrollo de barniz en las rocas, grado de intemperismo y coloración de las mismas, altura relativa entre unidades y la cantidad de vegetación. Spelz-Madero (2008) logró identificar 8 tipos de abanicos aluviales cuaternarios de diferentes edades que van desde los 204 Ka siendo las unidades más antiguas y no más de 200 años la unidad más joven.

Fletcher y Spelz (2009) estudiaron las relaciones cortantes entre las unidades aluviales clasificadas por Spelz-Madero (2008) y los paleoescarpes que las cortan, con el fin de entender la mecánica estructural de la falla de bajo ángulo CDD. Identificando que existe una migración del bloque de techo en dirección a la cuenca Laguna Salada (E-W), la cual es fácil identificar en dominios de sinformes donde la distancia tomada entre el arreglo de escarpes y el pie de la Sierra el mayor es de 10 km en el norte y 3.5 en el sur.

2.3.2 Falla Laguna Salada (FLS)

La FLS está ubicada al margen oriente de la Sierra Cucapá, en el noreste de la cuenca Laguna Salada, definiendo el límite NE entre estas dos entidades geológicas. Tiene un rumbo N 50° W y un buzamiento subvertical que varía entre los 55° y los 70° con dirección al suroeste. FLS está compuesta por tres segmentos de fallas normales dextrales subparalelas y de diferentes orientaciones que se distribuyen a través de 57 km de longitud, los cuales varían principalmente en su topografía y las composiciones litológicas del bloque de techo. El segmento norte de la falla proyecta desde la cuenca hasta la intersección con la falla Cañón Rojo. El segmento centro cubre la región entre la falla Cañón Rojo, hasta topar con la falla inactiva de la CDD. El tercer y último segmento divide las Sierras Cucapah y El Mayor. La zona de falla tiene 1 km de espesor y ha acomodado un promedio de 11 km de desplazamiento lateral derecho, controlando así la margen oeste de la Sierra Cucapah (Mueller y Rockwell, 1991; 1995; Vázquez-Hernández, 1996; Fletcher y Spelz, 2009 y Hernández-Flores, 2015).

2.3.3 Falla Cañón Rojo (FCR)

La FCR se compone por un arreglo de escarpes cuaternarios que han sido borrados en su mayoría. Este arreglo de escarpes se encuentra a una distancia de 10 km al noroeste del escarpe principal e inactivo de la CDD y corta únicamente unidades aluviales jóvenes (Q2). Los escarpes

relacionados a la FCR son escarpes sintéticos con buzamiento en dirección de la cuenca sedimentaria (Spelz, 2008; Fletcher y Spelz, 2009). El límite norte de FCR se conecta con FLS y se prolonga al sur por 2.5 km, hasta ser cubierta por aluvión y depósitos eólicos recientes. Tiene un echado entre 55° y 60° , con un rumbo N 30° - 35° E y un desplazamiento normal del bloque de techo al NW. Su movimiento es menor a 1 mm/año (Vazquez-Hernández, 1996; Cruz-Castillo, 2002). Debido a la actividad sísmica reciente se deduce que la FCR corta depósitos de brecha, conglomerados del fanglomerado Cañón Rojo y Conglomerado gris. Conforme a Dorsey y Martín Barajas (1999) la FCR corta todas las unidades estratigráficas de la región.

2.3.4 Falla Chupamirtos (FCH)

La FCH está ubicada en la porción sur del dominio sinforme norte del CDD. Es predominantemente de sentido normal y se deforma en respuesta a la extensión Este – Noreste, una respuesta similar a la CDD. Se constituye por un arreglo de escarpes generalmente angosto (70 m), los cuales son exclusivamente sintéticos a la falla maestra CDD. La relación de la componente horizontal con la vertical de la cizalla de este arreglo de escarpes, estima una falla maestra de buzamiento 65° (Spelz, 2008; Fletcher y Spelz, 2009).

Axen y colaboradores (1999) determinaron que la CDD se encuentra activa y buza en un ángulo aproximado a 30° en el subsuelo poco profundo. La falla está compuesta por un extenso arreglo de escarpes que se despliegan por una traza curvilínea compuesta de dos pares de pliegues antiformes y sinformes a través de 60 km de longitud. La CDD ha acomodado 12 km de extensión horizontal en dirección este - oeste desde el Mioceno tardío hasta la actualidad y en conjunto con la FLS han acomodado entre 2 y 4 mm/año entre placas (Hernández-Flores, 2015). En zonas de transecto perpendicular al frente de montaña se forman arreglos de 15 o más escarpes; además, algunos escarpes pertenecen a fallas antitéticas al escarpe principal y registran alto deslizamiento total. Esto es consistente con una superficie de deformación controlada por deslizamiento sismogénico en una falla normal de bajo ángulo (Axen et al., 2000).

3 Materiales y métodos

3.1 Cartografía de abanicos aluviales y escarpes de falla

3.1.1 Introducción

Los estudios geomorfológicos y paleosismológicos en cuencas y frentes montañosos que son controlados por fallas activas, han demostrado ser una poderosa herramienta para evaluar el registro de los sismos históricos a través del análisis de la morfología de las rupturas superficiales, y de la geomorfología de suelos y la morfoestratigrafía de los depósitos de abanicos aluviales que son cortados (Bull, 2007; McCalpin, 2009; Audemard, 2002, Mueller y Rockwell, 1991, 1995, Spelz et al., 2008).

Los abanicos aluviales principalmente en regiones áridas son el resultado de una compleja interacción entre factores climáticos y tectónicos (Gómez-Villar, 1996; Harvey, 1999; Blum y Tornqvist, 2000; D'Arcy y Whittaker, 2014; Dorn, R.I., 1996). En consecuencia, estos rasgos geológicos se han convertido en uno de los más importante marcadores geomorfológicos utilizados para constreñir la edad y definir las tasas de deslizamiento a lo largo de una una amplia gama de fallas activas (Nash, D., 1984; Spelz et al., 2008; Mueller y Rockwell, 1991, 1995). Asimismo, a través del estudio de las características geomorfológicas de los escarpes de falla y su relación con la sedimentación, erosión y las condiciones climáticas que forman los abanicos aluviales, se ha podido evaluar la historia de la actividad tectónica de diferentes arreglos de fallas durante el Cuaternario tardío (Mueller y Rockwell, 1991, 1995; Hsu y Pelletier, 2004, Nash, Brown et al., 1998).

A través de la cartografía detallada de los escarpes producidos por la deformación generada por sismos de gran magnitud y su relación con las unidades morfológicas cuaternarias que cortan, podemos determinar la edad relativa de eventos sísmicos ocurridos en la zona de interés. De esta forma, conociendo la edad de los eventos sísmicos, es posible generar estimaciones de los periodos de recurrencia de la actividad sísmica (Hernández-Flores, 2015; Mueller y Rockwell, 1995; Spelz et al., 2008).

3.1.2 Caracterización de abanicos aluviales y escarpes de falla Cuaternarios

La cartografía regional de los abanicos aluviales y las fallas Cuaternarias que se distribuyen a lo largo de la margen occidental de la Sierra El Mayor fue elaborada desde mediados de los años 2000

(Spelz y Fletcher, datos no publicados). No obstante, los mapas y fotografías base utilizadas carecían en su momento de la suficiente resolución como para registrar de manera precisa las relaciones cortantes, sobretodo de las rupturas superficiales más recientes, con las diferentes generaciones de abanicos aluviales. En el presente estudio, y a partir de un Sistema de Información Geográfica (SIG) construido con base en tecnologías de percepción remota y fotogrametría digital de alta resolución (ver sección 3.1.3), se ha caracterizado de manera detallada la distribución espacial de las rupturas formadoras de escarpes, así como sus edades relativas con base en sus relaciones cortantes con las superficies de los abanicos aluviales. Lo anterior fue realizado utilizando paquetes de computo especializados (ver sección 3.2), en los cuales se identificaron y registraron los contactos litológicos, así como la traza de los diferentes arreglos de fallas, como objetos vectoriales con atributos particulares (ver sección 3.5). El producto final es un mapa detallado, escala 1:1000, el cual permitió evaluar los rasgos estructurales regionales y locales del área de estudio, así como recopilar la información necesaria para evaluar los intervalos de recurrencia, número y magnitud de los eventos formadores de escarpes en la región.

3.1.3 Reconstrucción topográfica por fotogrametría (Structure from Motion)

Structure from Motion (SfM) es un método fotogramétrico de reconstrucción topográfica de alta resolución, fundamentado en el principio de la estereoscopia fotogramétrica (Westoby et al., 2012). El enfoque se basa en un conjunto de imágenes con alto grado de traslape, que permite generar una estructura tridimensional de una escena vista desde diferentes posiciones, derivado de un sensor en movimiento (Figura 7).

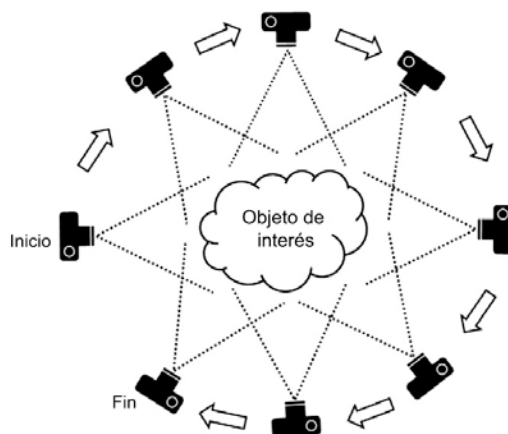


Figura 7. La técnica SfM requiere múltiples fotografías de un mismo objeto tomadas de diferente posición, como entrada a la reconstrucción de ortomosaicos 2D y modelos 3D.

Debido a que estos modelos carecen de escalas y orientaciones, se le debe relacionar a un sistema de coordenadas compatible con la realidad. En muchos casos, esto se realiza usando puntos de control (GPCs) para luego relacionarlos a un sistema de posicionamiento coordinado. La técnica Scale Invariant Feature Transform (SIFT) propuesto por Snavely et al., (2008), permite identificar las mismas características en diferentes imágenes con diferentes ángulos de un mismo objeto para ligarlas entre sí. Dichas características son invariantes en la escala, rotación e iluminación de las imágenes. Los puntos clave de diferentes imágenes son ligados unos con otros, usando una aproximación de los puntos vecinos mas cercanos, y los que no compartan similitud entre imágenes son descartados. La selección de puntos clave permitirá clasificar y reconstruir la imagen desde diferentes perspectivas, para posteriormente desarrollar la representación en 3D, conservando su textura y sus colores (Westoby et al., 2012).

Haciendo uso de la SfM se puede construir una topografía georreferenciada de alta resolución con textura, color, en un corto periodo de tiempo. Las imágenes generadas facilitan el estudio del comportamiento de las fallas activas a partir de la medición de sus desplazamientos geomorfológicos asociados a rupturas sísmicas modernas, históricas y prehistóricas mediante percepción remota, y de esta forma determinar la dinámica en zonas de fallamiento activo (Johnson et al., 2014).

3.2 Hardware y Software

Para la adquisición y el procesamiento de los datos e información necesarios para alcanzar los objetivos del presente trabajo, se utilizaron las siguientes herramientas de hardware y paquetes de computo:

Ebee: Es un vehículo aéreo no tripulado (VANT) autónomo diseñado para capturar fotografías aéreas de alta resolución, que se pueden transformar en ortomosaicos 2D precisos y modelos 3D. A través de la definición del área que desea cubrir, de la resolución de la fotografía, y la superposición de imágenes. Ebee genera automáticamente un plan de vuelo delineado a priori para cubrir la zona de interés considerando la altitud requerida a partir de los datos de elevación.

EMOTION 2: Es el software base de operaciones de vuelo del VANT Ebee. Cuenta con las funciones de planificación, genera un plan de vuelo basado en puntos de referencia de GPS, calcula la altitud requerida y muestra la trayectoria de vuelo definida en función de la resolución de los productos, de la duración de la batería del dron y de las condiciones de viento (magnitud y dirección). Se apoya en modelos regionales de elevación (SRTM1) para calcular la altitud de vuelo relativa al terreno. Asimismo

Geo-etiqueta las imágenes que el dron capta, desarrollando y almacenando los datos del vuelo, apoyándose en la trayectoria de vuelo registrada en su bitácora.

POSTFLIGHT TERRA 3D [PIX4D]: Es un software fotogramétrico con la función de transformar las fotografías RGB en ortomosaicos georreferenciados 2D, nubes de puntos 3D y modelos digitales de superficie (MDS).

CANVAS 15: Software que combina las herramientas y formatos de archivo necesarios para crear, visualizar y editar imágenes y gráficos de tipo ráster y vectorial con formato SIG. Por lo tanto, Canvas 15 fue utilizado para desarrollar la cartografía geológica detallada de los abanicos aluviales y paleoescarpes de falla como objetos vectoriales, considerando como base fotografías aéreas en formato RASTER.

GLOBAL MAPPER V15.0: Es una aplicación de SIG la cual permitió visualizar y editar las imágenes RASTER, a través del cambio de formatos, aumento o disminución de la resolución y calidad de las imágenes, análisis de información y extracción de perfiles topográficos, para su manipulación en otros software (e.g., Canvas 15 y ARCGIS 10.3).

ARCGIS 10.1: Software que permitió el desarrollo y edición del Sistema de Información Geográfica. Debido a la compatibilidad de formatos con CANVAS 15, fue utilizado también para desarrollar las figuras y mapas.

3.3 Adquisición y procesamiento de datos

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron 3 salidas al campo para recabar las fotos aéreas con el vehículo aéreo no tripulado (VANT) ligero de ala fija. Se realizó una cobertura fotográfica de 48,6 km² al NW del frente montañoso de la Sierra El Mayor, donde se ubican los escarpes modernos de falla relacionados con la actividad de la falla de Detachment Cañada David. Se dividió la zona en 4 secciones (figura 8), para realizar las misiones de vuelo con duración hasta de 35 minutos, las cuales constaron de entre 5 y 6 líneas de vuelo. Los vuelos se realizaron durante los meses de Febrero y Marzo entre las 9:00 y las 17:00 horas, a alturas que oscilaron entre los 500 y 650 m, obteniendo un total de 1,681 fotografías, las cuales tuvieron traslapes laterales de 60% y longitudinales de 75%. Las fotografías fueron obtenidas con la cámara Sony DSC-WX220 de 18 mega pixeles (4896 x 3672) en color natural (RGB). Las fotografías fueron geo-etiquetadas con sus datos de posicionamiento geográfico (longitud, latitud y altitud) con el software Emotion 2. El posicionamiento geográfico está basado en el equipo GPS a bordo del VANT.

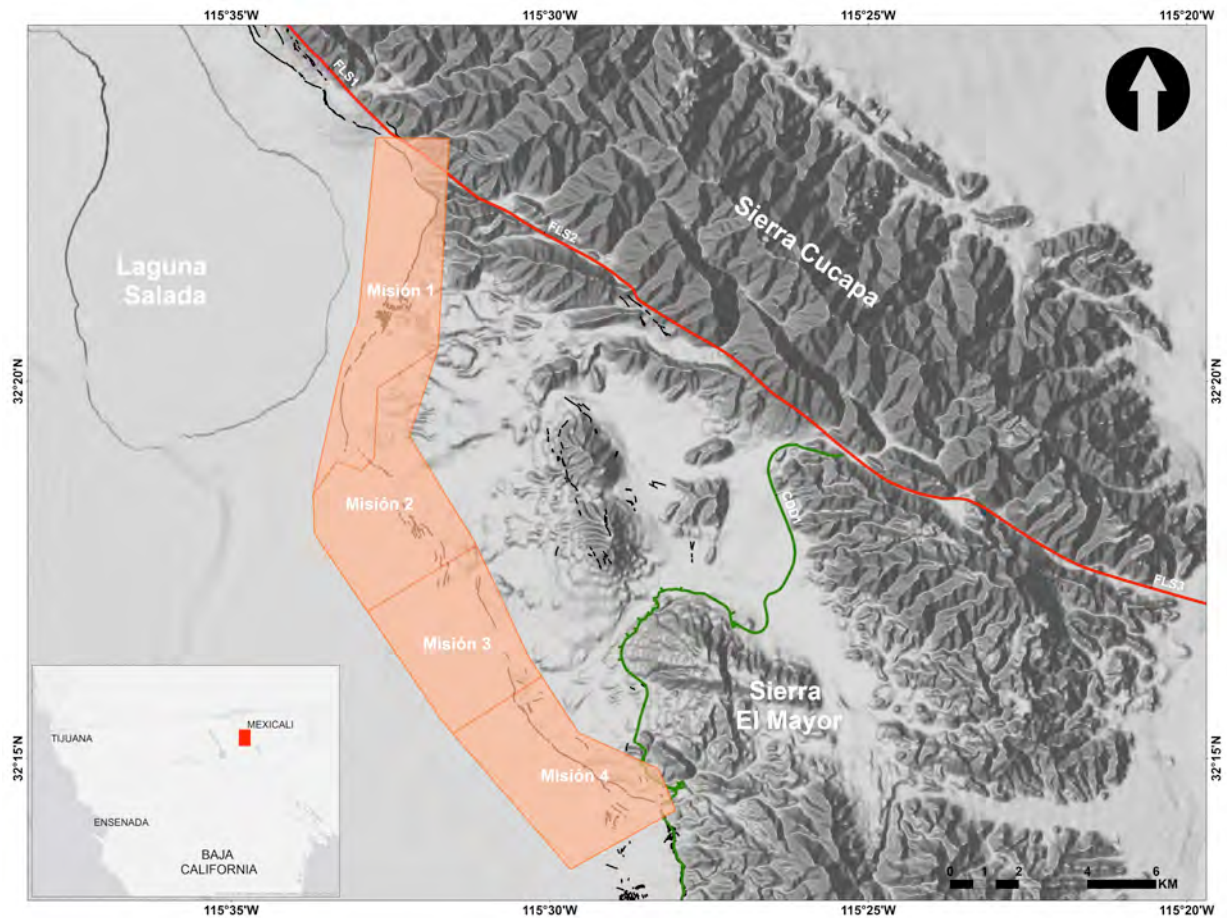


Figura 8. Área de estudio ($48,6 \text{ km}^2$). zona de intersección de las Sierras Cucapah y El Mayor, mostrando el área de cobertura de los vuelos eBee sobre la zona de estudio (Polígonos naranjas) las cuales cubren los escarpes cuaternarios del nuevo frente de montaña de la Sierra El Mayor. El área fue dividida en 4 secciones, y cada sección fue cubierta por una misión de vuelo. La línea roja representa la falla Laguna Salada al pie de la sierra Cucapah. Línea verde representa la traza principal de la falla Detachment Cañada David. Las líneas negras son los escarpes de falla. El recuadro rojo muestra la zona de estudio en la macro-localización del área.

Las fotografías aéreas fueron procesadas en el software Postflight Terra 3D, que aplicando la técnica SfM descrita anteriormente genera los siguientes productos finales: ortomosaicos, Modelos Digitales de Superficie y nubes de puntos, proyectados todos en el sistema de coordenadas del Sistema Geodésico Mundial 1984 / Universal Transversal de Mercator zona 11 Norte (WGS84/UTM zona 11N). La figura 9 muestra la secuencia del procesamiento de los datos realizada mediante el software Postflight Terra 3D para la misión de vuelo 1 (los reportes generados por el Software de cada misión puede encontrarse en el apartado de anexos), proceso que se repitió en las misiones 2, 3 y 4 para obtener los mismos productos y cubrir la totalidad del segmento del sinforme norte de la falla de Detachment Cañada David. En el apéndice se anexa los reportes completos generados por Postflight Terra 3D para las 4 misiones de vuelo.

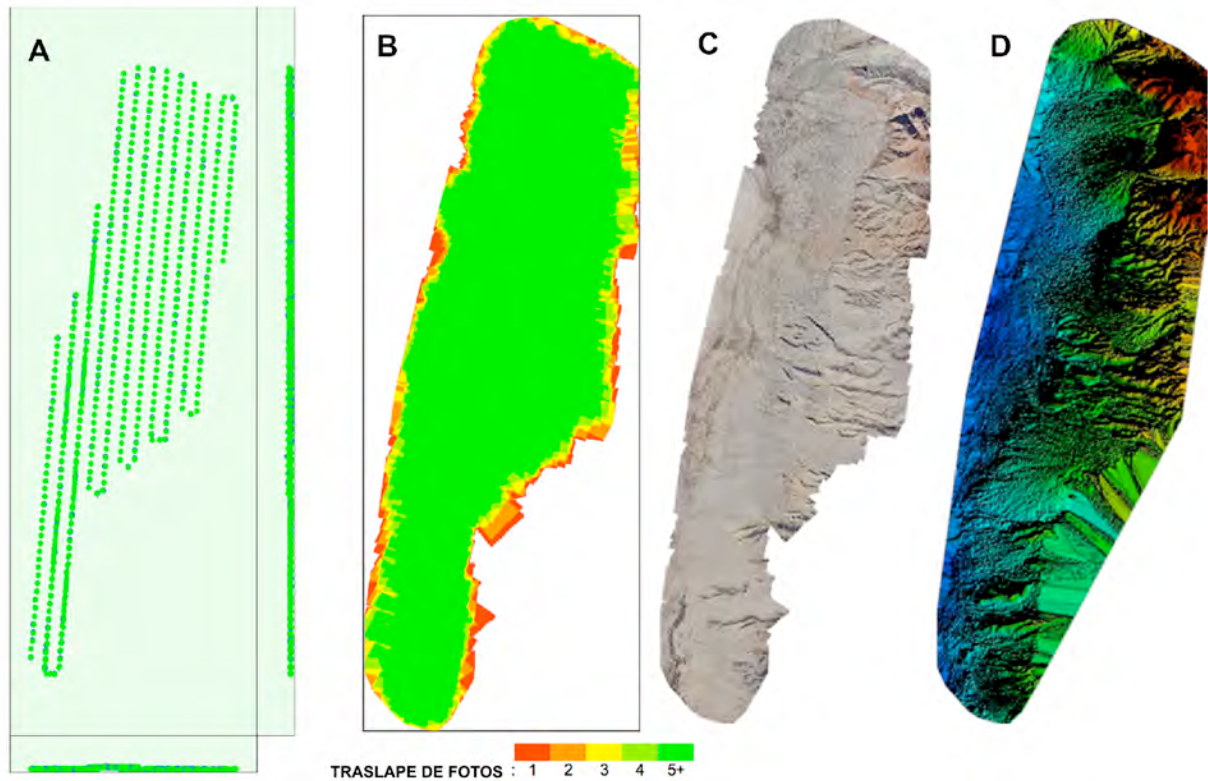


Figura 9. Figuras incluidas en el reporte PostFlight Terra en el procesado de las fotografías colectadas en la misión de vuelo 1. Secuencia del procesamiento progresivo de los datos colectados a partir de la primera misión de vuelo en el área de estudio (ver misión 1 en Figura 1). UBICACIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS A) puntos iniciales (azules) muestran la ubicación donde fue tomada la fotografía aérea y su posición corregida (verdes). En el recuadro principal se muestra la ubicación de los datos en el plano XY, El recuadro inferior muestra la ubicación de las imágenes en el plano XZ, y el recuadro lateral muestra la ubicación de las imágenes en el plano YZ. B) ZONAS DE TRASLAPE: áreas rojas, naranjas y amarillas= zonas con bajo solapamiento entre las fotografías aéreas. Área verde= superposición de más de 5 imágenes por píxel (lo ideal). RESULTADOS (11.5 cm/Píxel) = C) Ortomosaico y D) Modelo Digital de la Superficie (MDS).

3.4 Productos obtenidos del proceso Structure from Motion

3.4.1 Ortomosaicos

Una ortofoto es una representación fotográfica de una zona en la superficie terrestre, donde todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. Las fotografías carecen originalmente de las características geométricas y de referenciación geográfica necesarias para trabajos cartográficos. Por medio de los procesos fotogramétricos anteriormente descritos, las imágenes son procesadas hasta obtener ortomosaicos georreferenciados de la zona geoméricamente corregida, a una escala de 11.63 cm por píxel, y se encuentran libres de deformaciones. A esta composición de imágenes se le han corregido todos los

errores geométricos para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular (Gómez et al., 2012).

La Figura 10 muestra una comparación de fotografías utilizadas en este análisis, comparando una imagen de Google Earth con una definición de 1 m/pixel y una fotografía de alta resolución adquirida a través del dron de ala fija eBee (11.5 cm/pixel).

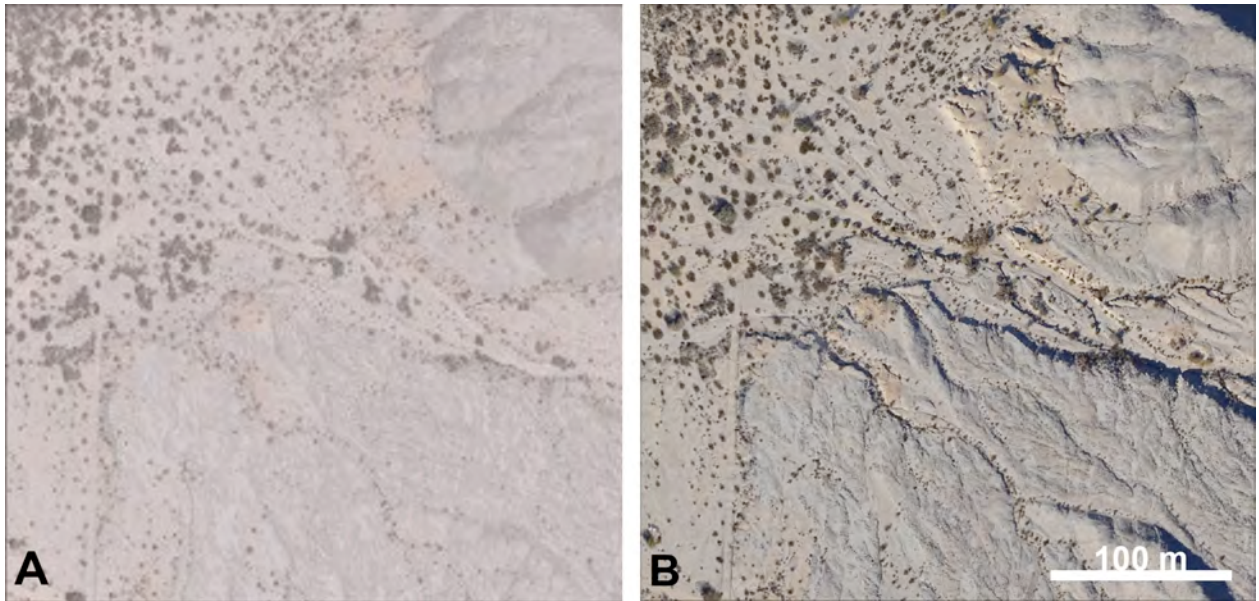


Figura 10. Comparación de la calidad entre las imágenes utilizadas. A) Imagen de Google Earth (1m/pixel), B) Imagen eBee (11.6 cm/pixel). Nótese la diferencia en claridad y resolución de las imágenes colectadas en el presente estudio. La imagen B (eBee) muestra mayor detalle que A. Se pueden apreciar características como el camino cargado a la izquierda de la fotografía, las diferencias morfológicas de barras y canales de la unidad en la esquina superior derecha (Q6) y la unidad de la esquina inferior derecha (Q4), la vegetación y los canales activos característicos de las unidades más jóvenes (Q1 y Q2) entre estas unidades.

3.4.2 Modelos digitales de superficie

El Modelo Digital de Superficie (MDS) muestra un área continua que incluye la parte superior de objetos y estructuras en la tierra, tal como vegetación, rocas o cualquier rasgo geomorfológico que se presente sobre la superficie, o bien la superficie desnuda cuando nada la ocluye. En zonas áridas, con escasa o nula vegetación y sin alteración antropogénica, el MDS es un proxy del modelo digital del terreno (MDT).

Durante diferentes etapas del proyecto se probaron varios productos sobre el relieve en la zona de estudio, en busca de los sutiles escarpes de falla producidos por sismos. Los productos analizados son: EL Modelo digital de elevación (MDE) de INEGI a 5 m desarrollados a partir de tecnologías LiDAR (Light Detection And Ranging). La tecnología LiDAR integra tecnologías geodésicas, de sistemas de posicionamiento global (GPS), Unidad de Medición Inercial (IMU) y sensores láser, que recolectan datos de altitud para definir la superficie del terreno y generar Modelos Digitales de Elevación (MDE).

Dado que la zona de estudio no esta totalmente cubierta por el MDE de INEGI, fue necesario adquirir el AW3D ALOS PRISM ÓPTICO, el cual es un Modelo Digital de Elevaciones comercial con resolución de 5 m, desarrollado con base en las imágenes adquiridas por ALOS (Advanced Land Observation Satellite) de resolución 2.5 m. Se exploraron los modelos globales del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 1 arcosegundo global. Finalmente terminamos utilizando el MDS generado a partir de las fotografías de alta definición (11.6 cm) generadas durante el presente proyecto con el VANT eBee. La figura 11 muestra la comparación entre los diferentes modelos de elevación considerados en este estudio.

3.4.3 Nube de puntos

La nube de puntos consta de millones de puntos individuales, cada uno de los cuales tiene asignadas coordenadas X, Y, Z y un valor RGB generados por la técnica Structure From Motion (SfM), a partir del conjunto de fotografías (Johnson et al., 2014). La figura 12 muestra la nube de puntos de la sección 1 a diferentes escalas.

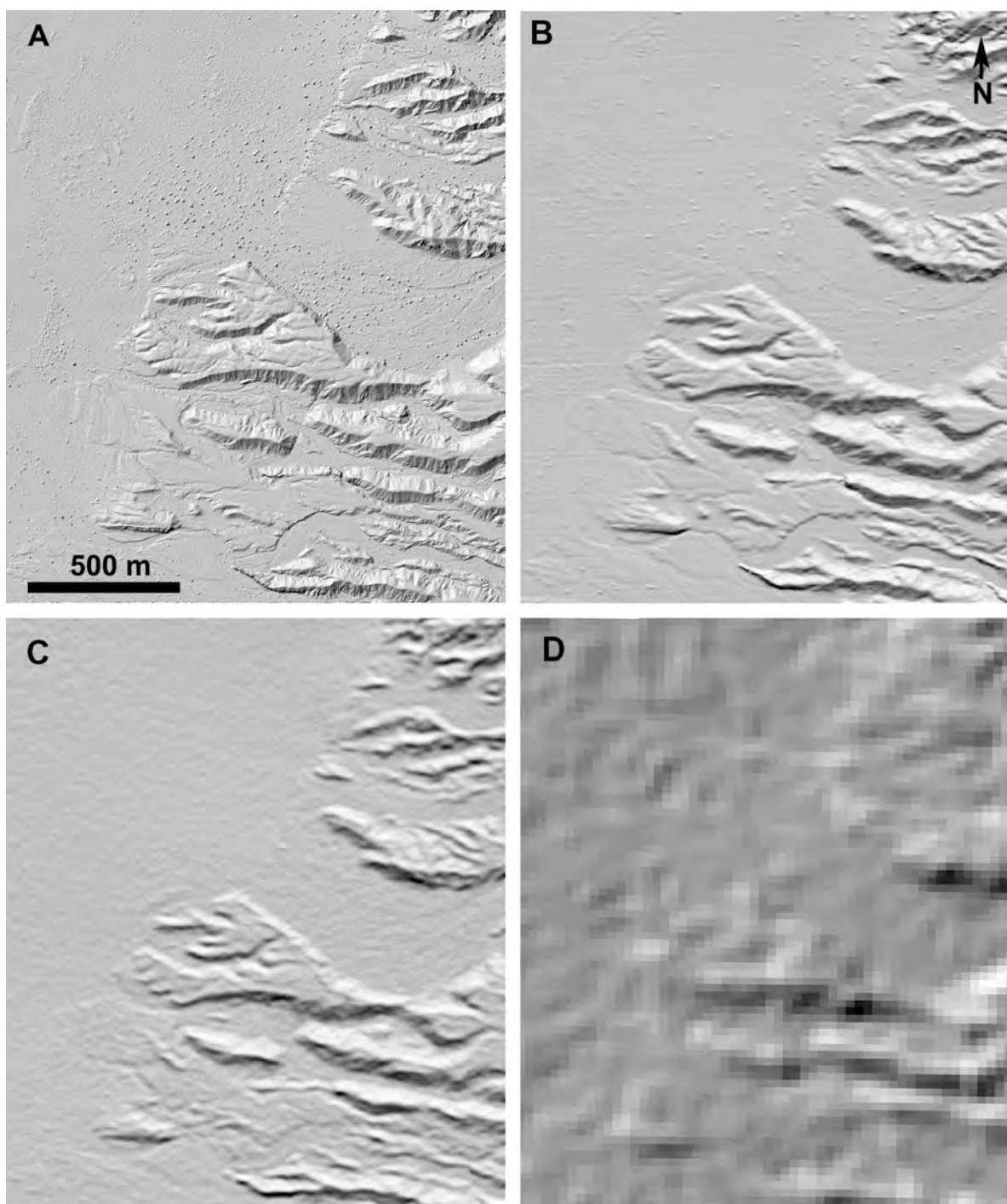


Figura 11. Comparación entre Modelos de elevación Digital. A) MDS desarrollado por eBee (11.6 cm). B) MDE INEGI (5 m). C) MDE ALOS Prism (5 m). D) MDE SRTM 1 segundo de arco (30 m). Como se puede apreciar en la comparación de los modelos de elevación, en grado de detalle que se aprecia en el MDS generado a partir de las fotografías tomadas por Ebee es alto, y esto se puede apreciar en los canales activos de las unidades más jóvenes. Es fácil identificar también el arreglo de escarpes que se despliega de Noreste a Suroeste generando una diferencia de altura entre unidades aluviales. Las características morfológicas de dichas unidades son también fáciles de identificar en la imagen A. Los DEM B y C, aunque se presentan en la misma resolución, la calidad topográfica que se presenta en la B (INEGI) se debe a que este modelo se desarrolló a partir de tecnologías LiDAR, en cambio, el modelo en C (ALOS) deriva de fotografías satelitales de 2.5 m de resolución. EL modelo en la imagen D, tiene una resolución de 1 Arco segundo (aproximadamente ~30 m).

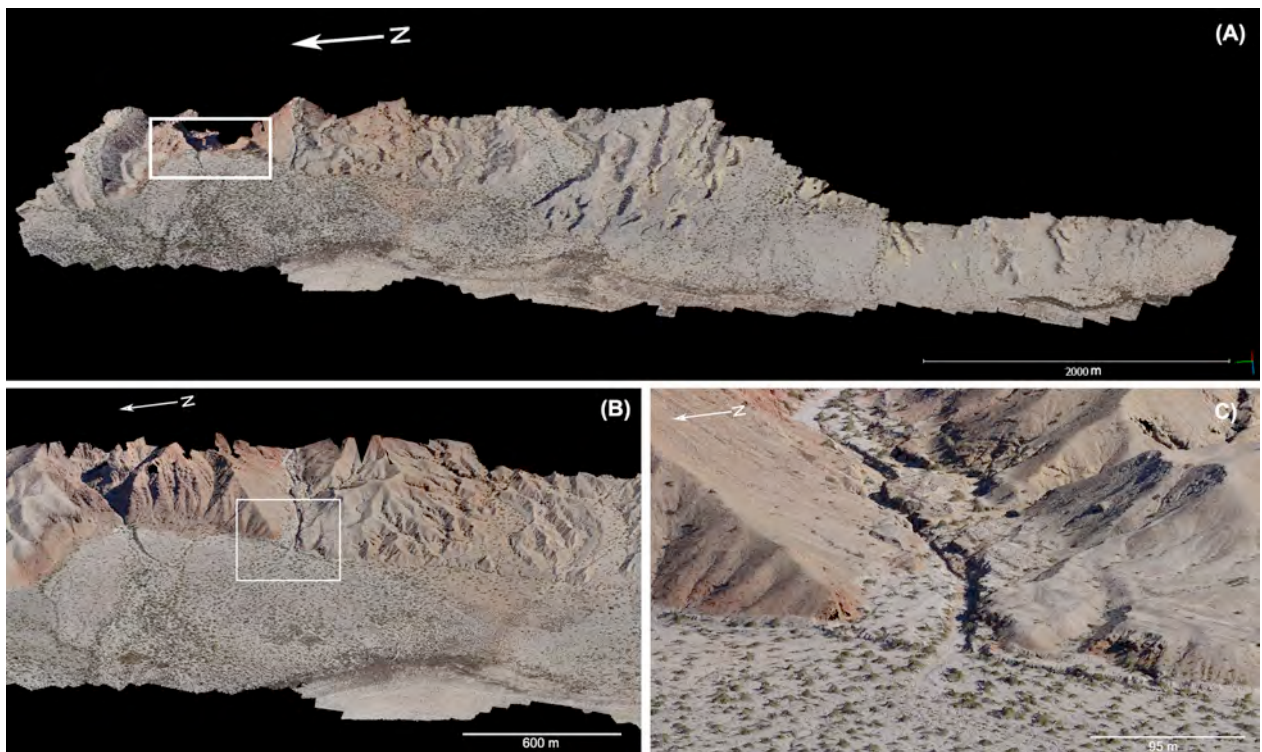


Figura 12. Densidad de nube de puntos de la sección 1, al norte del frente de la Sierra El Mayor (A) permite identificar los abanicos aluviales mas elevados y a grandes rasgos el recuadro blanco enmarca la zona mostrada en la imagen B. La imagen (B) muestra la representación tridimensional de la superficie de la región a una escala de 600 m, donde es posible identificar las diferentes unidades aluviales, las diferencias litológicas y los cauces de los canales activos, densidad de vegetación. El recuadro en blanco muestra la zona mostrada en la imagen C. (C) muestra una escala de 95 metros que permite identificar un escarpe moderno que corta unidades aluviales modernas, mismas que ha sido erosionadas e intemperizadas por canales modernos activos.

3.5 Delimitación y clasificación de las unidades aluviales y escarpes de falla.

Para la cartografía base fueron utilizados tres conjuntos de insumos: a) Imágenes Google Earth (GE) con resolución de 1 metro por pixel (mpp), b) orto-imágenes generadas con el dron eBee con resolución original de 11.6 cm por pixel y posteriormente sub-muestreadas a 30 cm. Detalles de la cámara y del vuelo en sección 3.3 y c) Pares estereográficos impresos a color a una escala de 1:7000, los cuales son ampliaciones 4X de las fotografías aéreas tomadas por el INEGI en 1972, a una escala original de 1:30,000.

Utilizando las imágenes GE y orto-imágenes del eBee de alta resolución, se delimitaron y clasificaron los abanicos aluviales conforme a las características morfo-estratigráficas descritas por Spelz et al (2008), quienes cartografiaron 8 diferentes generaciones de abanicos aluviales Cuaternarios a lo

largo de la margen occidental de la Sierra El Mayor, con base en: 1) la altura relativa de las superficies aluviales; 2) el grado de desarrollo del barniz del desierto, 3) la presencia o ausencia de la morfología de barras y canales, 4) el grado de intemperismo de los clastos superficiales; 5) la cantidad de vegetación y, 6) el grado de desarrollo del perfil del suelo. Según Mueller y Rockwell (1995) con base en el desarrollo del perfil del suelo: Q1 = moderno; Q2 <200 años; Q3 entre 200 y 2000 años; Q4 entre 2000 y 8000 años (posiblemente hasta 12000 años); y Q5 entre 12000 y 50000 años. Q6 y Q7 no fueron cartografiadas por Mueller y Rockwell, sin embargo las edades de exposición determinadas por Spelz et al., 2008 sugieren que Q6 podría ser tan vieja como ~125 ka, mientras que Q7 podría alcanzar hasta 204 ka.

Las fotografías fueron revisadas detalladamente a través del software de dibujo vectorial georreferenciado CANVAS 15 a una escala de 1:1000, con el cual se realizó la delimitación de las unidades morfológicas a través de una capa de poli-líneas, al mismo tiempo se fueron clasificando y etiquetando las edades relativas de los abanicos aluviales conforme la nomenclatura de Spelz y colaboradores (2008):

Q1 es la superficie más joven y con menor altura relativa; la morfología de barras y canales es activa, y sus superficies se caracterizan por la presencia de clastos no intemperizados, y abundante cobertura de vegetación. Ver figura 13.

Q2 es una superficie morfológicamente similar a Q1, aunque con una altura relativa mayor. Q2 se presenta únicamente donde la superficie ha sido levantada por una falla, generando una diferencia en la altura relativa con respecto a Q1. Ver figura 13.

Q3 se caracteriza por presentar clastos superficiales de color rosado producto de una ligera acumulación de barniz del desierto; su superficie conserva las barras y canales, y es visiblemente rugosa; la vegetación en Q3 es menos abundante que en Q1 y Q2. Ver figura 13.

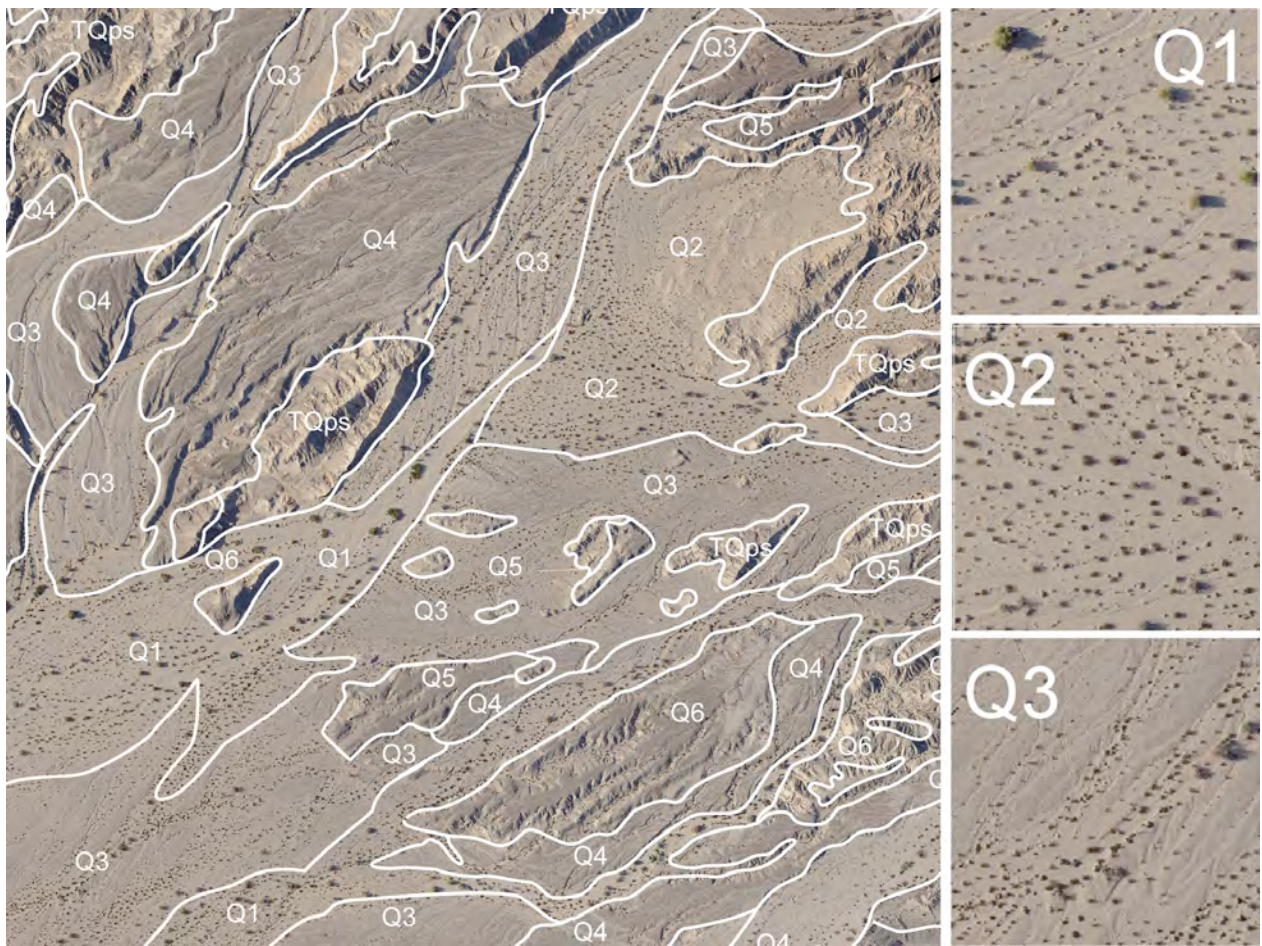


Figura 13. Mapa representativo de la cartografía de las unidades en la margen NW de la Sierra El Mayor. Características de las unidades aluviales Q1, Q2, y Q3. Las unidades mostradas en esta imagen, se considera fueron desarrolladas en el mismo periodo glacial, debido a que las características son muy similares. La diferencia se registra en las alturas relativas entre las unidades Q1 y Q2, la cual se genera por rupturas cosísmicas. La unidad Q3 registra menos vegetación y menos canales activos, debido a que es la unidad de mayor edad de este pulso climático y ha sufrido mayores modificaciones por efectos climáticos.

Q4 está caracterizada por una superficie de color marrón, con clastos bien barnizados que presentan evidencia de intemperismo salino de tipo tafoni; la morfología de la superficie es rugosa, y caracterizada por la presencia de barras y canales bien definidos; la vegetación es considerablemente menor a las superficies más jóvenes. Ver figura 14. Con base en el desarrollo del perfil del suelo en las superficies Q1 a Q4, Mueller y Rockwell (1995) sugieren que estas se formaron bajo condiciones de clima árido y temperaturas altas características del Holoceno.

Q5 representa la unidad aluvial más joven formada bajo condiciones climáticas características del Pleistoceno (Mueller y Rockwell, 1995). Su superficie se localiza a una elevación significativamente mayor, con respecto a los cauces modernos Q1 (en algunas regiones es de hasta 20 m); sus clastos son

fuertemente intemperizados, presentando frecuentemente morfologías de tipo sombrero” (Birkeland y Noller, 2000). La superficie de barras y canales se conserva aunque el relieve entre las crestas y los valles disminuye con respecto al de las unidades holocénicas, al igual que el tamaño general de los clastos, efecto que se acentúa con la distancia a partir del frente de la Sierra. En Q5 la vegetación es escasa y la formación de un pavimento del desierto es incipiente. Ver figura 14.

La superficie de Q6 está caracterizada por un pavimento del desierto formado por pequeños clastos de tamaño <4 cm, producto de la desintegración de los clastos de mayor tamaño por efecto del intemperismo. La morfología de barras y canales esta prácticamente borrada, y la superficie carece prácticamente de vegetación. Ver figura 8.

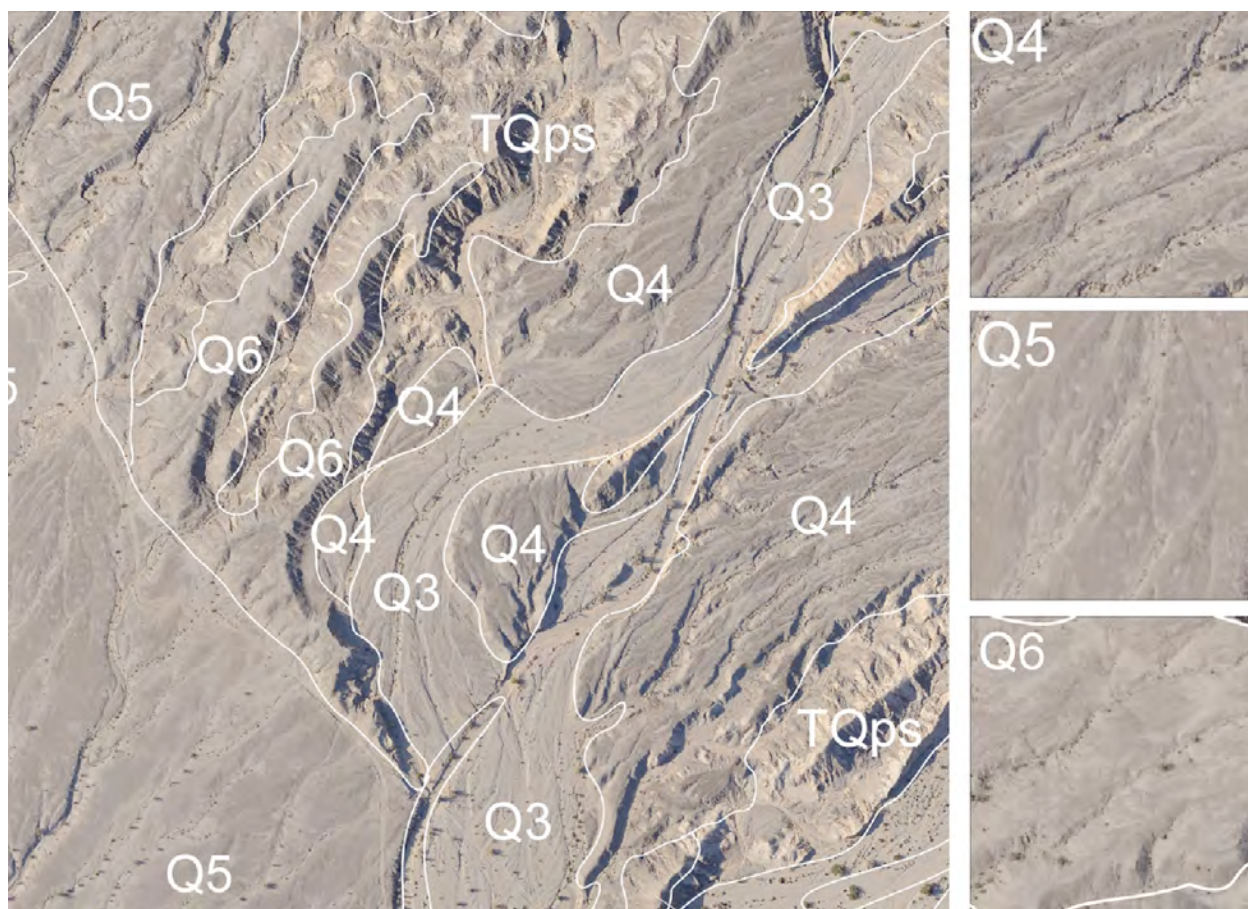


Figura 14. Características de las unidades aluviales Q4, Q5 y Q6. Las unidades aluviales Q4 cuentan con una superficie rugosa conformada por barras y canales marcados. Se caracteriza por un color marrón oscuro y cubierta de vegetación escasa. Q5 presenta una superficie accidentada, donde se registran barras y canales, pero en menor proporción que Q4, la cantidad de vegetación disminuye también. En Q6 la morfología de barras y canales casi desaparece al igual que la vegetación, en Q6 el color de la superficie se torna más oscuro que en Q5 y Q4.

Q7 es una superficie que se caracteriza por un pavimento del desierto bien desarrollado. Técnicamente sin clastos y sin vegetación, es la unidad con la mayor altura relativa y la morfología de barras y canales es casi nula. En la unidad Q8 la superficie se caracteriza por el desarrollo de pavimento del desierto dominado por clastos de rocas metamórficas altamente barnizadas y sin vegetación. Figura 15.

Q8 es una superficie tan antigua que ha perdido muchas de sus características morfológicas, y presentan una morfología del tipo “dorsos de ballena”, la cual se caracterizan por clastos bien barnizados, principalmente de cuarcita, y pavimento del desierto bien desarrollado. Carecen de vegetación. Q8 no fue localizado en la zona.

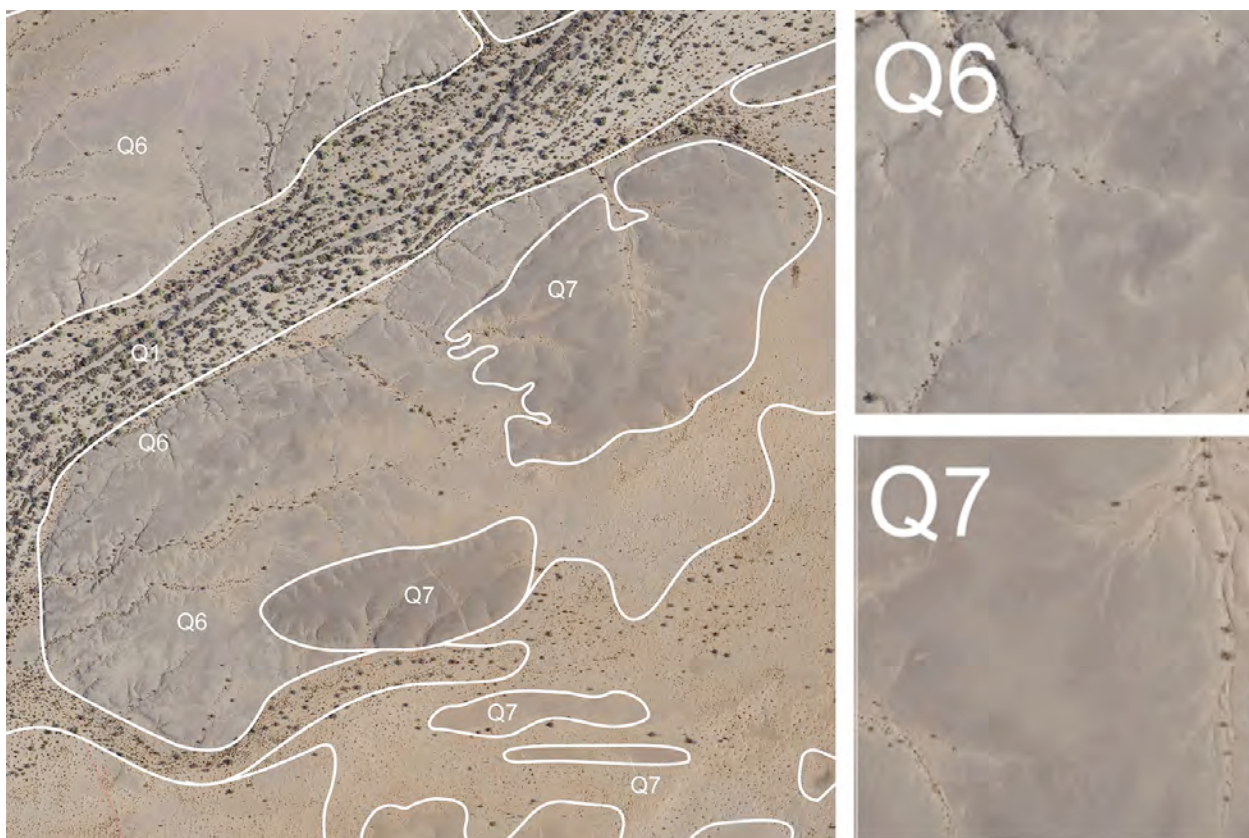


Figura 15. Características de las unidades aluviales Q6 y Q7. Q6 presenta un pavimento del desierto desarrollado donde muy levemente se logran distinguir barras y canales que han sido casi borrados por completo, es menos alto en comparación con Q7 y de color marrón claro. Las unidades Q7 se caracterizan por un color marrón oscuro. Es la unidad aluvial más elevada y generalmente se presenta en menor proporción a Q6.

La cartografía del arreglo de escarpes de falla se realizó siguiendo la traza de las fallas principales, generando una capa de rasgos lineales, donde se ubicaron los escarpes registrados en las diferentes superficies aluviales distribuidas a lo largo de la margen NW de la Sierra El Mayor (figura 16).

Asimismo, se revisó y delimitó entre las terrazas aluviales y el basamento cristalino de la Sierra El Mayor, el cual fue caracterizado y etiquetado.

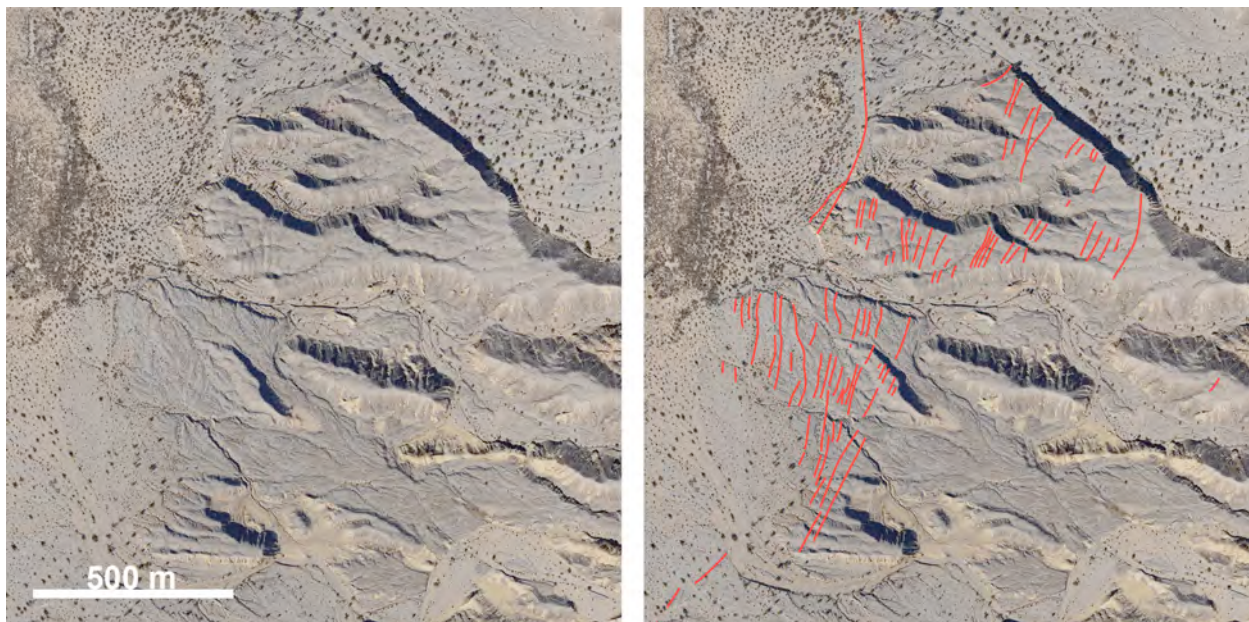


Figura 16. Ejemplo de delimitación de paleoescarpes. En la imagen de la izquierda se muestra un abanico aluvial Q6 ubicado al norte del dominio sinforme al norte del Detachment Cañada David, el cual cuenta con rupturas superficiales registradas en su superficie. En la imagen a la derecha se muestran los paleoescarpes identificados por líneas rojas .

La verificación de la cartografía se llevó a cabo mediante la utilización de pares estereoscópicos, los cuales generan una perspectiva tridimensional del áreas de interés, a partir de la cual se pueden corregir y definir de manera mas clara y precisa los rasgos geológicos y geomorfológicos tales como el relieve de las superficies aluviales, su diferencia de alturas relativas y/o las edades relativas de los arreglos de fallas con base en sus relaciones cortantes con las unidades aluviales. La figura 17 muestra un ejemplo del proceso de delimitación y el etiquetado de las unidades aluviales, así como la identificación y trazado de los escarpes y paleoescarpes tomando como referencia las fotografías aéreas generadas en este proyecto (11.6 cm/pixel).

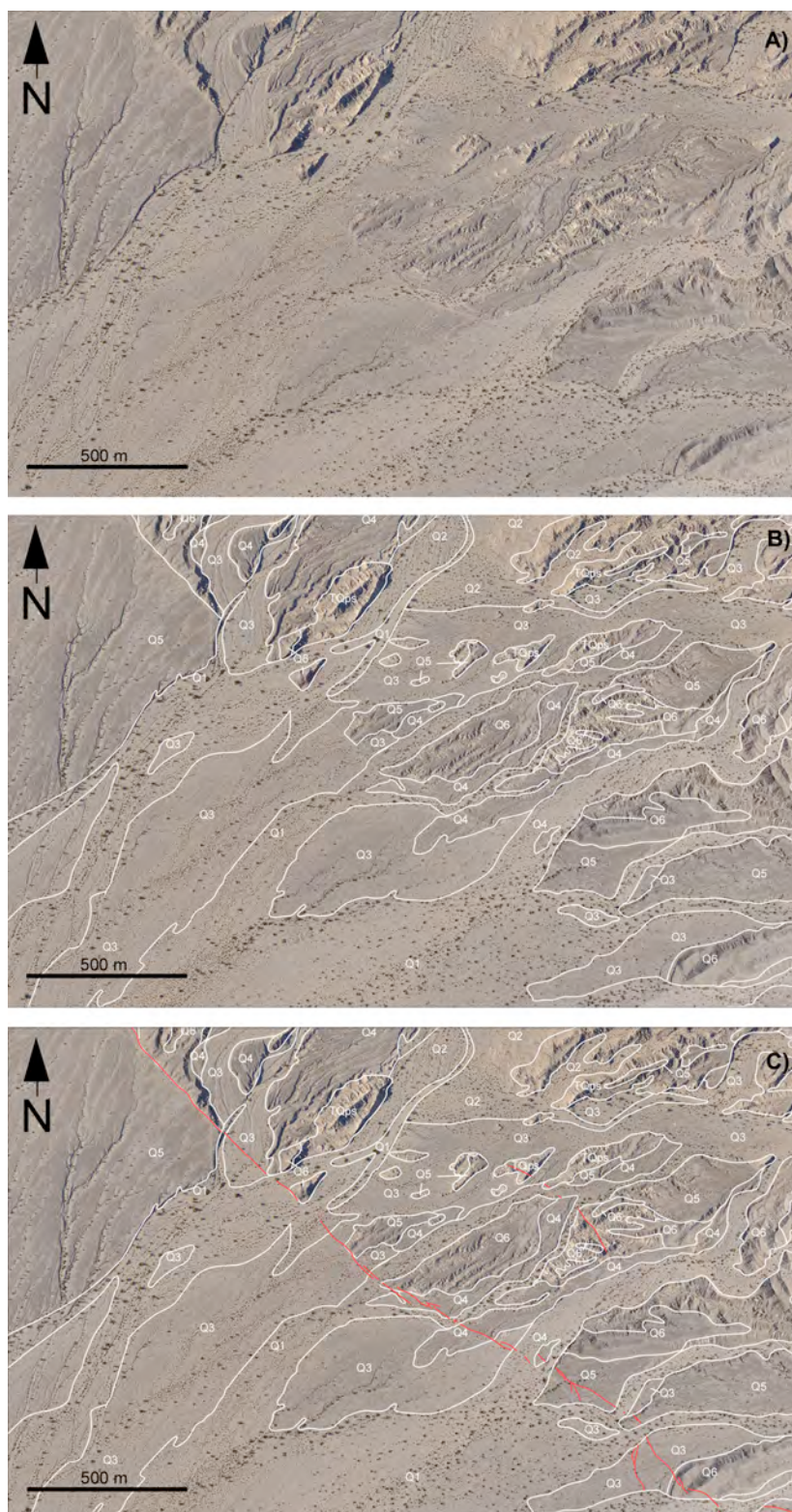


Figura 17. Fotografía aérea de alta definición (11.5 cm/píxel) que muestran el proceso de delimitación de unidades aluviales e identificación de escarpes modernos y paleoescarpes. A) Fotografía aérea 11.6 cm por píxel de resolución. B) Delimitación de unidades aluviales (polígonos blancos), y etiquetado de las mismas conforme a las características geomorfológicas de acuerdo con Spelz (2009). C) Identificación de los escarpes modernos y paleoescarpes que cortan las unidades aluviales de la región (líneas rojas).

3.5.1 Relaciones cortantes

Una vez clasificadas y cartografiadas las unidades aluviales, e identificados los arreglos de escarpes de fallas, se procedió a realizar un análisis de las relaciones cortantes. Este análisis permite estimar la edad relativa de las rupturas superficiales con base en la identificación de las unidades aluviales que son cortadas por un determinado arreglo de fallas. Se definieron las edades relativas de los escarpes de falla con base en la evaluación de los abanicos aluviales que son cortados, desde la unidad aluvial más joven hasta las más antigua cortada, por un mismo arreglo de escarpes. Por lo tanto, las relaciones cortantes de un escarpe de falla pueden expresarse mediante la expresión: Q_i - Q_j . La cual indica que el escarpe de falla corta desde la superficie Q_i (unidad más joven), hasta Q_j (unidad más antigua). La figura 18 muestra un ejemplo de las relaciones cortantes de un arreglo de escarpes de falla Q_5 - Q_6 . Con base en este análisis, y considerando las edades relativas de las unidades aluviales desplazadas por los escarpes de falla, se estimaron edades de ruptura y se asociaron a sismos históricos ocurridos en la región.

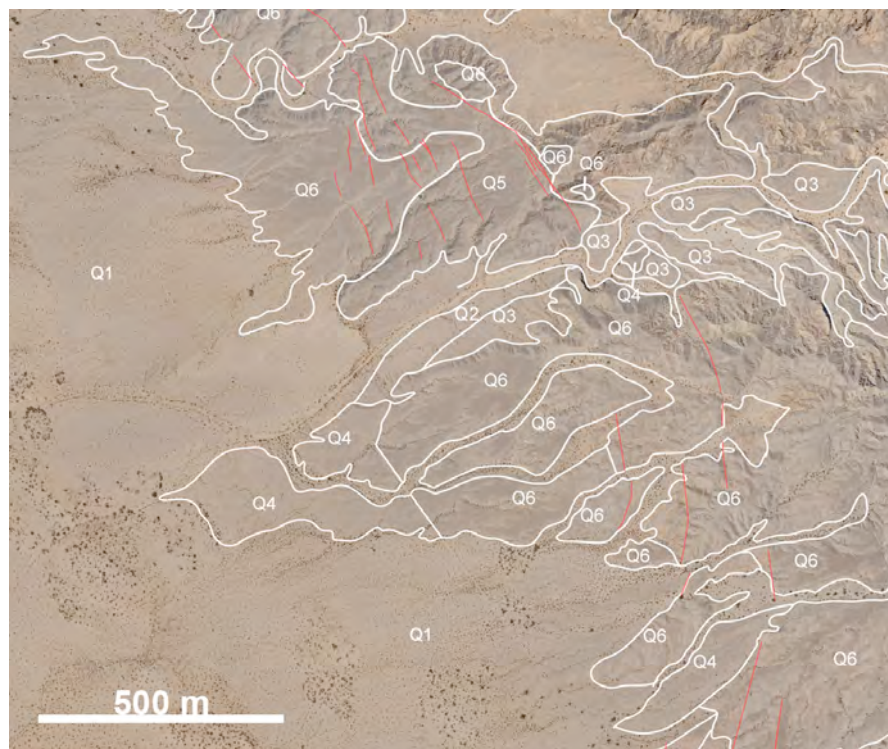


Figura 18. Fotografía aérea de alta definición (11.5 cm/píxel) que muestra un ejemplo de relaciones cortantes. La relación de corte en este ejemplo es Q_5 – Q_6 . Esto quiere decir, que las superficies aluviales afectadas por escarpes de falla son desde Q_5 , hasta Q_6 . Y aunque se presentan edades mas jóvenes que Q_5 (la fotografía incluye una secuencia de unidades aluviales desde Q_1 hasta Q_4), éstas no han sido cortadas por el arreglo. Esto representa que en la región no se han registrado eventos sísmicos modernos. Más bien, los eventos registrados y cartografiados en la cobertura presentada, tienen edades de al menos 12,000 años (edad estimada de Q_5).

4 Resultados

La cartografía detallada a lo largo del frente montañoso de la Sierra El Mayor en su extremo norte, ha revelado rasgos estructurales y litológicos sin precedente. Las imágenes adquiridas mediante eBee facilitaron la identificación de nuevas relaciones estructurales entre los principales sistemas de fallas maestras que controlan la margen Oeste de la Sierra, así como la distribución espacio-temporal y la segmentación de los diferentes arreglos de escarpes Cuaternarios asociados con la actividad tectónica a lo largo de los sistemas de falla dominantes.

4.1 Sistema de fallas al frente de la Sierra El Mayor

4.1.1 Falla Cañada David Detachment

La actividad tectónica a lo largo de la margen oeste de la Sierra El Mayor es controlada por la falla maestra de Detachment Cañada David (CDD). La CDD es una falla normal de bajo ángulo, de 60 km de longitud con buzamiento entre 10 y 20° en dirección al oeste, la cual pone en contacto sedimentos de edades Mioceno–Pleistoceno contra basamento cristalino del Mesozoico. La zona de falla se caracteriza por 2 m de gouge arcilloso rodeado por una cataclasita de color oscuro de 150 m de espesor (Fletcher y Spelz, 2009). La actividad de la falla CDD comenzó hace ~12 Ma, y ha acomodado 10-12 km de extensión horizontal (Axen et al., 2000).

La estructura macroscópica de la falla CDD está caracterizada por una traza curvilínea la cual define dos megamuliones antiformes y dos sinformes. Asimismo, el frente montañoso se caracteriza por la presencia de un arreglo continuo de escarpes de falla Cuaternarios, los cuales se extienden a lo largo de toda la longitud de la falla maestra, cortando diferentes generaciones de abanicos aluviales depositados al pie de la Sierra. La localización del arreglo de escarpes varía en distancia con respecto de la traza de la falla CDD, alejándose de la misma en los dominios sinformes hasta por 12 km en el norte, y 2.5 km en el sur, y permaneciendo a distancias de tan solo 300 m de la misma en los dominios antiformes (Figura 19).

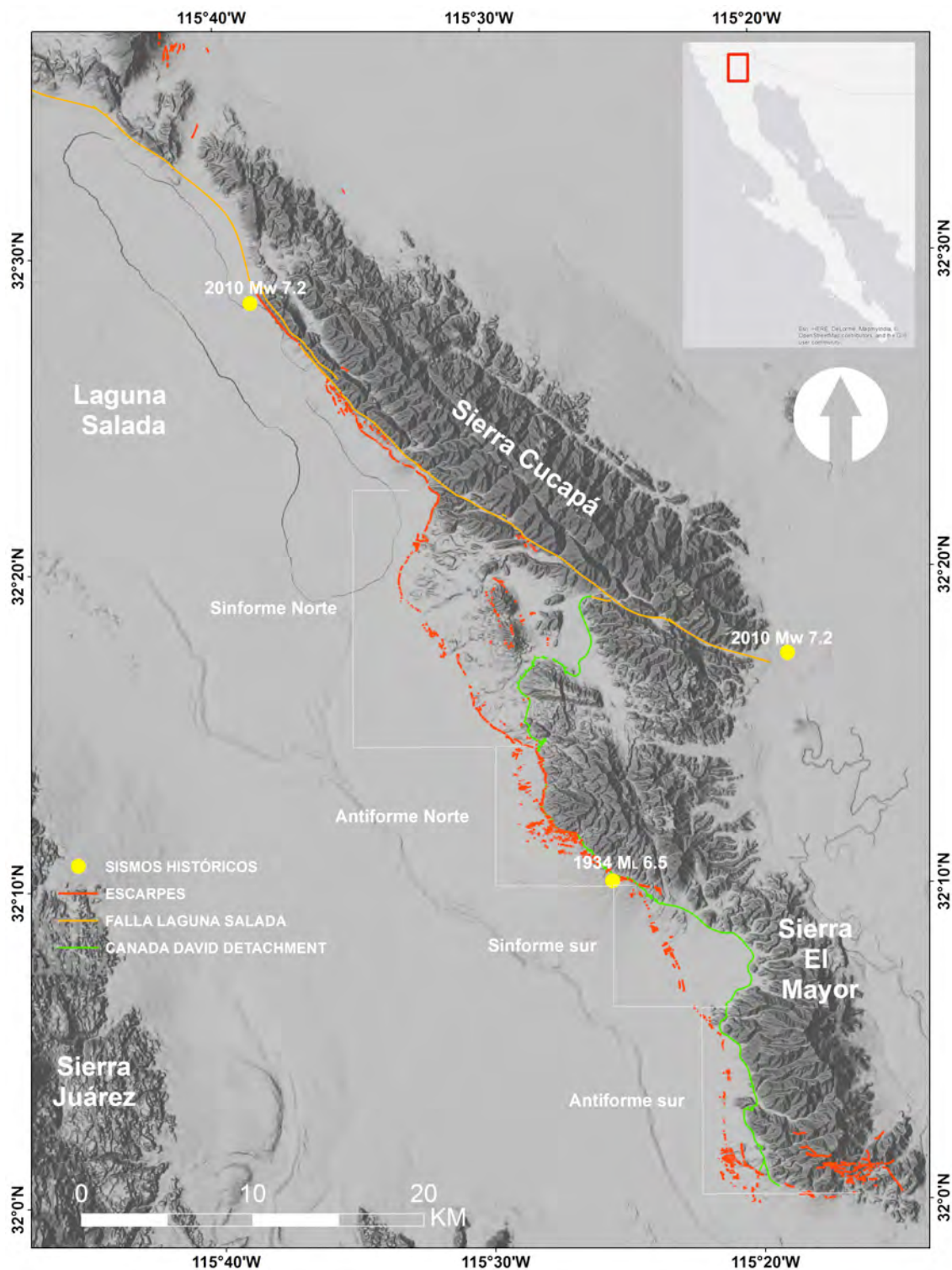


Figura 19. Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (INEGI) que muestra la estructura macroscópica de la falla Cañada David Detachment. La traza de la falla, en color verde, define cuatro dominios principales caracterizados por corrugaciones antiformes y sinformes. En los dominios sinformes los escarpes de falla cuaternarios (líneas de color rojo) se alejan del pie de montaña por algunos kilómetros (12 km en el norte, y 3 km en el sur) a diferencia de los dominios antiformes, en donde los escarpes se localizan a pocas decenas de metros del pie de montaña. Simbología: Línea anaranjada = Complejo de falla Laguna Salada. Los puntos amarillos representan la localización de los epicentros de los eventos sísmicos históricos de la región.

Dominio Sinforme Norte

En el dominio sinforme norte, la falla CDD es inactiva y su traza curvilínea (segmento CDD1 en la figura 20) termina abruptamente contra la falla oblicua de alto ángulo Laguna Salada, la cual controla la margen oeste de la Sierra Cucapah (Figura 20). En este dominio la falla CDD yuxtapone rocas cristalinas del basamento Mesozoico con rocas sedimentarias de edad Plio-Pleistoceno. Estas últimas corresponden principalmente a las formaciones Imperial y Palm Springs, las cuales a su vez se encuentran sobreyacidas por depósitos conglomeráticos derivados localmente de la Sierra. La secuencia sedimentaria localizada en el bloque de techo de la falla CDD, se encuentra rellenando la cuenca Cerro Colorado, y su depositación fue contemporánea con la actividad tectónica a lo largo de este segmento de la falla maestra (Dorsey y Martín Barajas, 1999; Spelz 2002).

En este dominio, el arreglo de escarpes Cuaternarios se encuentra localizado a una distancia máxima de 12 km hacia el oeste de la traza de la falla CDD, y se distribuye a lo largo de 4 segmentos de falla ordenados en pares, que varían en su rumbo de norte a sur (segmentos CRCH1, 2, 3 y 4 en la Figura 20). La actividad tectónica a lo largo de estos segmentos de fallas Cuaternarias ha exhumado en su bloque de piso los depósitos sedimentarios sin-tectónicos acumulados en la cuenca Cerro Colorado, formando un nuevo frente montañoso a lo largo de su rumbo (Spelz, 2008; Fletcher, 2009; Fletcher y Spelz, 2009;). Hacia el sur, el arreglo de escarpes Cuaternarios se proyecta oblicuamente hacia el frente montañoso de la Sierra El Mayor, hasta alcanzar una distancia de unos pocos cientos de metros de la traza de la falla CDD (segmento CDD2 en la Figura 20). En esta intersección las fallas formadoras de escarpes no cortan a la traza de la falla CDD, ni a ningún indicador litológico en su bloque de piso. Asimismo, los escarpes de falla Cuaternarios se encuentran ausentes a lo largo de la falla CDD hacia el norte de esta intersección, y por el contrario los escarpes son sumamente abundantes hacia el sur. Esta relación evidencia que el arreglo de escarpes Cuaternarios separa segmentos inactivos (CDD1) y activos (CDD2) de la Falla CDD en la figura 20 (Spelz, 2008).

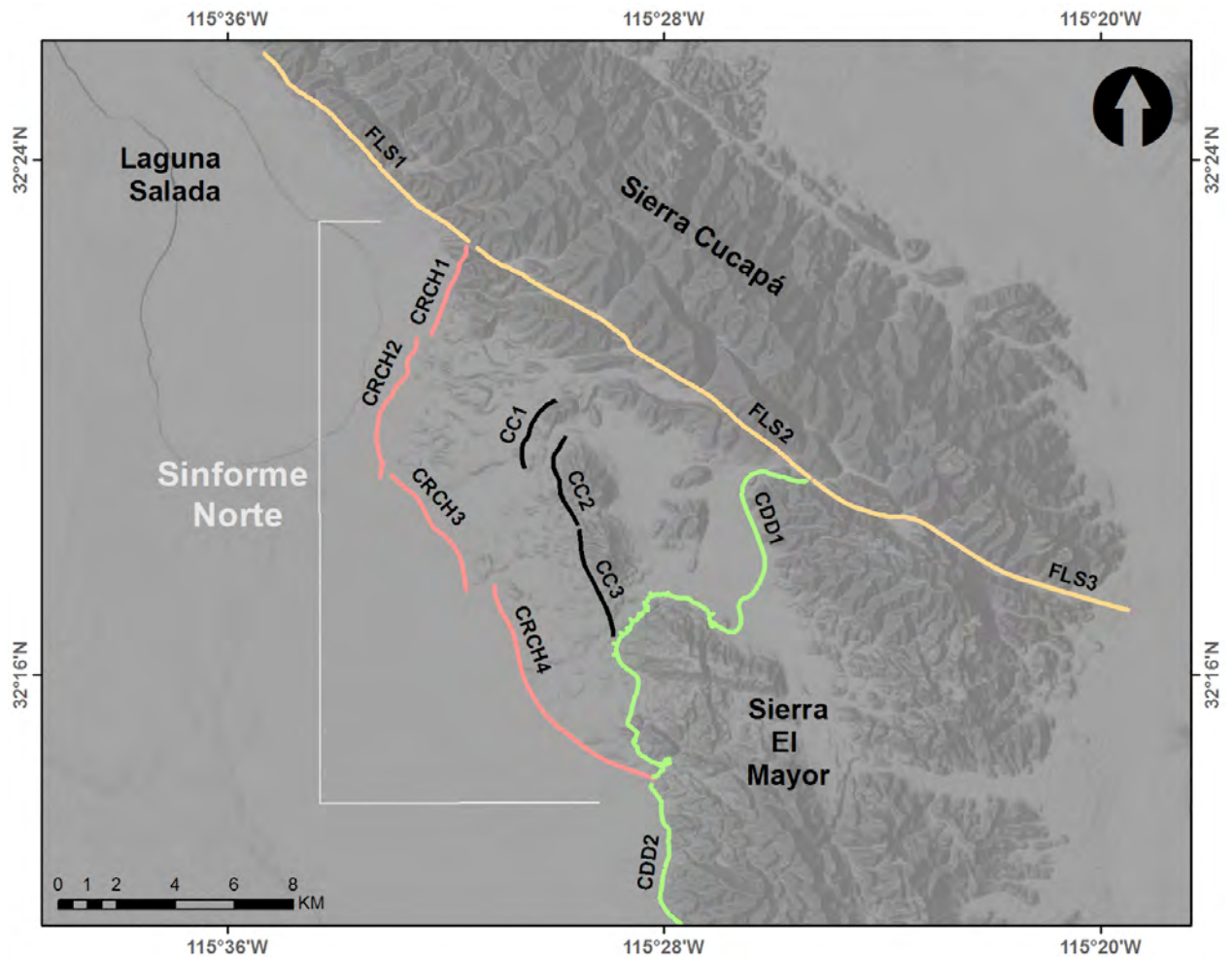


Figura 20. Sombreado del Continuo de Elevación Mexicano (15 m) de INEGI de la región del dominio Sinforme Norte. Línea anaranjada es la traza de la falla Laguna Salada dividida en segmentos (FLS1, FLS2 y FLS3). Línea verde= segmentos de traza de la Cañada David Detachment CDD1 segmento abandonado del Detachment y CDD2 en la región del antiforame norte, donde la traza de la falla principal está activa. Línea rosa= Segmentos de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos (CRCH1, CRCH2, CRCH3 y CRCH4 de norte a sur). Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado (CC1, CC2 y CC3). Como se puede apreciar en la figura, la región norte se caracteriza por una estructura sinforme, donde el arreglo de escarpes se aleja del frente de la Sierra El Mayor hasta por 12 km, donde actualmente se desarrolla un nuevo frente de montaña conformado por cuatro segmentos de falla CRCH1, 2, 3 y 4). Este nuevo sistema de fallas se aleja de la traza de falla inactiva (CDD1), por una distancia de hasta 12 km. Al Entre el nuevo arreglo de escarpes y la antigua traza de CDD, se encuentra el sistema de fallas Cerro Colorado (CC1 – CC3).

4.1.2 Falla Laguna Salada

Laguna Salada es una falla dextral-oblicua de alto ángulo con buzamiento hacia el oeste, la cual controla el levantamiento de la Sierra Cucapah a lo largo de su margen oeste (Figura 20). La falla Laguna Salada (FLS) se divide en tres segmentos principales, los cuales comparten el basamento cristalino del complejo plutónico-metamórfico de la Sierra Cucapah en su bloque de piso, pero se diferencian ya sea por cambios litológicos en el bloque de techo, o bien con base en las relaciones cortantes con otras fallas (figura 20).

El segmento FLS1 (figura 20), localizado hacia el norte a partir de la zona de intersección con el sistema de fallas Cañón Rojo-Chupamirtos, se caracteriza por poner en contacto rocas cristalinas Mesozoicas del bloque de piso, con sedimentos modernos de facies aluviales, eólicos y lacustres que se acumulan activamente al pie de la Sierra y en el depocentro de la cuenca LS.

El límite norte del segmento FLS2 está definido por la zona de intersección con la falla Cañón Rojo (figura 20). Aquí el bloque de techo de la FLS está compuesto por las rocas sedimentarias sin-tectónicas que rellenan la cuenca Cerro Colorado, y las cuales han sido levantadas en el bloque de piso del sistema de fallas Cañón Rojo-Chupamirtos. La secuencia sin-tectónica incluye la cubierta sedimentaria depositada de forma contemporánea a los eventos de fallamiento y se caracteriza por depósitos marinos y deltaicos de las Formaciones Imperial (Tim) y Palm Springs (Tps), respectivamente, los cuales son a su vez sobreyacidos por depósitos de abanicos aluviales de alto gradiente (Qof) derivados localmente de la Sierra Cucapah (Vazquez-Hernández, 1996; Dorsey y Martín Barajas, 1999; Martín-Barajas et al., 2001). Fletcher y Spelz (2009) describieron que al sur de esta intersección se presenta un frente montañoso activo a largo de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos.

El segmento FLS3, de la falla Laguna Salada se localiza al sureste a partir de la zona de intersección con la falla CDD, y se caracteriza por la presencia de basamento cristalino hacia ambos lados de la falla Laguna Salada, en donde las rocas cristalinas constituyen el bloque de piso de la falla CDD. Este segmento es mejor caracterizado como un frente montañoso relicto, donde algunas de las elevaciones topográficas compuestas por rocas sedimentarias que componen el norte de la sierra El Mayor son mucho mas altas que el propio basamento cristalino levantado en el bloque de piso a lo largo de dicho segmento (figura 20).

4.2 Sistema de fallas Cañón Rojo-Chupamirtos (CRCH)

Adyacente a la falla Laguna Salada, el segmento Norte de la falla CDD forma una corrugación sinformal al frente de montaña, la cual está compuesta por rupturas superficiales que definen la traza de dos fallas Cuaternarias principales en la región: 1) la falla Cañón Rojo y, 2) la falla Chupamirtos. A lo largo de su rumbo, ambas fallas contienen rocas y depósitos sedimentarios de la cuenca Laguna Salada en su bloque de techo, mientras que en su bloque de piso las fallas se encuentran exhumando la sección estratigráfica Plio-Pleistocénica depositada durante la subsidencia de la cuenca. Estos depósitos levantados definen el límite de un nuevo frente montañoso, el cual es separado por una distancia de hasta 12 km a partir del segmento inactivo de la falla CDD (CDD1 en la Figura 20). Este patrón estructural ha sido interpretado por Fletcher y Spelz (2009) como el resultado del abandono de la falla maestra a favor de nuevas fallas en el bloque de piso, proceso que a su vez predice el modelo de “Rolling-Hinge” para fallas de bajo ángulo (Wernicke y Axen, 1988; Buck, 1988).

El sistema de fallas Cañón Rojo-Chupamirtos, en el extremo NW de la Sierra El Mayor, está definido por una serie de escarpes Cuaternarios los cuales se encuentran íntimamente relacionados con la actividad tectónica más reciente a lo largo de la falla maestra de bajo ángulo CDD (Axen et al., 1999; Spelz 2008; Spelz et al., 2008; Fletcher y Spelz, 2009). Con base en su geometría, número de escarpes en el arreglo, y sus relaciones cortantes con las secuencias de depósitos sedimentarios lagunares y aluviales localizados a lo largo del frente montañoso, las rupturas superficiales del sistema Cañón Rojo-Chupamirtos se clasifican en 4 segmentos principales (Figura 20). Los segmentos están alineados, y sus áreas de traslape están definidas por zonas de complejidades estructurales caracterizadas por una deformación penetrativa.

4.2.1 Falla Cañón Rojo

Cañón Rojo es una falla normal con un rumbo y echado promedio de 026° y 60° , respectivamente. En su extremo norte la falla corta depósitos fanglomeráticos derivados localmente de la Sierra Cucapah y, al igual que la falla maestra CDD, la falla Cañón Rojo termina abruptamente contra la falla FLS (Spelz, 2002; Fletcher y Spelz, 2009). Hacia el sur, y a lo largo de su traza, la falla ha exhumado en su bloque de piso las rocas sedimentarias de las formaciones Imperial y Palm Springs, las cuales son sobreyacidas por depósitos de abanicos aluviales derivados localmente de las Sierras Cucapah y El Mayor.

Con base e su geometría y relaciones cortantes, la falla FCR se compone de dos segmentos principales:

1) El segmento norte (CRCH1; ver figura 22) se caracteriza por un arreglo discreto de entre 1 y 3 escarpes de falla sintéticos el cual, a partir de su intersección con la falla FLS, se extiende en dirección SW por una distancia de ~1.5 km sobre superficies de abanicos aluviales holocénicos y modernos. El segmento CRCH1 termina en una zona de complejidad estructural del tipo “cola de caballo”, en donde la deformación se vuelve penetrativa. En esta zona el arreglo de escarpes alcanza un ancho de hasta 650 m, y esta compuesto por un total de hasta ~16 escarpes individuales sintéticos y antitéticos. La zona de deformación penetrativa se localiza en el bloque de piso de la falla Cañón Rojo. A partir de este punto la ruptura presenta un salto lateral hacia el Oeste, definiendo una zona de acomodamiento a partir de la cual inicia el segundo segmento de la falla (CRCH2; ver figura 20).

El segmento CRCH2 mide alrededor 3.5 km de longitud, y presenta un rumbo sub-paralelo al segmento CRCH1, que se proyecta en dirección SW. En este segmento los escarpes que definen la traza de la falla Cañón Rojo se tornan nuevamente estrechos y bien definidos, cortando unidades aluviales más jóvenes (Q1 y Q2) a lo largo de toda su longitud. En su extremo sur, el segmento CRCH2 cambia de rumbo y se curva hasta volverse casi paralelo a la falla Chupamirtos, la cual presenta un rumbo NW de 326° en promedio (Figura 20). El segmento CRCH2 termina en lo que parece ser una falla de relevo, la cual separa a las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos a lo largo de una distancia de tan solo ~200 m.

4.2.2 Falla Chupamirtos

La falla Chupamirtos, nombrada por Barnard (1968), esta definida por un arreglo discreto de escarpes sintéticos con un rumbo promedio de 326° , los cuales definen una pronunciada curvatura del nuevo frente montañoso en dirección SE. El arreglo de escarpes se proyecta oblicuo a la Sierra El Mayor, formando un ángulo de 55° con respecto del frente montañoso y la traza de la falla CDD. El sentido de cizalla de la falla Chupamirtos aún no ha sido determinado con exactitud, sin embargo los depósitos aluviales que se encuentran levantados en su bloque de piso proporcionan una sólida evidencia morfológica de que la falla acomoda una importante componente de desplazamiento normal (Spelz, 2008).

Con base en su geometría y las relaciones cortantes con los depósitos de abanicos aluviales, la falla Chupamirtos consta de dos segmentos principales, que de norte a sur son nombrados CRCH3 y CRCH4, respectivamente.

El segmento CRCH3 comienza en el punto de inflexión entre las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos, justo en donde el arreglo de escarpes Cuaternarios cambian abruptamente de rumbo, proyectándose en dirección Sureste a lo largo de una distancia de 4.1 km. Las rupturas superficiales a lo largo de este segmento cortan depósitos aluviales Pleistocénicos (Q5-Q6), los cuales muestran una deformación penetrativa. En este caso, y en contraste con la zona de complejidad estructural descrita en el segmento CRCH1, la zona de deformación penetrativa se localiza en el bloque de techo del sistema de falla, teniendo un ancho de 450 m a lo largo de una distancia de 2.5 km. El segmento CRCH3 finaliza justo en la zona de terminación de esta complejidad estructural, zona donde el arreglo de escarpes tiene un salto lateral hacia el Este. formando una rampa y una estructura de relevo a partir de la cual comienza el segmento CRCH4 (Figura 20).

El segmento CRCH4 tiene una longitud de ~7.7 km, distancia a lo largo de la cual el arreglo de escarpes continúa hacia el SE en sentido oblicuo a la Sierra El Mayor (figura 20). El arreglo de escarpes a lo largo de este segmento es típicamente angosto (~40 m), y consta únicamente de escarpes sintéticos los cuales, al igual que los segmentos CRCH1 y CRCH2 en el norte, cortan depósitos aluviales holocénicos muy jóvenes (Q1-Q2). Hacia el sur, y por una distancia de ~1 km, los escarpes modernos se encuentran sepultados por sedimentos eólicos, y borrados por la misma actividad de los cauces modernos (Q1) en un sistema fluvial muy amplio. Pocos cientos de metros mas adelante, los escarpes modernos vuelven a aflorar y su rumbo se vuelve paralelo a un camino de terracería, el cual ha sepultado de manera intermitente la traza principal del arreglo de escarpes. Con base en la separación vertical, y el análisis de la morfología de arroyos y cauces desplazados, los escarpes a lo largo del segmento CRCH4 acomodan una deformación oblicua con componentes de desplazamiento normal y sentido lateral derecho.

La zona de intersección del segmento CRCH4 con la Sierra El Mayor, define el limite sur del segmento abandonado de la falla CDD. La cartografía detallada muestra que en esta zona el arreglo de jóvenes escarpes del segmento CRCH4 no corta la traza de la falla CDD, ni a ningún otro indicador litológico en su bloque de piso, sino que por el contrario cambia de rumbo y se continúa en dirección sur paralelo a la traza curvilínea de la falla maestra de bajo ángulo a lo largo del frente montañoso (Figura 20).

Uno de los sismos históricos más recientes que se ha presentado en la región el 30 de Diciembre de 1934. Leeds (1979) propone que el epicentro del sismo de magnitud local (M_L) 6.5 fue cercano al cuarto segmento de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos (CRCH4) y el mecanismo focal determinado por Doser (1994) indica cizalla pura lateral derecha en un plano de deslizamiento Noroeste. Fletcher y Spelz (2009) han sugerido la posibilidad de que el evento sísmico $M_L = 6.5$ de 1934 no haya producido ruptura superficial, o bien que esta ruptura no sea asociada a la falla Chupamirtos que compone el segmento sur de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos, debido a que las caras libres de los escarpes encontrados por ellos en unidades tan jóvenes como Q3 de dicha región, registran un alto grado de degradación en comparación con esos registrados en el segmento CRCH1 relacionados al sismo de 1892.

4.3 Sistema de fallas Cerro Colorado

La cartografía detallada y las imágenes de alta resolución, permitieron identificar un nuevo sistema de rupturas superficiales en la porción central de la cuenca de Cerro Colorado. El sistema se localiza a una distancia de 6 km al oeste del frente de montaña de la Sierra El Mayor, entre la traza principal del Detachment Cañada David y las fallas Cañón Rojo – Chupamirtos, y está caracterizado por fallas normales con un rumbo de 340, las cuales cortan ambos flancos del alto topográfico de Cerro Colorado (Figura 20).

Debido a la complejidad del área se consideraron tres expresiones de esta falla para definirla: 1) litológico, 2) topográfico y 3) escarpes, fallas y fracturas.

Las fallas al norte del sistema de fallas de la cuenca Cerro Prieto se determinaron por contactos litológico entre Formación Imperial en el bloque de techo y Formación Palm Spring Conglomerático en el bloque de piso (CC1). La falla al centro-norte (CC2) tienen un plano de contacto entre Formación Palm Spring Conglomerático en su bloque de piso y Formación Palm Spring en el bloque de techo, y debido a que la expresión litológica no continúa hacia el sur, pero los rasgos topográficos, fallas y fracturas sí, se considera que la proyección de la falla Cerro es hacia el sur, donde se encuentran facies conglomeráticas a los dos lados de la falla, ya que litológicamente la estructura no esta muy bien definida (CC3). Otras características tales como una montaña de Qof levantado al medio de la cuenca, la presencia de escarpes y fallas en Psc Palm Spring Conglomerático, indican que la posición de la falla se une con la falla Cañada David Detachment, justo en la cresta de un megamulion anticlinal.

4.4 Relaciones Cortantes

El arreglo de escarpes Cuaternarios en el dominio sinforme norte está estrechamente relacionado con los sistemas principales de falla que en su conjunto definen el nuevo frente de montaña: Fallas Laguna Salada, Cañón Rojo y Chupamirtos. Dicho arreglo se distribuye en segmentos perfectamente establecidos sobre superficies de abanicos aluviales los cuales fueron clasificados considerando las características geomorfológicas y estructurales establecidos por Spelz (2008), y se están descritos en la metodología.

4.5 Segmentos de falla Laguna Salada

Los segmentos de la falla Laguna Salada (FLS1 –FLS3 en la figura 20) que se ubican al frente de la Sierra Cucapah presentan escarpes modernos en las unidades holocénicas de la región. Este arreglo de escarpes modernos está íntimamente relacionado con el evento sísmico del 4 de abril del 2010. Este evento se desplazó de Noroeste a Sureste al frente de la Sierra Cucapah a través de un arreglo de 7 fallas. Tuvo una magnitud M_w 7,2 y rompió ~120 km de superficie, generando un desplazamiento oblicuo dextral de 2 m (Fletcher, 2014; Wei, et al., 2011; Terán et al., 2015)

4.6 Segmentos de falla Cañón Rojo – Chupamirtos

CRCH1 es el segmento de fallas Cuaternarias más al norte del dominio sinforme, el cual, al igual que la traza de la falla abandonada del CDD, intersecta contra la falla Laguna Salada (Figura 21). Desde la zona de intersección, y a lo largo de su rumbo, el arreglo de escarpes Cuaternarios del segmento CRCH1 se proyecta hacia el sur de manera discreta y ordenada por una distancia de ~2.4 km, cortando únicamente unidades aluviales Holocénicas Q1 - Q3 (Figura 21). Con base en la similitud de sus características geomorfológicas, así como el tipo y la densidad de la vegetación, se considera que estas unidades aluviales se formaron bajo las mismas condiciones climáticas. No obstante la diferencia fundamental entre las unidades Q1 y Q2, es que la segunda se encuentra generalmente en el bloque de piso del arreglo de rupturas superficiales, y por lo tanto su elevación relativa es mayor que la de Q1. Los escarpes dominantes de la región son sintéticos (con buzamiento hacia el W), y en algunas secciones el desplazamiento vertical va desde los 2 hasta los 4 m (Spelz, 2008). El arreglo de escarpes se torna intermitente justo en las regiones Q1 que presentan efectos erosivos derivados de las corrientes activas (1.2 km de sur a norte sobre el trazo de CRCH1) las cuales han borrado el registro de escarpes modernos

en estas unidades. Este efecto se repite 1.5 km más al sur, justo donde termina CRCH1 y se registra un salto a la derecha, para continuar en el siguiente segmento CRCH2 (Figura 21).

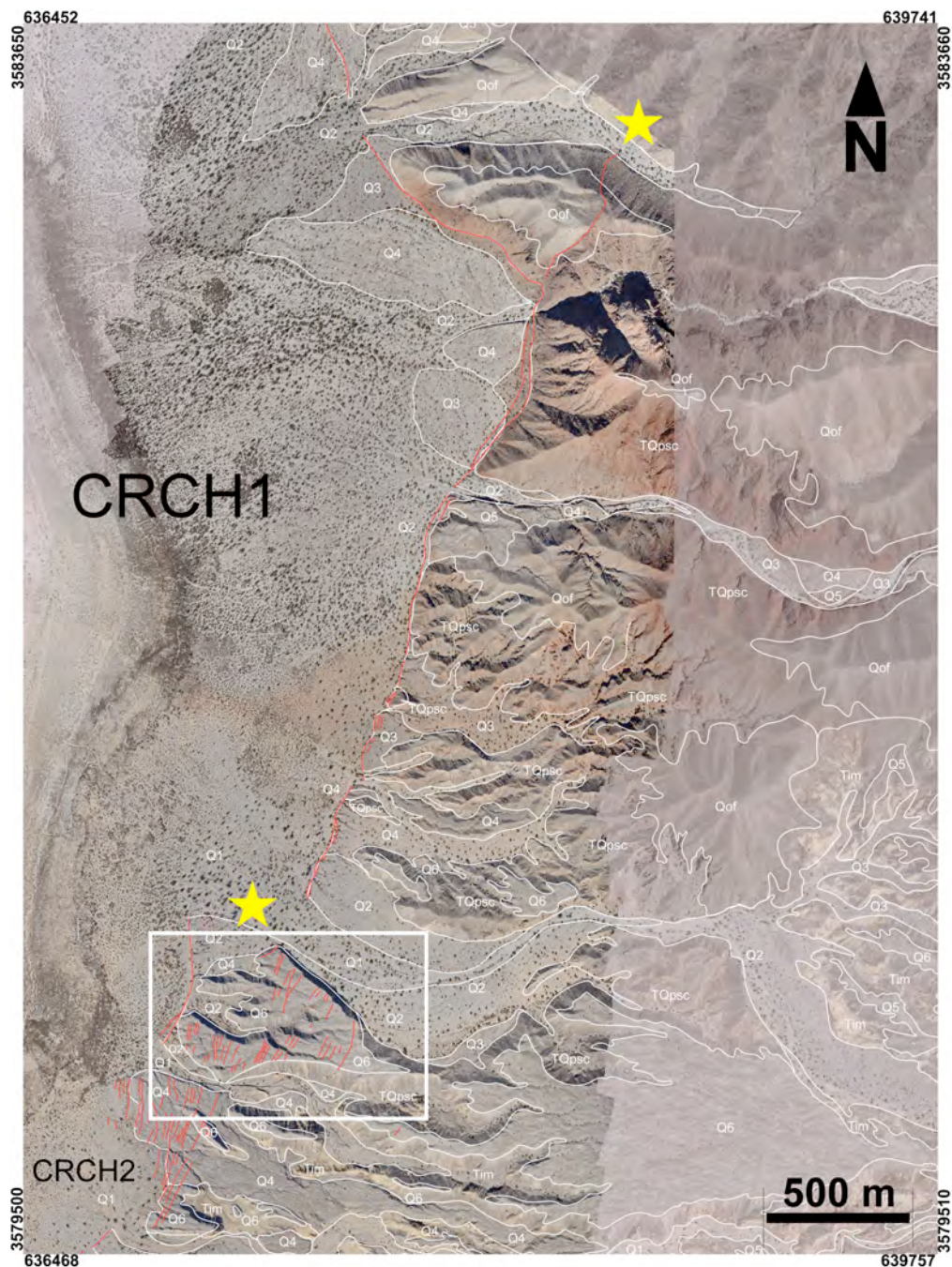


Figura 21. El segmento CRCH1 se delimita por las estrellas amarillas. El arreglo de escarpes cuaternarios en este segmento se torna ordenado, registrando pocos escarpes muy unidos entre sí, cortando únicamente unidades aluviales holocénicas. El norte del segmento CRCH1 intersecta los escarpes de falla relacionados a la falla Laguna Salada. Esta región se caracteriza por un color rojizo en la litología derivado del registro sedimentario Palm Springs conglomerático. El recuadro blanco indica la unidad aluvial que presenta la complejidad estructural ubicada en el segmento CRCH2, donde la deformación penetrativa se ve reflejada en un arreglo de escarpes en unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) mostrada en la figura 22. Las coordenadas se muestran en Universal Transversal de Mercator (UTM).

El segmento CRCH 2 tiene una longitud aproximada de 3.5 km compuesta por un arreglo de escarpes sintéticos a la falla (su cara libre proyecta en dirección de la Laguna Salada). CRCH 2 comienza con una complejidad estructural conformada por una superficie aluvial pleistocénica (Q6) que presenta una deformación penetrativa en el bloque de piso por aproximadamente 1 Km. Dicha unidad presenta una disminución en su altura relativa, la cual va decreciendo en dirección del transporte tectónico. Esta deformación se compone por un arreglo de al menos 16 escarpes en un área de 650 m aproximadamente (figura 22). En su extremo sur, el segmento CRCH2 cambia de rumbo y se curva hasta volverse casi paralelo a la falla Chupamirtos, la cual presenta un rumbo NW de 326° en promedio por ~ 2.5 km, hasta terminar en lo que parece ser una falla de relevo, la cual separa a las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos a lo largo de una distancia de tan solo ~ 200 m (Figura 23).

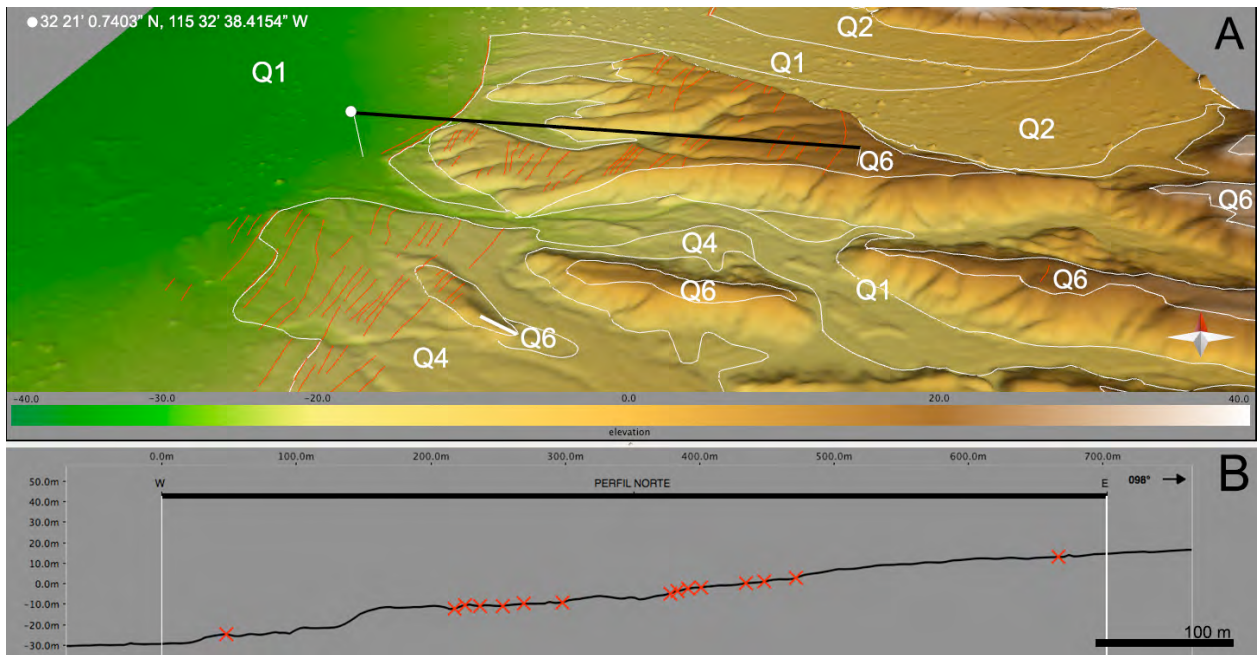


Figura 22. Modelo Digital del Terreno (11.5 cmpp) de la zona de complejidad estructural ubicada al inicio del segmento CRCH2. Dicha complejidad esta caracterizada por un arreglo de hasta 16 escarpes de falla distribuidos en un ancho de aproximadamente 650 m. En esta región la altura de las superficies pleistocénicas Q6 y Q4 muestran una disminución de su altura relativa en dirección W (de hasta 40 m), en respuesta a la deformación penetrativa del arreglo de escarpes que cortan dichas superficies. Esta deformación se presenta en el bloque de techo de la falla. La línea negra al centro del abanico aluvial Q6 corresponde al perfil topográfico que se muestra bajo la imagen, las cruces en rojo sobre la gráfica del perfil corresponde a cada uno de los escarpes registrados.

El desplazamiento vertical producido por arreglo de escarpes Cuaternarios a lo largo de los segmentos CRCH 1 y CRCH 2, y que cortan las unidades Q2, ha producido la caída del nivel base, el cual se define como la altura por debajo de la cual un arroyo no puede erosionar su propio lecho (Bull, 1991; Bull, 2007). Como resultado de la caída en el nivel base, la corriente a lo largo de los arroyos adquiere más fuerza y genera un mayor poder de erosión a partir del quiebre en la elevación, produciendo una migración de la pendiente del arroyo en dirección contraria al flujo de la corriente. Este efecto de erosión remontante ha afectado los escarpes relacionados con el evento de 1892. En este estudio se ha identificado que los canales activos de las unidades aluviales holocénicas más jóvenes que registran dicho evento (Q1 – Q3) han registrado la migración del escalón formado por la ruptura, alrededor de 670 m en dirección del frente de montaña de la Sierra El Mayor (Figura 24), ocasionando la pérdida de evidencia del sismo de 1892 en aproximadamente un 50%.

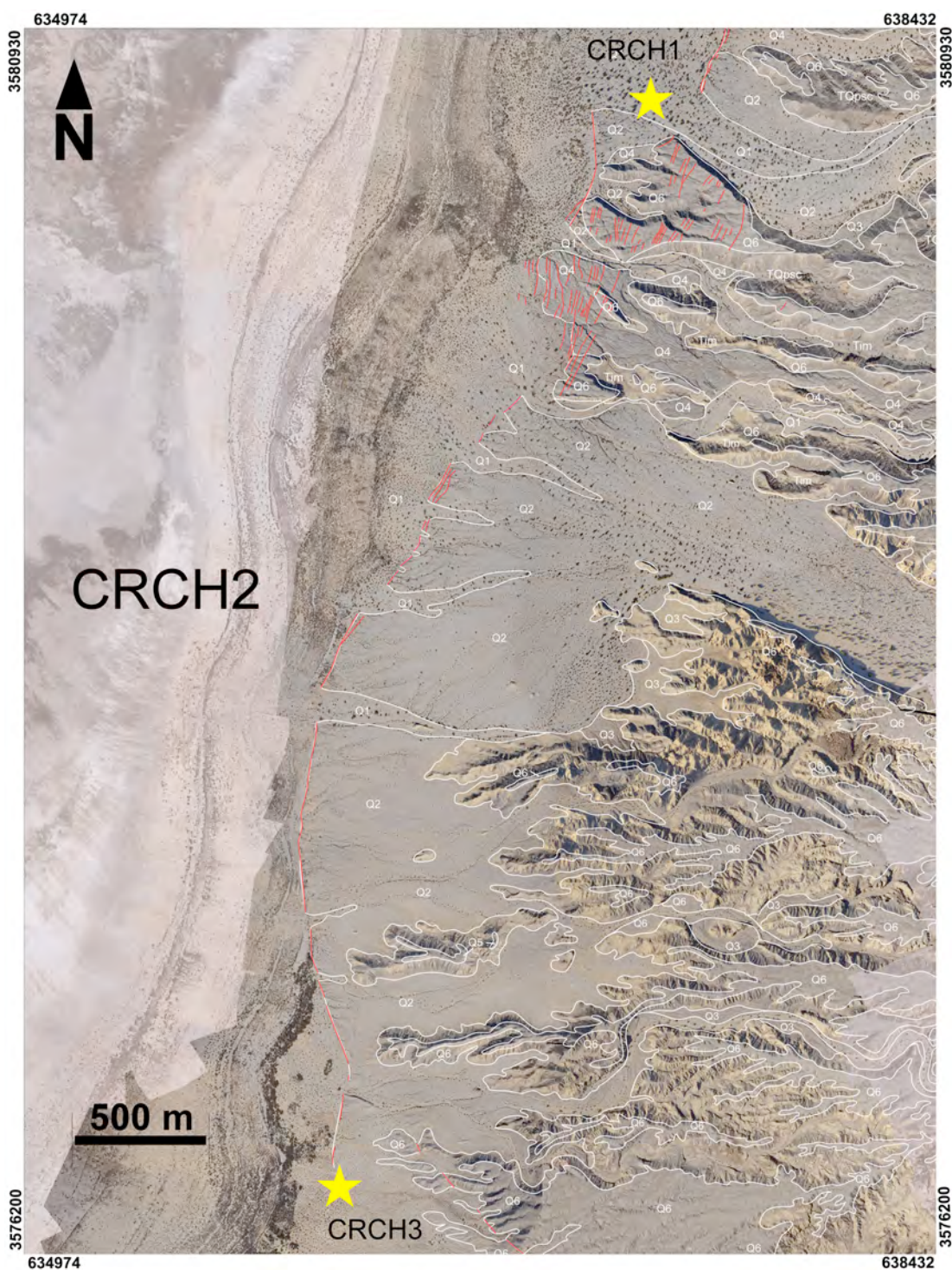


Figura 23. Fotografía aérea de alta definición (30 cm/píxel) mostrando la longitud del segmento CRCH2 (un poco más de 3 km), el cual se encuentra delimitado por las estrellas de color amarillo. El arreglo de escarpes comienza de forma desordenada al norte, donde la complejidad estructural se manifiesta como un amplio arreglo de escarpes desordenados que rompen las unidades pleistocénicas presentes en el segmento (Q4 y Q6). Posteriormente, el arreglo se torna sencillo cortando unidades holocénicas (Q1, Q2 y Q3). Por este motivo el arreglo de escarpes que se despliega al sur por 4 km a través de este segmento se relaciona directamente con el evento de 1892. La intermitencia de rupturas superficiales deriva del efecto erosivo por remonte ocasionado por los canales activos de las unidades aluviales más jóvenes, los cuales han borrado o recorrido la pendiente generada por la ruptura superficial en dirección de la montaña.

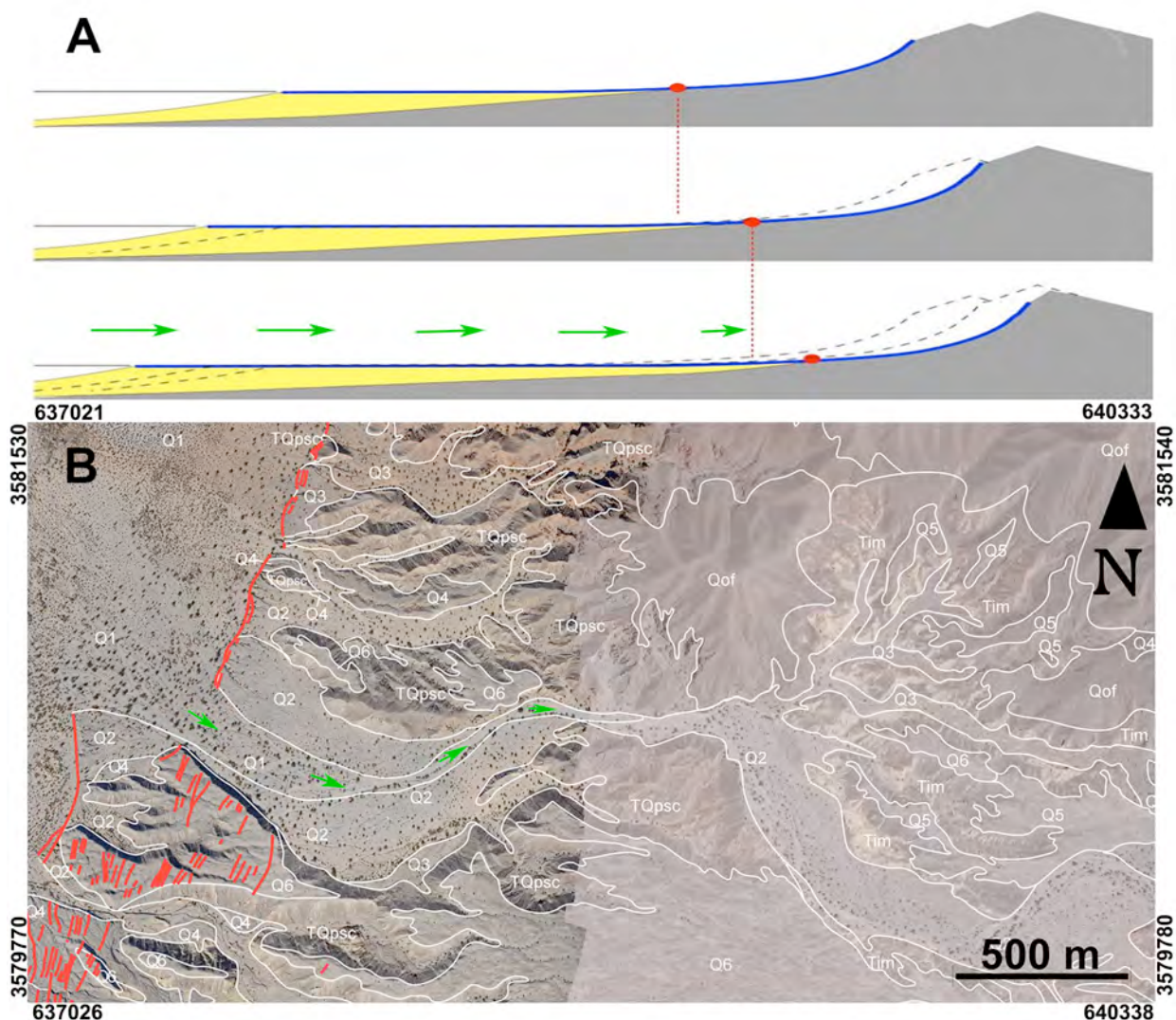


Figura 24. Efecto de erosión remontante sobre los escarpes de falla relacionados con el evento de magnitud $M_w = 7.2$ de 1892. A) secciones transversales que muestran el modelo esquemático del efecto de la erosión remontante. El punto rojo indica la ubicación de la pendiente generada por la ruptura superficial resultado del sismo en los diferentes momentos. Las flechas verdes indican la dirección del movimiento de la pendiente con dirección del frente montañoso. La línea punteada es el indicador del material afectado por la erosión, el cual termina siendo depositado en la región marcada en amarillo, como respuesta a la actividad a lo largo de los canales activos. B) imagen aérea de alta resolución HD (30 cm/píxel) en la cual se aprecia el efecto de la erosión remontante en la región comprendida entre los segmentos de falla CRCH1 y CRCH2. Las flechas de color verde indican el retroceso del nivel base de erosión en dirección del frente de montaña. Este efecto erosivo ha borrado los escarpes originales generados por el evento 1892, recorriendo el nivel base alrededor de 1 km en dirección de la sierra El Mayor.

El segmento CRCH3 comienza en el punto de inflexión entre las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos, justo en donde el arreglo de escarpes Cuaternarios cambian abruptamente de rumbo, proyectándose en dirección Sureste a lo largo de una distancia de ~ 4.1 km (Figura 25). Este cambio en la dirección de la falla responde a la falla Chupamirtos, identificada por Barnard (1968). El segmento CRCH3 se caracteriza por un arreglo de escarpes Pleistocénicos que únicamente cortan unidades aluviales Q6. La proyección del arreglo es ordenado y angosto de N a S por ~ 1.7 km, para posteriormente tornarse desordenado, debido a que los escarpes se alejan unos de otros, logrando que el arreglo tome un ancho de ~ 450 m, a través de una longitud de ~ 2.5 km sobre unidades Pleistocénicas. Esta región presenta el mismo patrón de deformación penetrativa que la complejidad estructural registrada en el segmento CRCH2, solo que la complejidad se encuentra en el bloque de techo del sistema de fallas (Figura 26). El segmento CRCH3 finaliza justo en la zona de terminación de la complejidad estructural, zona donde el arreglo de escarpes registra un salto lateral hacia el Este, formando una rampa y una estructura de relevo a partir de la cual comienza el segmento CRCH4 (figura 25).

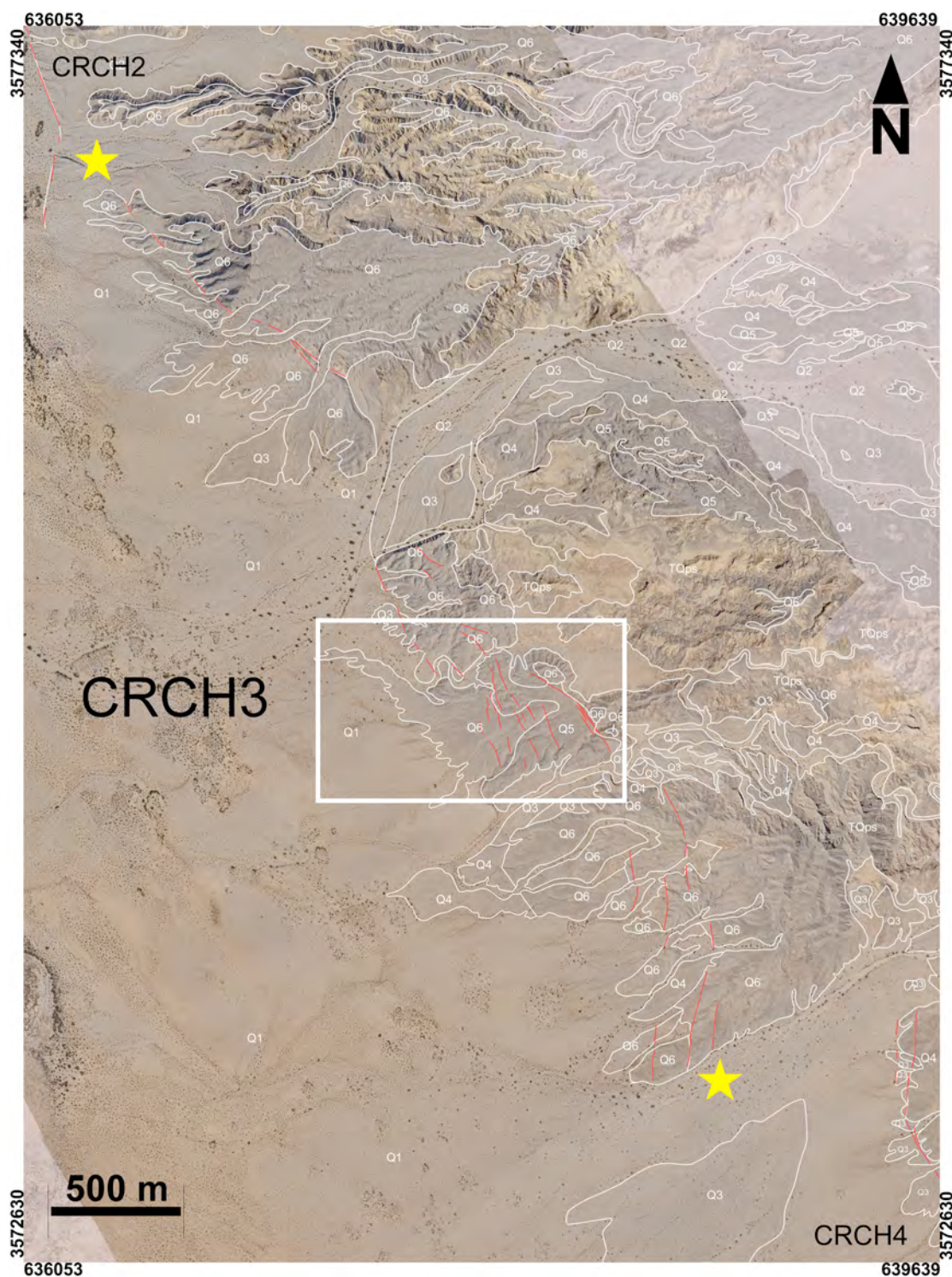


Figura 25. Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp), la cual muestra el Segmento CRCH3 tiene una longitud aproximada de 3.5 km y está delimitado por las estrellas amarillas. En esta región no existe evidencia sísmica Holocénica, las unidades cortadas por el arreglo de escarpes cuaternarios son únicamente pleistocénicas (Q4 y Q6), por esto se considera que esta región está cargada de esfuerzos diferenciales. En este segmento dicho arreglo se presenta en baja densidad con un estilo de deformación particionada donde tres grupos de escarpes proyectan en la misma dirección con distancias entre sí de ~100 m. El recuadro de color blanco (figura 28) muestra la unidad aluvial Pleistocénica (Q?) que presenta la complejidad estructural en el límite sur del segmento de falla, la cual registra un estilo de deformación penetrativa a diferencia del resto del segmento (ver Figura 28).

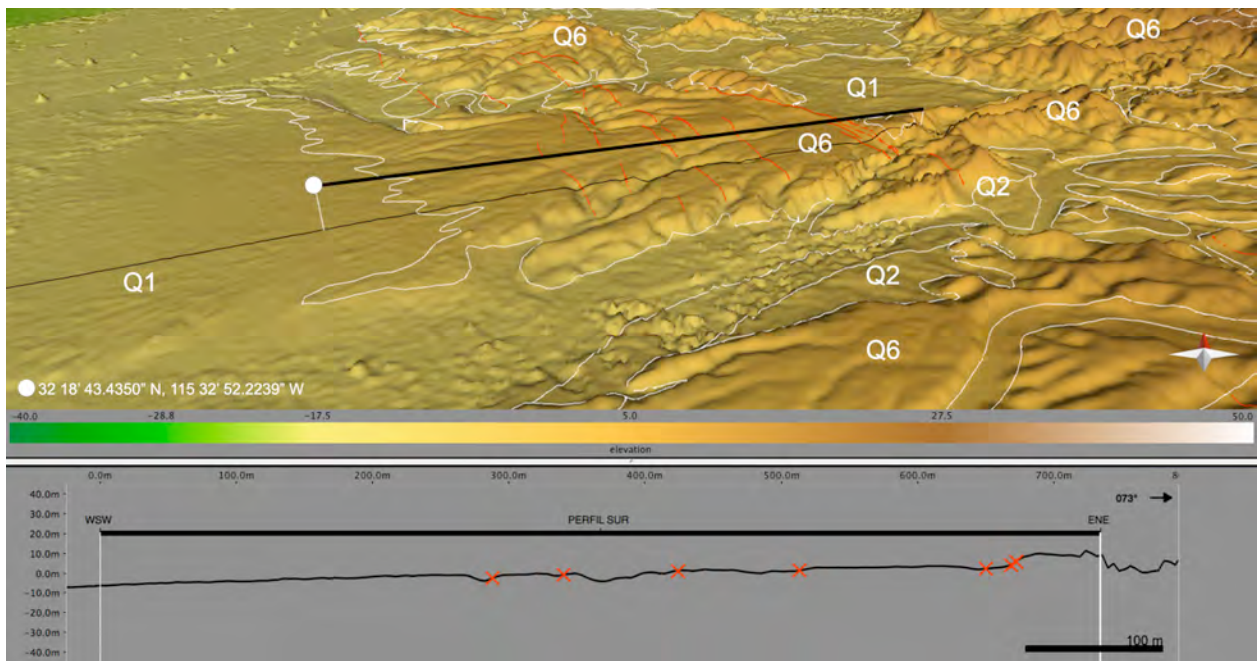


Figura 26. A) Modelo Digital del Terreno eBee (11.5 cm/píxel) de la zona de complejidad estructural en el límite sur del segmento de falla CRCH3. La deformación penetrativa en esta región repite el mismo patrón que en el norte (i.e., en el límite entre los segmentos CRCH1 y CRCH2, con la salvedad que en esta región se localiza en el bloque de techo del arreglo de fallas). En esta zona, la complejidad estructural está caracterizada por un conjunto de hasta 9 escarpes sintéticos y alineados a la falla maestra, que producen una disminución progresiva en la altura relativa del abanico aluvial Q6 en dirección de la cuenca Laguna Salada (aproximadamente de 20 m). La línea de color negro representa el perfil topográfico que se muestra en la figura B. B) perfil topográfico a través del abanico aluvial Q6, el cual muestra una disminución progresiva de la elevación a razón de la deformación penetrativa registrada en la región. Las cruces en rojo representan el arreglo de escarpes que componen la deformación penetrativa.

El segmento CRCH4 es el más extenso y cuenta con una longitud total de 6 km. En este trabajo y para una mejor explicación, se optó por dividirlo en 2 secciones: CRCH-N y CRCH-S.

El segmento CRCH4-N comienza a partir de una rampa de relevo producto de un salto lateral izquierdo del arreglo de escarpes, y se caracteriza por una secuencia de escarpes que proyectan discretamente por ~7.7 km hacia el SE, en sentido oblicuo a la Sierra El Mayor (Figura 27).

El arreglo de escarpes a lo largo del segmento CRCH4 es típicamente angosto (~40 m) y consta únicamente de escarpes sintéticos. De norte a sur y a lo largo de una distancia de ~900 m a través del segmento CRCH4-N, es posible identificar que las únicas unidades aluviales afectadas son únicamente superficies del Holoceno (Q3). Hacia el sur y por una distancia de ~1 km más, el arreglo de escarpes ha sido borrado o se encuentra sepultado bajo arenas y sedimentos eólicos; esto en respuesta a las acciones climáticas derivadas de la actividad de los cauces modernos en un sistema fluvial muy amplio (revisar la figura 27). Al sur, el arreglo de escarpes corta unidades tan jóvenes como Q1 y Q2. En esta

sección se puede apreciar el arreglo de escarpes moderno de una forma evidente. Este segmento fue determinado por la diferencia de altura entre las unidades (~30 cm), ya que el efecto de la iluminación genera un contraste sobre la cara libre del escarpe moderno, el cual resulta sintético a la traza principal del CDD (con buzamiento hacia el W). En la figura 28 se puede apreciar el arreglo de escarpes proyecta en dirección N – S, en una sola línea que toma forma ondulada (de “S” invertida). Mas adelante, el arreglo de escarpes continúa cortando unidades Pleistocénicas por 1 km más, hasta finalizar en la región norte del segmento CRCH4-N. Con base en la separación vertical, y el análisis de la morfología de arroyos y cauces desplazados, los escarpes a lo largo del segmento CRCH4 acomodan una deformación oblicua con componentes de desplazamiento normal y sentido lateral derecho.

El segmento CRCH4 Sur proyecta con un rumbo NW 40 SE, por una distancia de 3 km hasta topar con el frente de montaña en la Sierra El Mayor, en la región de Domo Monte Blanco. Los primeros 1.5 km constan de un arreglo discreto de escarpes que deforman penetrativamente la región, cortando unidades aluviales modernas (Q1 y Q2), holocénicas (Q3 y Q4) y pleistocénicas (Q5). En los siguientes 1.5 km la deformación se torna mas particionada cortando desde las unidades más jóvenes (Q1) hasta las de mayor edad (Q6). En la parte sur del segmento el arreglo parece tomar dos direcciones: una continúa en dirección SE por lo que resta del segmento, hasta su intersección con el pie de montaña. La otra sección toma un rumbo al sur, cortando únicamente abanicos pleistocénicos (Q5); aunque se infieren escarpes modernos en unidades Q1. Mismos que han sido borrados debido a los efectos erosivos de los canales activos (figura 29). Algunas secciones de los escarpes holocénicos asociados a este evento se ubican paralelos al camino de terracería, lo que hace difícil su identificación (Figura 30).

La presencia de escarpes de falla cortando las unidades aluviales mas jóvenes localizadas a lo largo del segmento CRCH4, son evidencia de que este segmento de falla rompió durante el evento ML = 6.5 de 1934, siendo este segmento el limite norte de la ruptura.

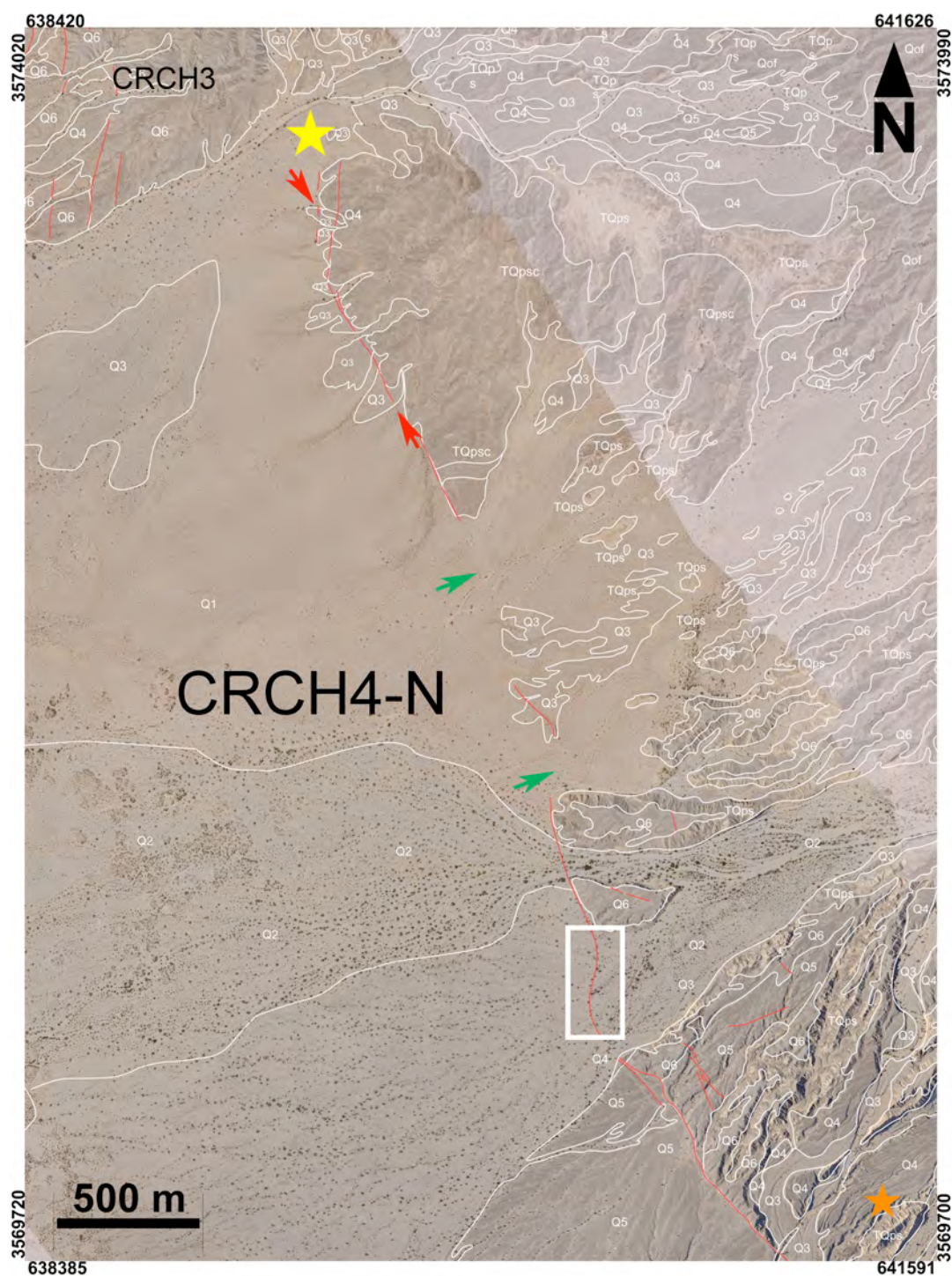


Figura 27. Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp), mostrando la localización y extensión del segmento CRCH4 norte, el cual se delimita por una estrella amarilla al norte y una estrella anaranjada al sur. En la parte norte de CRCH4 se puede apreciar la presencia de escarpes modernos en abanicos aluviales holocénicos (Q3), indicados entre flechas rojas. Los abanicos modernos (Q1 y Q2) al centro de la imagen se puede apreciar que aproximadamente 1 km no se registran escarpes modernos, debido a que en esta región estas unidades han sido afectadas por el proceso de erosión remontante producida por el descenso del nivel base (regiones indicadas por flechas verdes). El recuadro blanco señala la figura 28 que muestra un escarpe holocénico relacionado al evento 1934 Mw= 6.5. Es posible que dicho escarpe haya sido alterado o borrado por efectos de la erosión remontante.

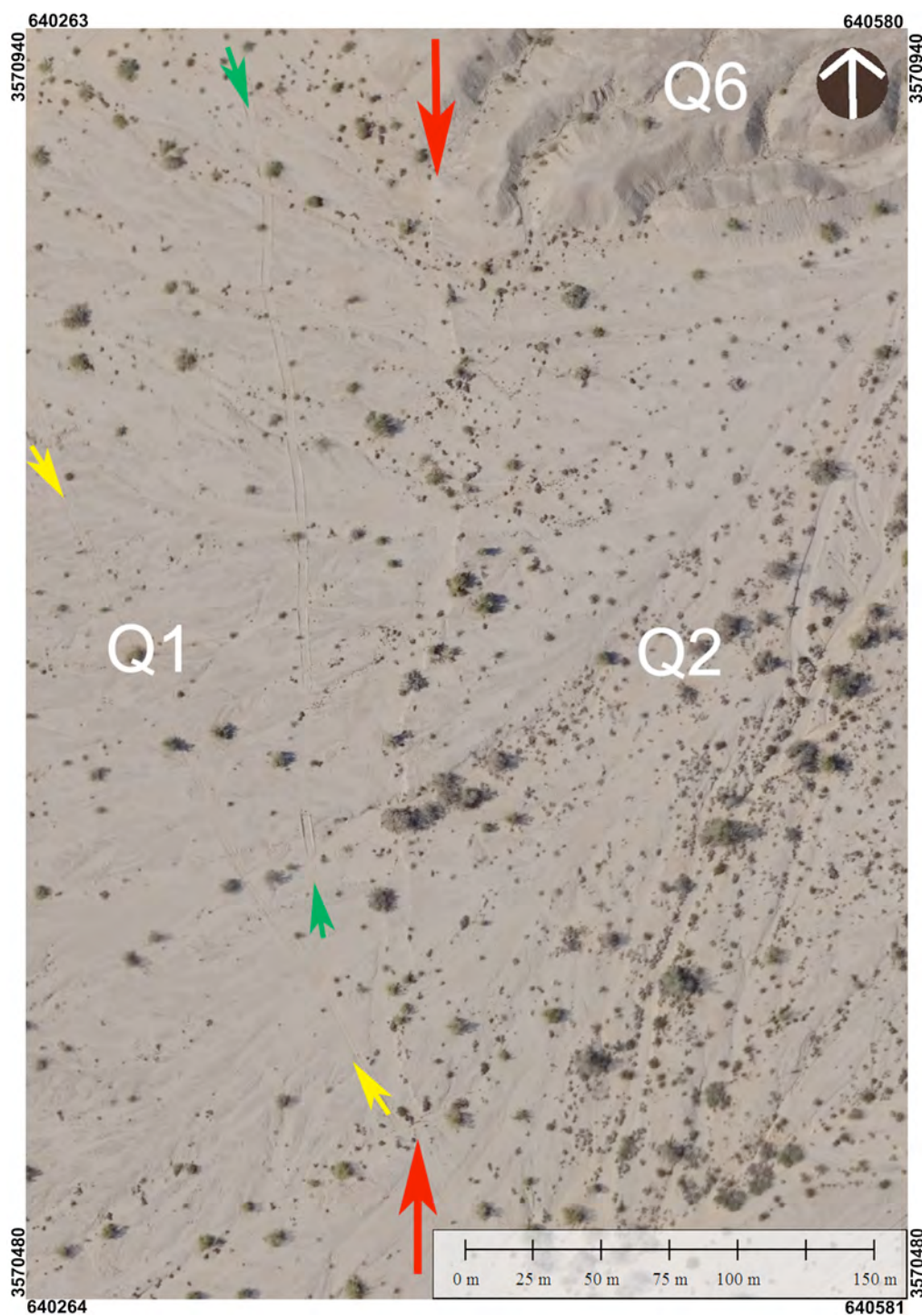


Figura 28. Fotografía aérea de alta definición eBee (11.5 cmpp) mostrando la ruptura superficial asociada con el evento sísmico ML=6.5 de 1934. Al centro de la imagen, y delimitado por las flechas de color rojo, se puede observar el escarpe de falla en forma de S invertida. El escarpe es fácilmente apreciable debido al contraste de iluminación generado por la diferencia de altura entre los bloques de techo y de piso localizados hacia la izquierda y derecha de la falla, respectivamente. Al oeste del escarpe entre flechas verdes se puede observar un camino de terracería paralelo al rumbo del escarpe, y otro camino oblicuo más al oeste entre flechas amarillas. Nótese como el bloque de techo, caracterizado por una superficie Q1, parece contar con menos vegetación que el bloque de piso el cual esta definido por una superficie aluvial Q2.

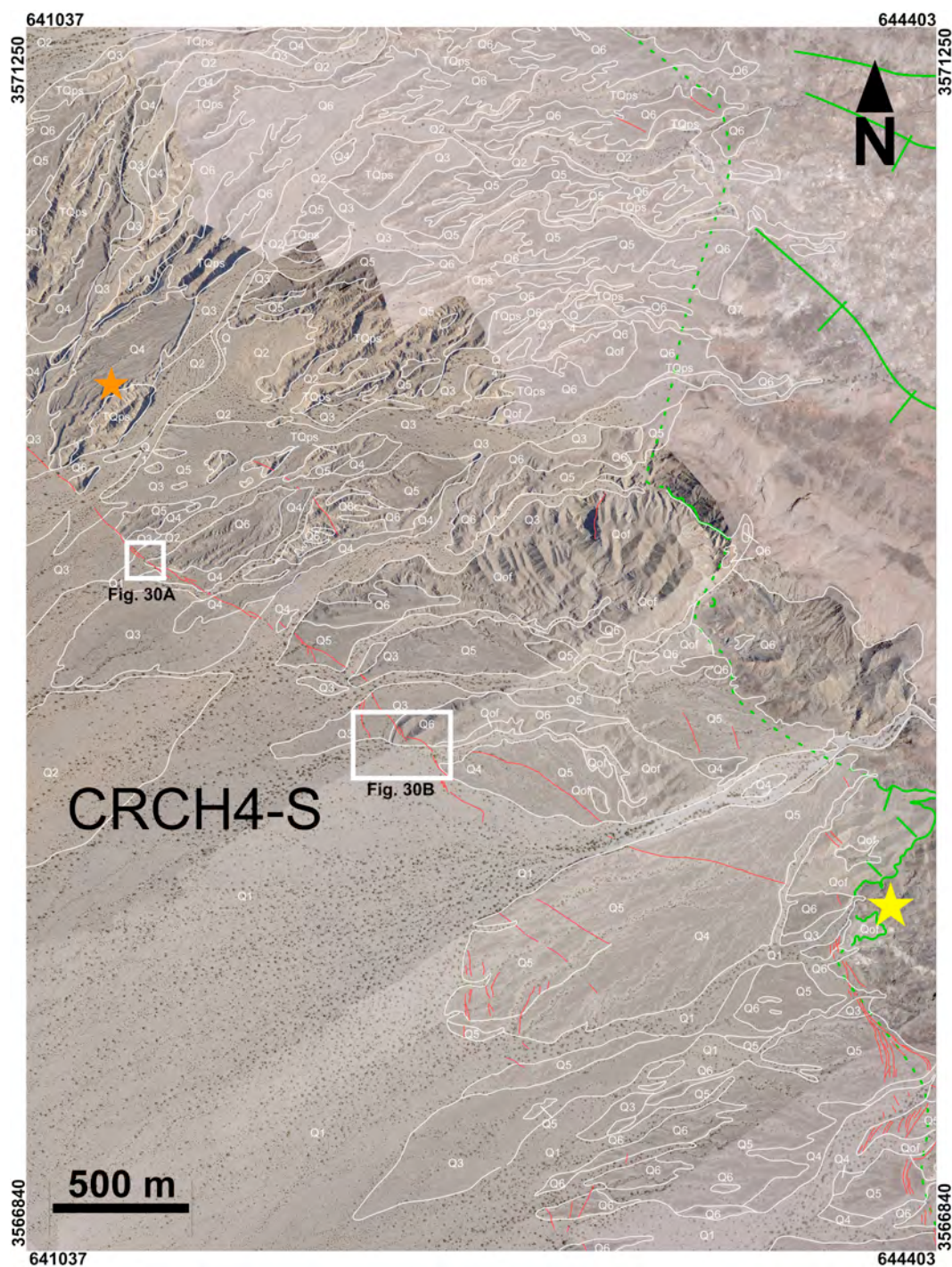


Figura 29. Imagen aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que muestra el Segmento CRCH4-S. El segmento CRCH4-S tiene una longitud aproximada de 3.5 km, desde la estrella anaranjada hasta la estrella amarilla. En esta sección el arreglo de escarpes modernos proyecta ordenado y alineado en dirección NW – SE. La última sección del segmento (aproximadamente 1.5 km) se torna desordenado y los escarpes comienzan a tomar una distancia de 500 m entre ellos. Una sección del segmento se proyecta al sur cortando principalmente unidades pleistocénicas, aunque se infieren escarpes modernos cortando las unidades aluviales holocénicas. La otra sección del segmento proyecta en dirección SE hasta topar contra el basamento cristalino de la Sierra El Mayor. Los recuadros de color blanco muestran casos donde el arreglo de escarpes modernos y el camino de terracería se unen (revisar la figura 30A y 30B). Líneas verdes: Segmentos de falla del Detachment Cañada David. Líneas rojas: arreglo de escarpes. Líneas blancas: delimitación de unidades aluviales.

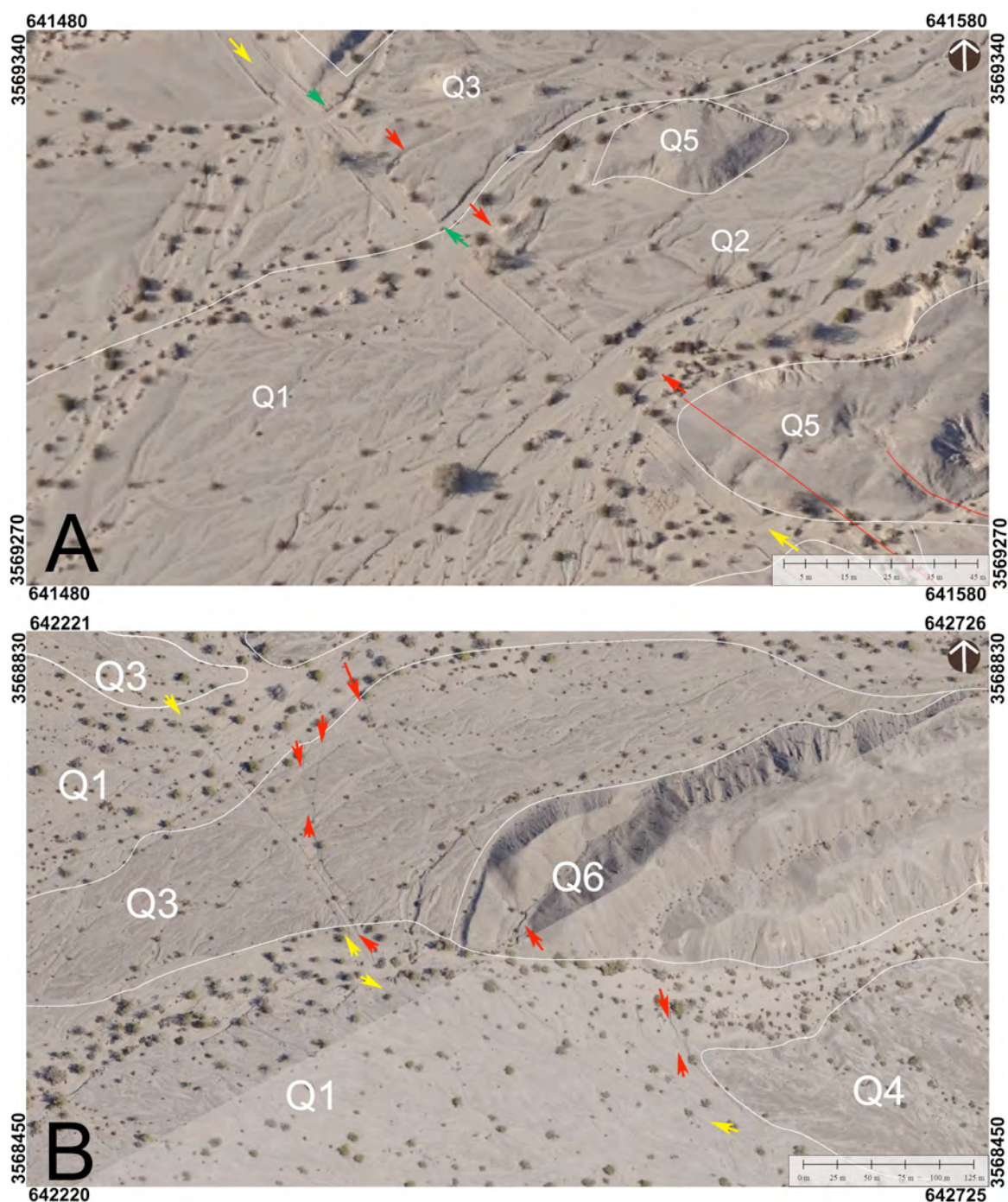


Figura 30. Fotografías aéreas de alta definición (11.5 cm/píxel), mostrando como los escarpes relacionados al evento de 1934 en las unidades holocénicas más jóvenes: Q1, Q2 y Q3 (entre flechas rojas). Las líneas blancas delimitan las unidades aluviales. Flechas amarillas indican el camino de terracería. La figura A muestra escarpes modernos cortando unidades modernas Q1-Q2 (entre flechas rojas). En esta fotografía se puede apreciar la cercanía del arreglo de escarpes con el camino de terracería (entre flechas amarillas). Y en algunas regiones se infiere que el escarpe coincide totalmente con el camino (sección del escarpe entre flechas verdes), dificultando identificar la evidencia del evento sísmico a través de la cartografía geológica. La figura B presenta un arreglo de escarpes modernos en unidades holocénicas y modernas. Aunque el efecto de los canales activos ha borrado parte de la evidencia del evento en las superficies más jóvenes, aun queda registro que permite evidenciar la ruptura superficial. Al igual que la figura A, podemos apreciar el acercamiento del arreglo de escarpes al camino de terracería.



Figura 31. Fotografías tomadas en campo mostrando la serie de escarpes modernos asociados con el evento ML = 6.5 de 1934. la línea roja delimita el escarpe relacionado al evento de 1934 de M_w 6.5 y se estableció exactamente entre el contacto de los bloques que componen la falla. Como se puede apreciar el bloque de piso presenta clastos de mayor tamaño (figura A); a diferencia que en el bloque de techo que está cubierto por material mucho más fino (Figura C). Esto se debe a que el material más fino del bloque de techo se transporta hacia el bloque de piso, en respuesta al efecto erosivo de los canales activos. poca altura de los escarpes permite que la degradación de los mismos sea más rápida; sin embargo en la región se identificaron escarpes con caras libres de ángulos máximos de la pendiente son $\pm 25^\circ$ y una diferencia de altura entre los bloques de 30 cm, conforme a la información tomada en campo (figura B).

La presencia de escarpes de falla cortando las unidades aluviales mas jóvenes localizadas a lo largo del segmento CRCH4, son evidencia de que este segmento de falla rompió durante el evento ML = 6.5 de 1934, siendo este segmento el limite norte de la ruptura.

La zona de intersección del segmento CRCH4 con la Sierra El Mayor, define el limite sur del segmento abandonado de la falla CDD. La cartografía detallada muestra que en esta zona el arreglo de jóvenes escarpes del segmento CRCH4 no corta la traza de la falla CDD, ni a ningún otro indicador litológico en su bloque de piso, sino que por el contrario cambia de rumbo y continua en dirección sur, paralelo a la traza curvilínea de la falla maestra de bajo ángulo, en el dominio antiforme norte (Figura 29). En esta región el arreglo de escarpes de falla se localiza a una distancia de solamente algunas decenas de metros de la traza de la falla CDD, cortando a lo largo de su rumbo unidades aluviales del Holoceno (Q1, Q2 y Q3), lo que sugiere de igual manera su relación con el evento de 1934 (Figuras 32 a 36).

En el dominio Sinforme norte se registran escarpes modernos cortando unidades tan jóvenes como Q1 y Q2, que se alejan de la falla maestra (CDD) en dirección de la cuenca Laguna Salada. Este arreglo de escarpes conforma desprendimientos que se desarticulan de la CDD en sus regiones cóncavas (considerando la sierra como referencia), los cuales proyectan en diferentes direcciones: SE-NW y NE-SW. Los arreglos de escarpes que proyectan NE-SW, generan desprendimientos de menor longitud (hasta 2 km en promedio) en comparación con los proyectados SE-NW, donde la longitud que registran se encuentra entre los 3 y los 4 km (Figuras 32 a 36).

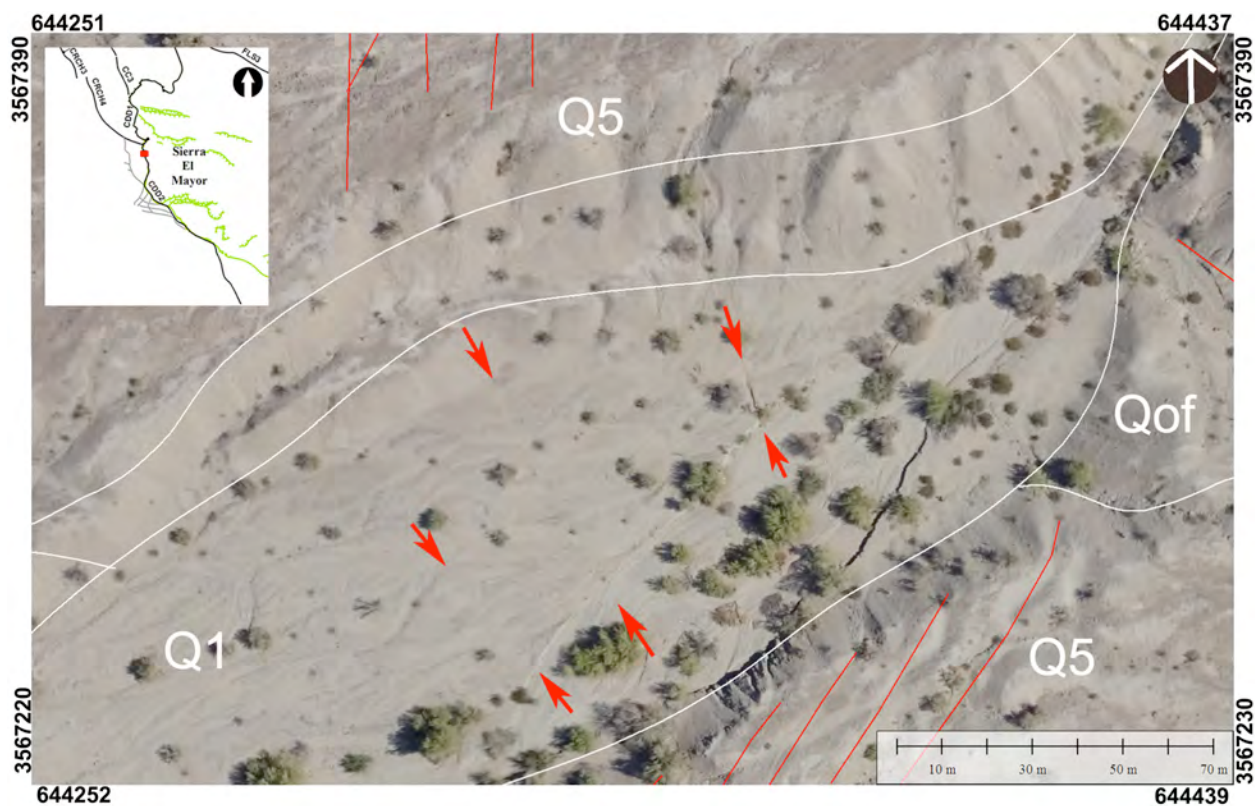


Figura 32. Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que muestra las relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas) y los escarpes de falla asociados al sismo 1934 $M_L = 6.5$ (flechas de color rojo) a lo largo de la región antiformal norte. Las líneas rojas representan los paleoescarpes que cortan unidades pleistocénicas (Q5 y Qof). Podemos ver evidencia de eventos modernos que rompen las unidades más modernas (Q1) que se encuentran entre las flechas rojas. Se puede apreciar la diferencia de color generada por el contraste en la iluminación de los escarpes sintéticos de falla.

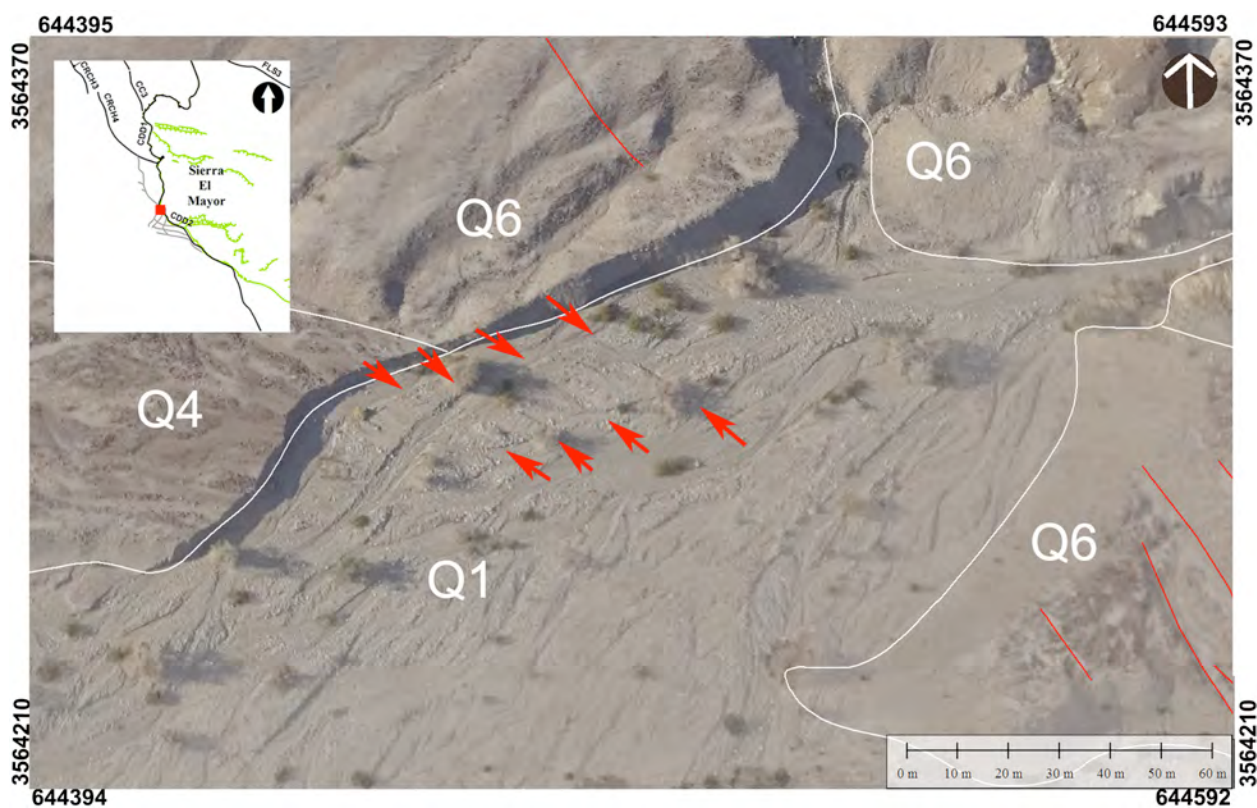


Figura 33. Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiforme, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. En la figura se muestran las relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas) y los escarpes asociados al sismo 1934 (flechas rojas). Las unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) de la región presentan paleoescarpes (líneas rojas). Las unidades holocénicas modernas (Q1) registran escarpes recientes que se encuentran identificados entre los pares de flechas rojas. La traza de los escarpes relacionados con el sismo $M_L = 6.5$ de 1934, se puede observar casi perpendicular a los lechos de los arroyos y cauces modernos.

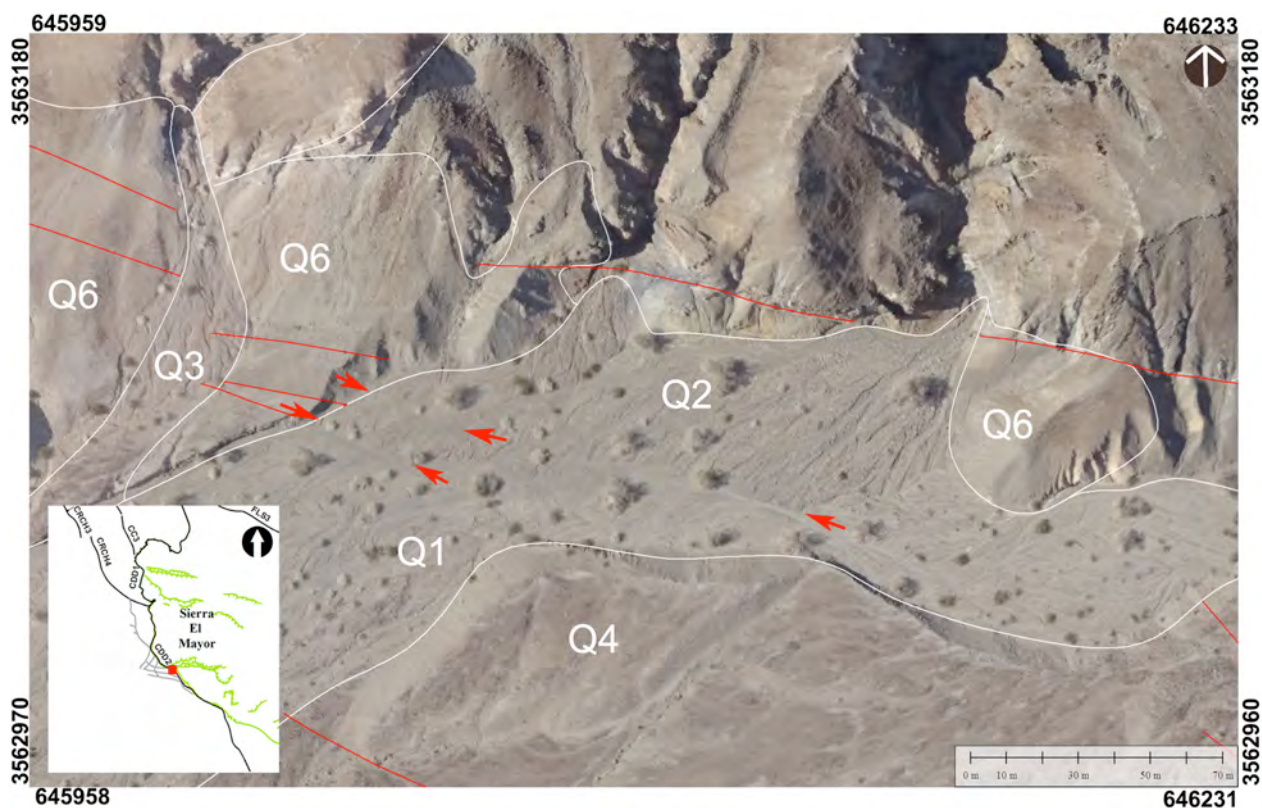


Figura 34. Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiformal, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales cuaternarios (líneas blancas). Las unidades pleistocénicas (Q4 y Q6) registran paleoescarpes (líneas rojas), mientras que las unidades holocénicas (Q1) presentan escarpes modernos asociados al sismo de 1934. Como se puede apreciar, el flujo de las corrientes de los canales activos que erosionan la superficie son casi paralelos a los escarpes modernos. Aunque los escarpes modernos son más rectos y de menores distancias, además de ser paralelos entre ellos.

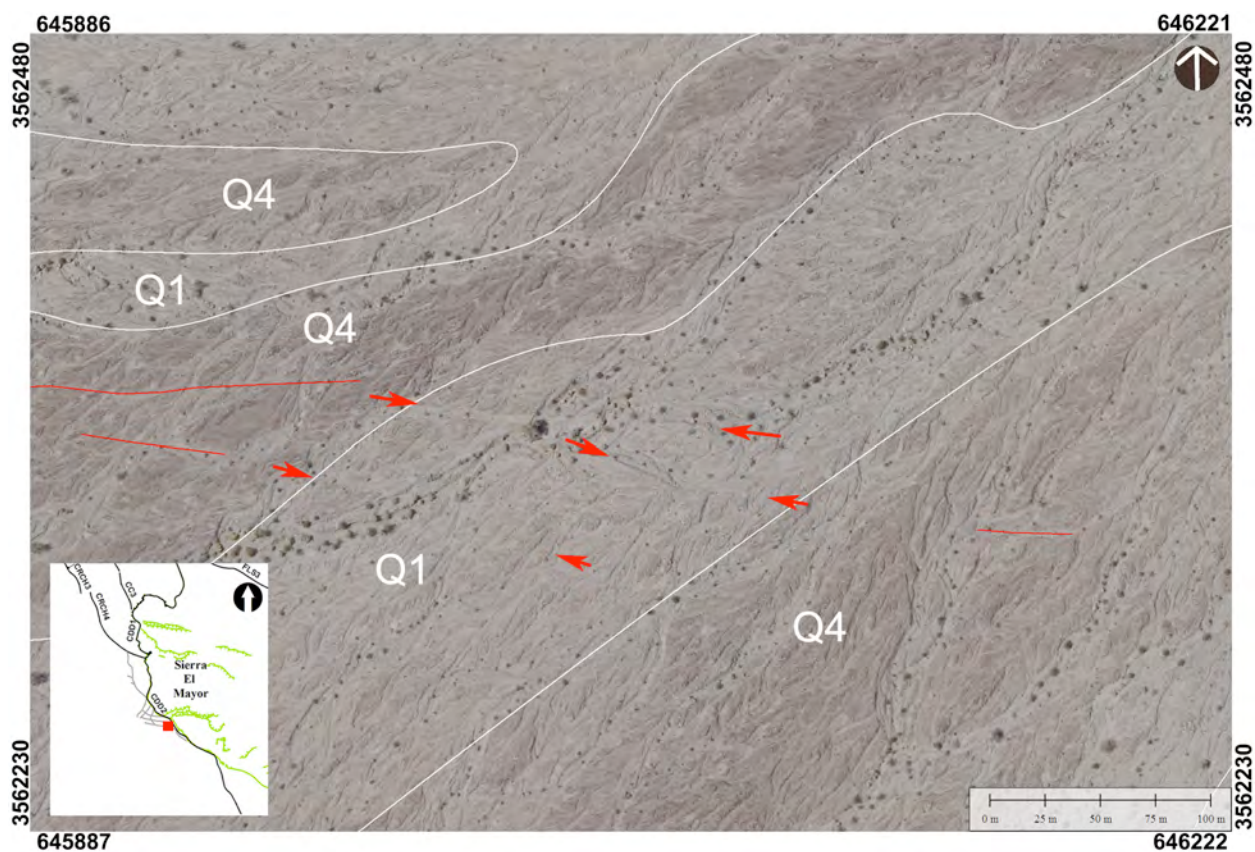


Figura 35. Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiformal, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales holocénicos (líneas blancas). Los paleoescarpes (líneas rojas) en los abanicos aluviales pleistocénicos (Q4), coinciden con los escarpes modernos (entre flechas rojas) que se registran en las unidades aluviales holocénicas mas jóvenes (Q1). Dichos escarpes son perpendiculares a los canales fabricados por las corrientes activas. Se identifican derivado de la diferencia de coloración y contraste en las fotografías.

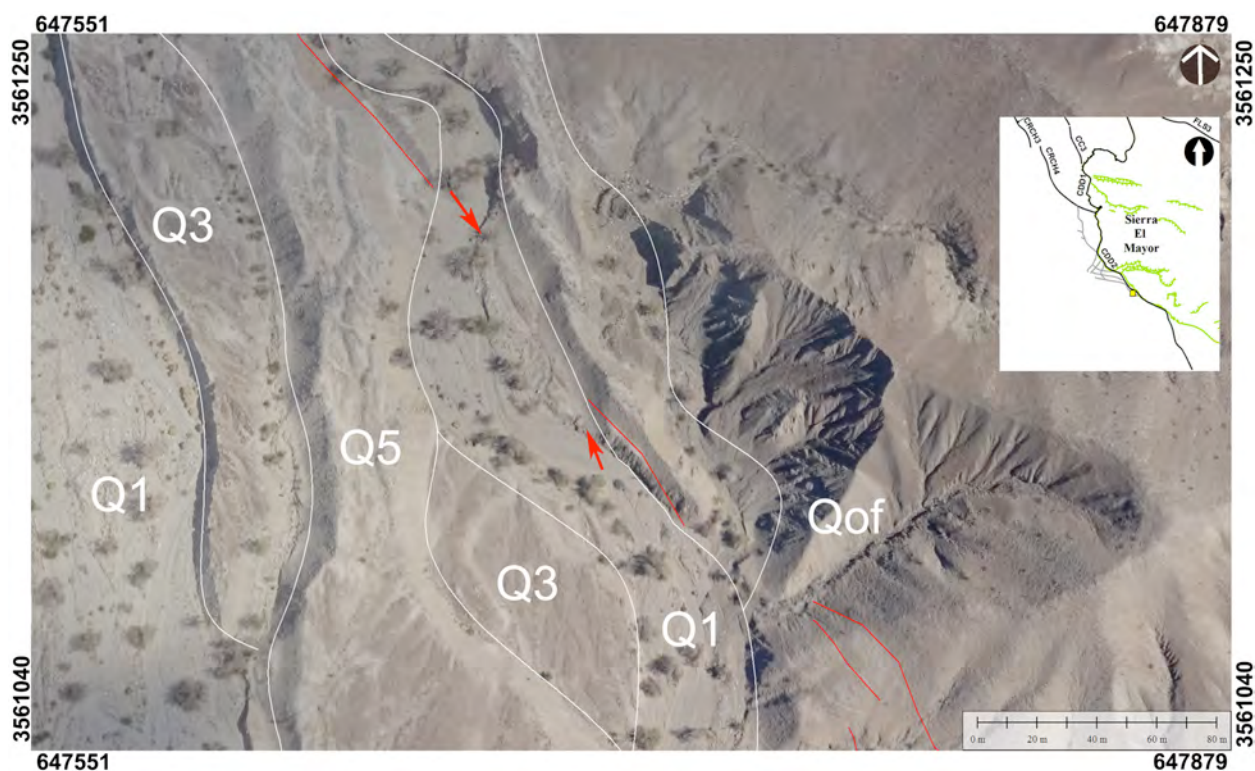


Figura 36. Fotografía aérea de alta resolución (11.5 cmpp) que corresponde a al arreglo de escarpes a lo largo de la región antiformal, que están directamente relacionados con el sismo 1934 $M_L = 6.5$. Relaciones de corte entre los abanicos aluviales holocénicos modernos (Q1) y el escarpe moderno asociado al evento 1934 (entre las flechas rojas). En esta zona el escarpe moderno es identificado por el contraste de coloración que provoca la sombra de la pendiente. Este escarpe moderno cortando la unidad holocénica Q1 coincide también con los paleoescarpes (líneas rojas) que se registran en las unidades aluviales pleistocénicas Q5 y Qof que rodean el abanico moderno.

4.6.1 Falla Cerro Colorado

En la porción central de la cuenca sedimentaria Cerro Colorado se cartografiaron fracturas y escarpes que no se consideran cuaternarios, debido a que la unidad aluvial más joven presente en la zona es Q6 y no es cortada por este arreglo. Sin embargo, dichas fallas cortan el basamento cristalino y también controlan la topografía de la cuenca.

La falla Cerro Colorado es una estructura que separa diferentes dominios de deposición de sedimentos de la cuenca Cerro Colorado. El bloque de piso se compone típicamente de montañas elevadas compuestas por unidades Cuaternarias antiguas (Qof), las cuales se caracterizan por conglomerados no litificados. Por debajo de Qof se localiza una facie conglomerática de la unidad Palm Springs (Psc), la cual se encuentra litificada. En esta unidad, y entre los clastos de composición diorítico, se encuentra la característica matriz de arenisca de color rojo proveniente del plateau del Colorado. El bloque de techo se compone de sedimentos de grano fino incluyendo facies de arenisca de la formación Palm Spring (TQps) y lodolitas marinas de la formación Imperial (Tim).

En el segmento CC1 la ruptura yuxtapone sedimentos de la Formación Imperial (Tim) y la Formación Palm Spring Conglomerático (Psc). Esta falla tiene un transporte tectónico en dirección NW. Se proyecta del Noreste al Suroeste por alrededor de 1.3 km para luego curvarse hacia el sur y desplazarse por 1 km más cortando únicamente unidades aluviales pleistocénicas (Q6) (Figura 37). En el segmento CC2 la falla se proyecta de norte a sur curvando hacia el oeste, cortando unidades aluviales pleistocénicas (Q4-Q7). El bloque de piso se compone por sedimentos de la Formación Palm Spring (TQps), mientras que el bloque de techo se compone por Palm Spring conglomerático (Figura 38). En el segmento CC3, las rupturas cortan la misma unidad litológica (Psc) a lo largo de todo su rumbo. Debido a que la topografía, las fallas y fracturas del segmento CC3 proyectan al sur de una manera constante, se considera que esta falla proyecta de sur a norte, como un desprendimiento que brota del frente montañoso de la Sierra El Mayor hacia la intersección con la falla Laguna Salada. Sin embargo, la zona de intersección con la CDD en el límite sur de la CC3 no es clara, debido a que la traza de la falla está sepultada por sedimentos transportados a lo largo de los arroyos y cauces modernos (Figura 39).

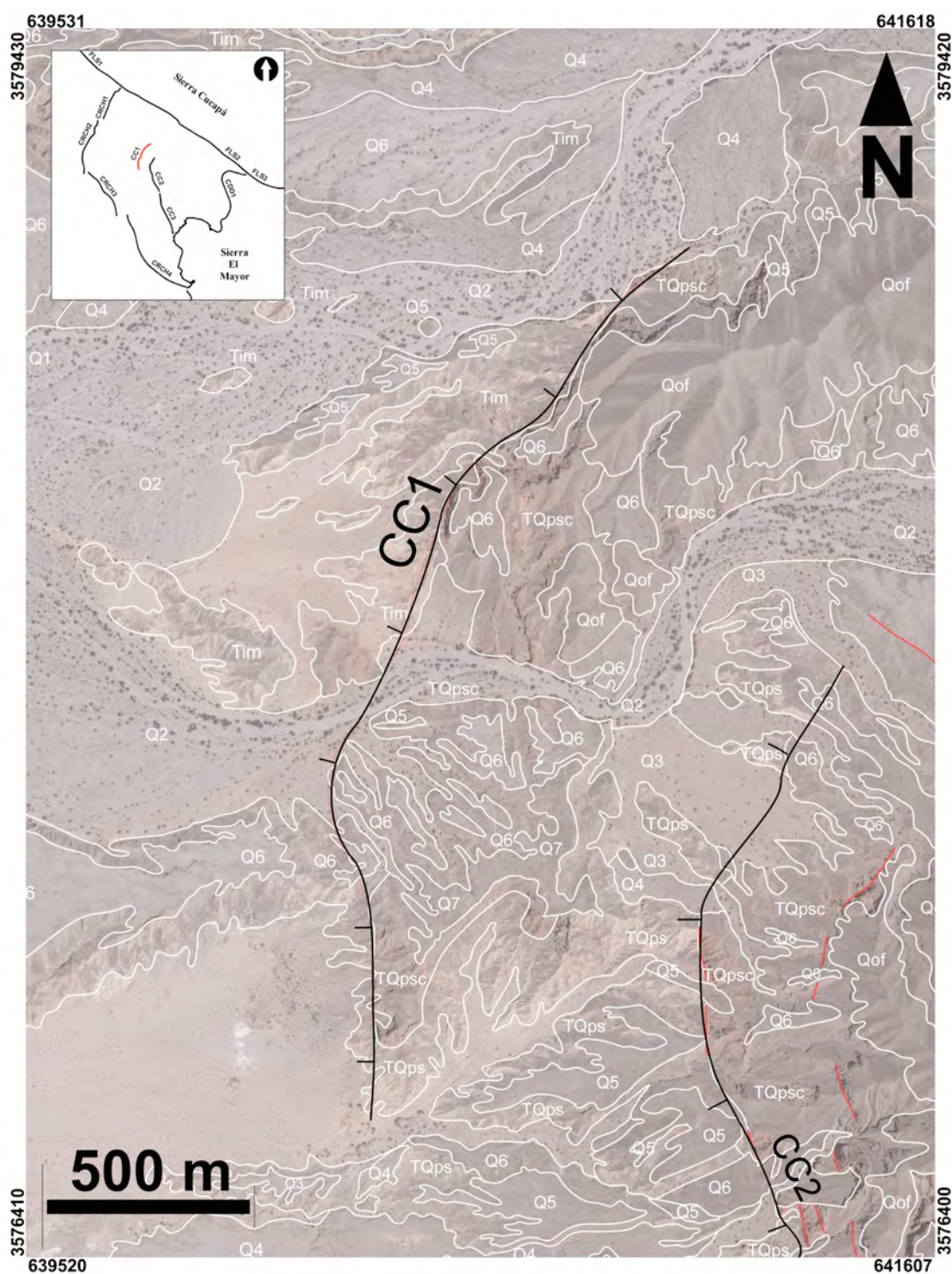


Figura 37. Sistema de escarpes Cerro Colorado CC1 (debes mostrar la dirección de buzamiento de las fallas). Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. El segmento CC1 se determinó debido a que la diferencia de litología que se presenta entre sus bloques notoria. El bloque de techo a la izquierda de la falla se puede apreciar una coloración rosada de tonos claros característico de la formación Imperial. El bloque de piso esta compuesto por material de la formación Palm Springs conglomerático, de coloración marrón oscuro. El segmento CC1 parece presentó transporte tectónico en dirección NO, y tiene una proyección NE – SW, por aproximadamente 2.5 km, cortando desde Q6 hasta TQps.

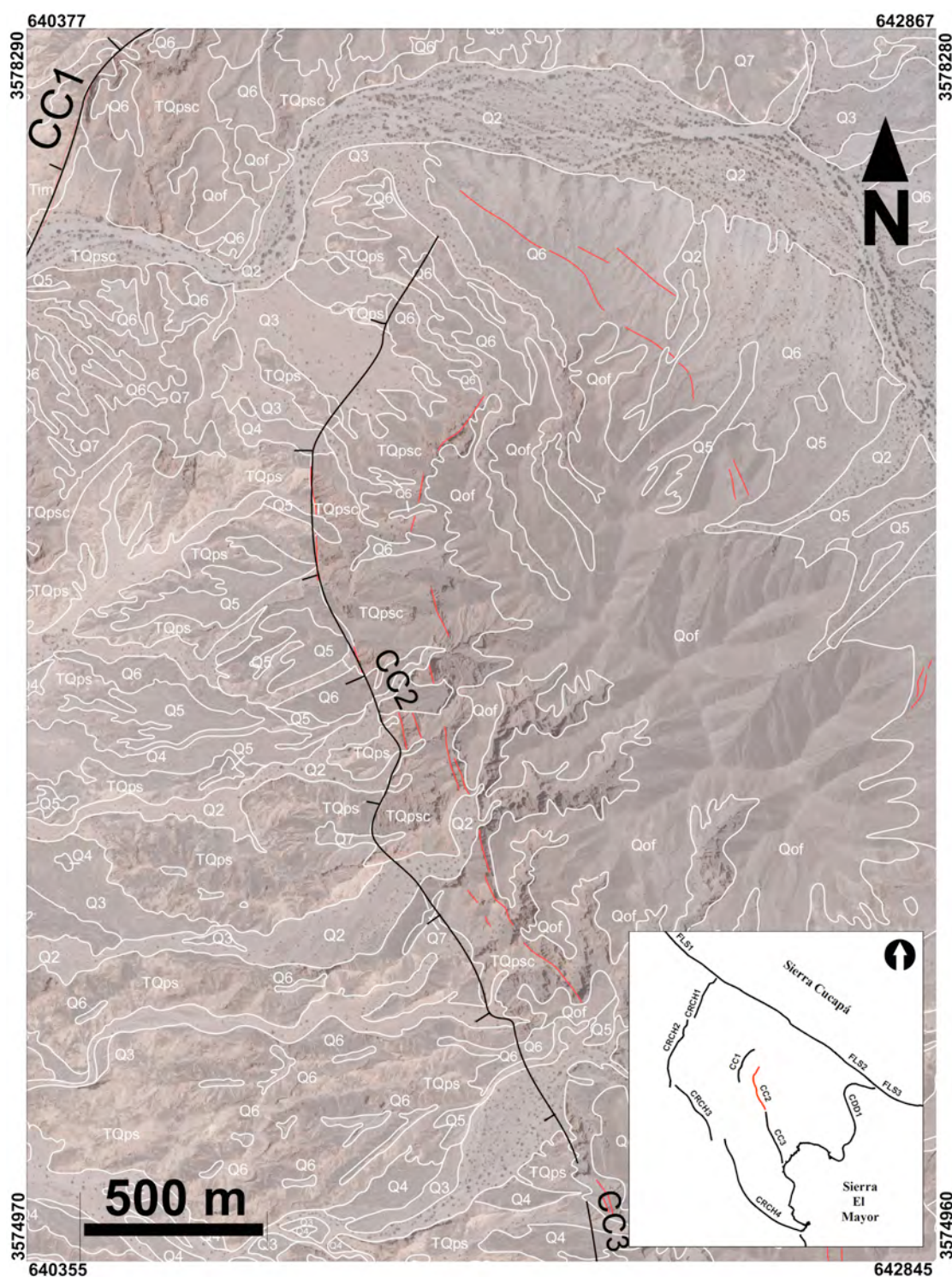


Figura 38. Sistema de escarpes Cerro Colorado CC2. Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. El Segmento CC2 corta las superficies aluviales más jóvenes de la región (Q6 y Q7) y el basamento cristalino. CC2 presenta evidencia de un transporte tectónico en dirección al oeste y una proyección N-S con un trazo curvado en dirección de la cuenca sedimentaria Laguna Salada. Es una falla de contacto entre formación Palm Spring Conglomerático en su bloque de piso y Formación Palm Spring en bloque de techo. Esta región presenta un arreglo de paleoescarpes que proyectan paralelos con una distancia entre sí de aproximadamente 250 m.

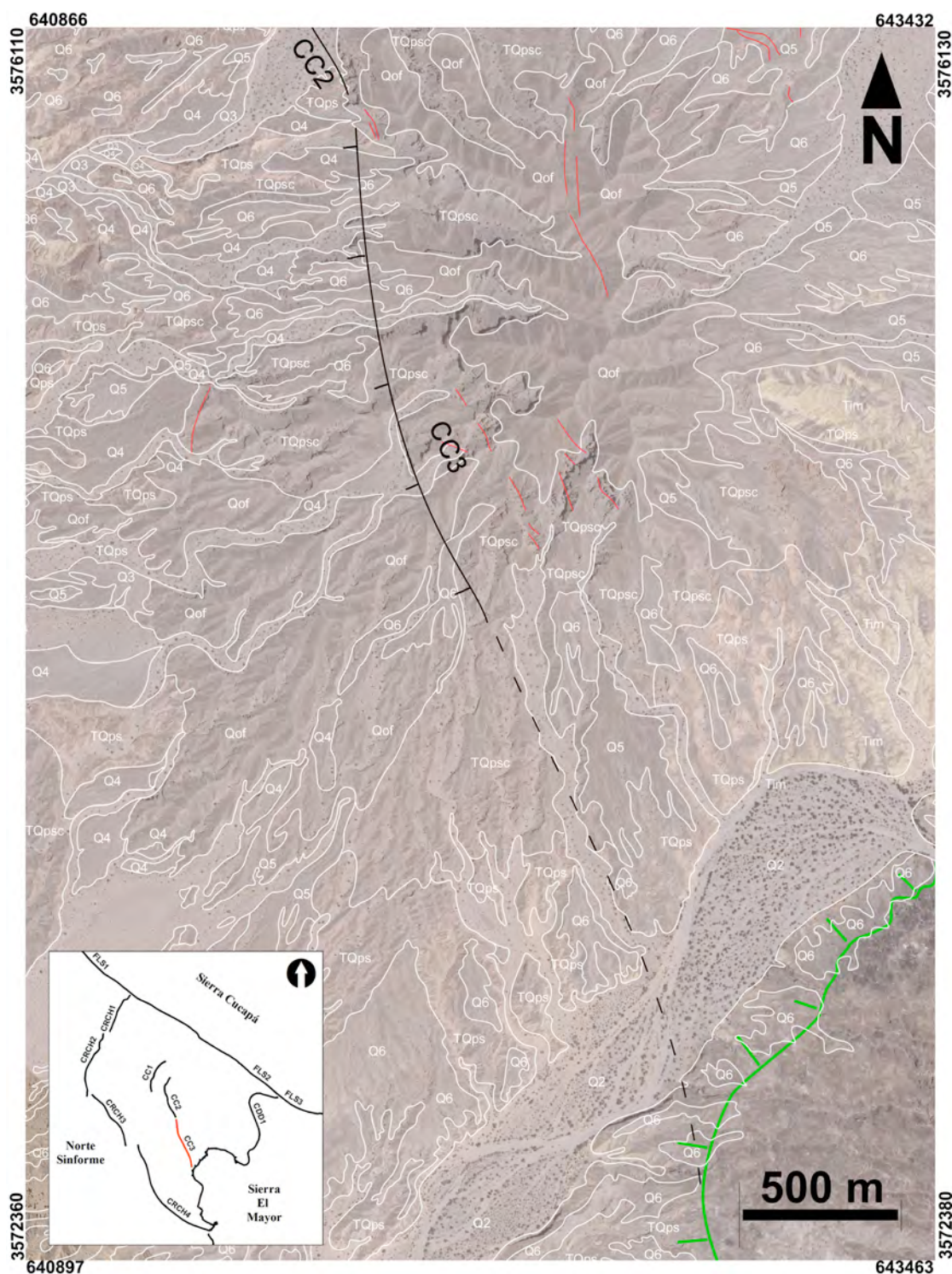


Figura 39. Sistema de escarpes Cerro Colorado CC3. Líneas negras= Segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rojas= Escarpes y fallas. Línea verde: Cañada David Detachment. A diferencia de los segmentos CC1 y CC2, el segmento CC3 se delimitó considerando el aspecto estructural de la región. En este segmento los bloques comparten la misma litología, pero se presenta un arreglo de escarpes de falla que proyecta de sur a norte por alrededor de 1.5 km (línea continua color negro). Se infiere que la proyección de este segmento de falla desprende desde la región de Monte Blanco, en la Sierra El Mayor (esquina inferior derecha) como un desprendimiento estructural de la falla maestra CDD (línea intermitente color negro) cortando las superficies aluviales desde Q4 hasta TQpsc.

5 Discusiones

5.1 Extensión del límite sur del sismo $M_w = 7.2$ de 1892

El 23 Febrero de 1892 se registró un evento sísmico de $M_w > 7.2$ generando una ruptura desde el extremo noroeste de la falla Laguna Salada hasta la intersección con la falla Cañón Rojo. La ruptura de 22 km de longitud, se propagó hacia el sureste a lo largo de la falla Laguna Salada por una distancia de 17 km (Mueller y Rockwell, 1995). Sin embargo, la ruptura no se continuó hasta la falla Detachment Cañada David, sino que por el contrario cambió súbitamente de rumbo al alcanzar la falla Canon Rojo a lo largo de la cual se propagó 5 km más en dirección suroeste (Mueller y Rockwell, 1995; Spelz, 2008). No obstante, y como resultado del sismo El Mayor-Cucapah de $M_w = 7.2$ ocurrido en abril de 2010, Rockwell et al. 2015 redefinieron la longitud de la ruptura del sismo de 1892, el cual proponen alcanzó una longitud de 58 km, de los cuales 53 km fueron cartografiados a lo largo de la falla Laguna Salada, y 5 km a lo largo de la falla Cañón Rojo, finalizando en el extremo sur del segmento CRCH1. Como resultado del presente trabajo, se ha identificado una extensión adicional de ~ 3.5 km al sur de la ruptura de 1892. Esta extensión corresponde precisamente al segmento CRCH2.

Las relaciones cortantes del arreglo de escarpes de falla Cuaternarios en el dominio sinforme norte, permitieron determinar una extensión de la ruptura superficial de aproximadamente 5 km al sur del límite de la fractura en superficie determinado por Rockwell (2015) del sismo $M_w = 7.2$ de 1892. Esta extensión al sur del evento de 1892 es físicamente definido por el segmento CRCH2 de la Falla Cañón Rojo–Chupamirtos (figura 40). Las relaciones cortantes en esta región son sobre las unidades Q1-Q3. A través de la extensión de la ruptura superficial no existe evidencia de escarpes pleistocénicos. El registro que prevalece es únicamente de escarpes modernos relacionados al sismo $M_w = 7.2$ de 1892. Aún así, este registro de escarpes modernos se ha visto afectado en varias secciones del segmento CRCH2, borrando por erosión el registro del evento de 1892 (Fletcher y Spelz, 2009). Es de importancia mencionarlo, considerando que si los efectos erosivos han logrado borrar evidencia de una ruptura en superficie generada por un sismo de magnitud $M_w = 7.2$, la probabilidad de que estos factores puedan afectar la evidencia de un evento de menor magnitud (como el caso del sismo $M_L = 6.5$ de 1934) es muy alta.

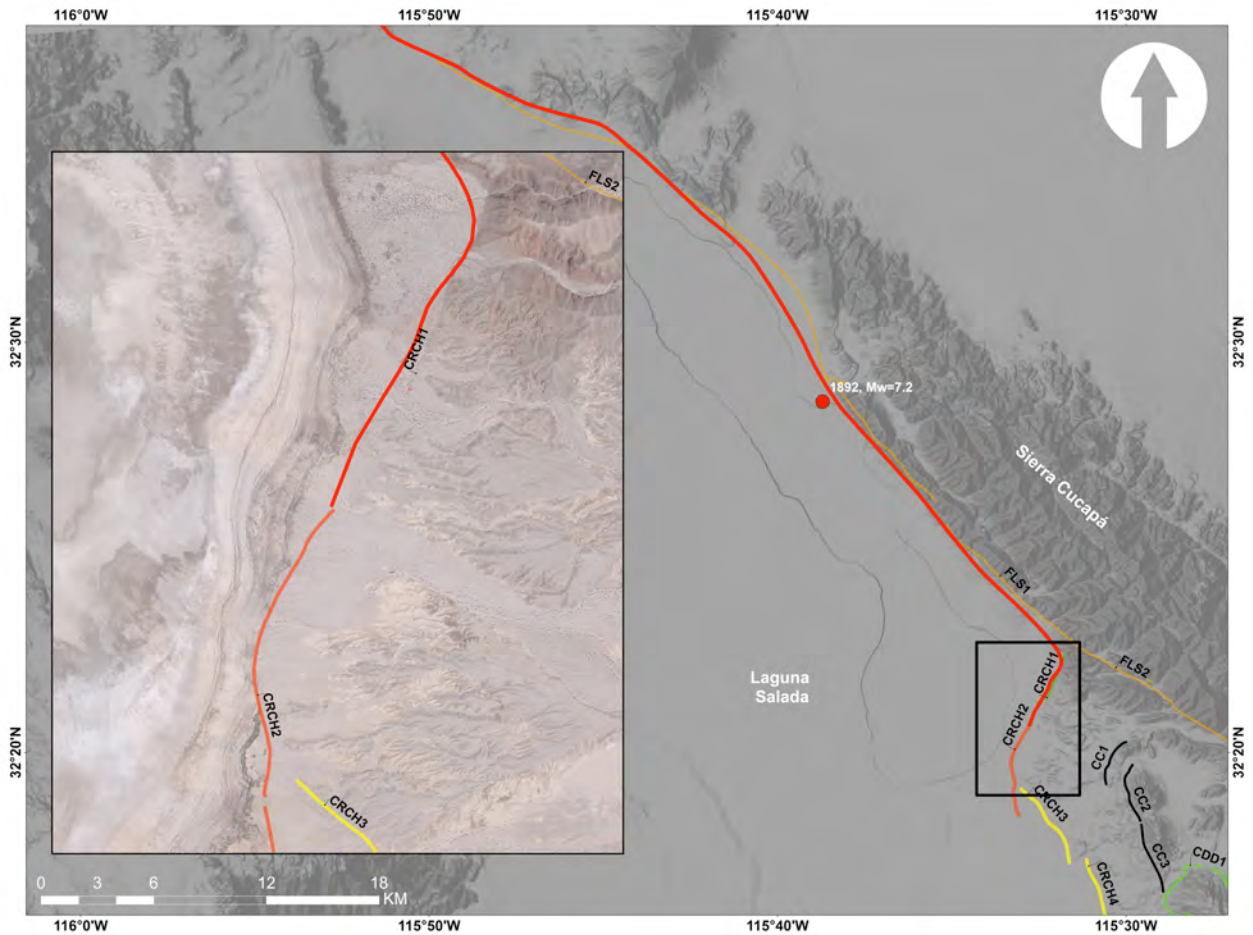


Figura 40. Nuevo límite al sur de la ruptura superficial del sismo 1892. La ruptura del evento sísmico de 1892 que se desplazó por el frente de la sierra Cucapá a través de la falla Laguna Salada para posteriormente curvar a la derecha, rumbo al sur rompiendo los segmentos CRCH1 y 2 de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos. Rockwell (2015) cartografió 58 km de ruptura superficial (línea roja). Derivado del efecto erosivo de los canales activos de las unidades aluviales más jóvenes, se ha borrado importante evidencia de dicha ruptura. El uso de información con alta definición permitió en este estudio determinar el límite real al sur de dicho evento, el cual extiende un aproximado de 5 km más (línea anaranjada). Como se puede apreciar en la macro localización de la ruptura, esta marca la pauta que permite vincular las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos, que terminan por unirse al centro del nuevo frente de montaña. Línea verde= Cañada David Detachment.

5.2 Delimitación e identificación de la ruptura del sismo 1934

Se propone que los escarpes modernos registrados en unidades tan jóvenes como Q1 (de edad no mayor a los 150 años) en el segmento CRCH4 y el dominio Sinforme norte, están directamente relacionados con el evento sísmico $M_L = 6.5$ de 1934. Basados en el hecho de que los desprendimientos que proyectan de S a N son mejor definidos y tienen mayor longitud (hasta 4 km), en comparación los que proyectan hacia el sur (no más de 2 km), proponemos que la energía del sismo de 1934 propagó de norte a sur. Se estima que el sismo $M_L = 6.5$ de 1934 tuvo epicentro en la región del antiforame sur, y la

ruptura propagó desde el extremo sur del dominio Sinforme norte a través de la falla maestra CDD, hasta topar con el dominio antiforme norte, donde la ruptura se tornó en dirección NW, a través el segmento CRCH4 de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos, rompiéndolo en su totalidad. La ruptura se detuvo en el límite norte del segmento CRCH4, registrando una longitud de aproximadamente 30 km (figura 41).

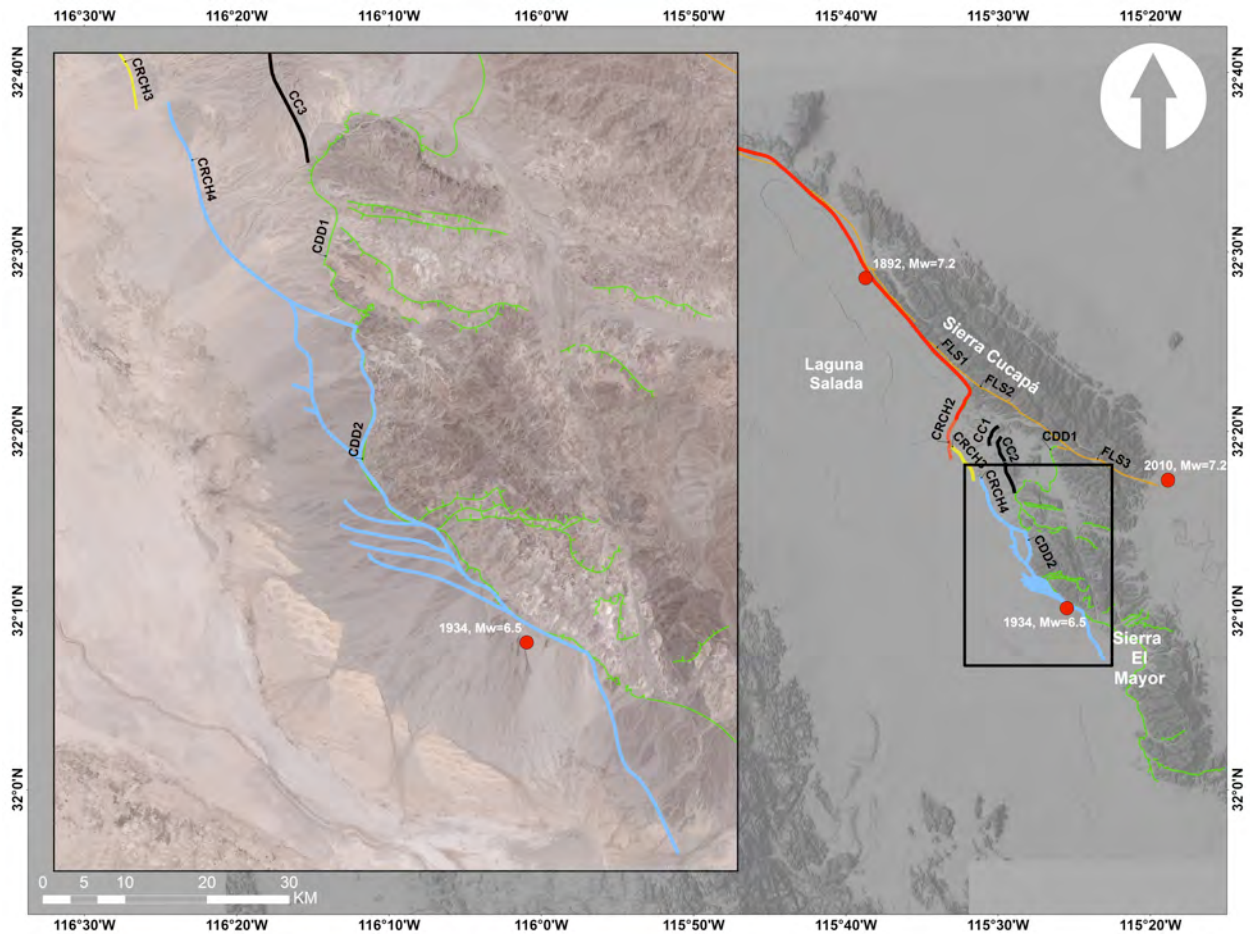


Figura 41. Evento sísmico de 1934. Línea azul= Propuesta de ruptura superficial determinada por la ruta de escarpes modernos que cortan unidades aluviales holocénicas (Q1,Q2 y Q3). La ruptura de 1934 se estima, tiene una longitud de 30 km. Conforme a lo interpretado, se propone que la ruptura del evento sísmico de 1934 M_L 6.5 propagó de sur a norte comenzando al centro del dominio antiforme sur, terminando en el límite norte del segmento CRCH4. Esto debido a que derivado del evento se generaron al menos 4 fallas desprendimiento en el antiforme norte que brotan desde la falla principal del CDD en dirección NW entre los 4 km. Así mismo se generó un desprendimiento en la región norte de dicho antiforme, que además registró dos pequeños desprendimientos en la misma dirección de no mas de 3 km. Línea verde= Cañada David Detachment. Línea Anaranjada= Falla Laguna Salada. Línea roja = estimación de la ruptura de 1892. Línea amarilla = segmento asísmico.

5.3 Brecha sísmica definida por ausencia de escarpes en el segmento CRCH3

A diferencia de los segmentos CRCH1 y CRCH2, el arreglo de escarpes de falla a lo largo del segmento CRCH3 no corta abanicos Holocénicos. Esta relación sugiere que los esfuerzos tectónicos pueden ser más elevados en este segmento, el cual puede representar una de las zonas con mayor riesgo sísmico en la porción norte de la Sierra El Mayor. El evento de 1892 con M_w 7.2, propagó de norte a sur cortando los segmentos al norte CRCH1 y CRCH2 de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos, y el evento 1934 de M_w 6.5 propagó de sur a norte cortando desde el segmento CDD2 (traza de falla maestra inactiva en el dominio Sinforme norte), hasta el segmento CRCH4 al sur de la falla Cañón Rojo - Chupamirtos. Ningún evento registrado tuvo la suficiente energía suficiente para romper los 4.1 km de longitud del segmento CRCH3 (figura 42). El segmento CRCH3 se ubica entre el límite norte del sismo 1934 y el límite sur del sismo 1982 y no ha sido activado por ningún evento holocénico, el último evento ocurrido en este segmento corta Q6, por lo que probablemente el evento es pleistocénico. Esto tiene implicaciones sobre la sismicidad de la zona, ya que el segmento CRCH3 no ha roto desde el pleistoceno y se interpreta que solo quiebra en eventos de gran magnitud. Por lo tanto se interpreta en este trabajo que se requieren sismos aún de magnitud aun más grande que 7.2 para generar rupturas cosísmicas a través de este segmento, representando una zona de mayor riesgo sísmico.

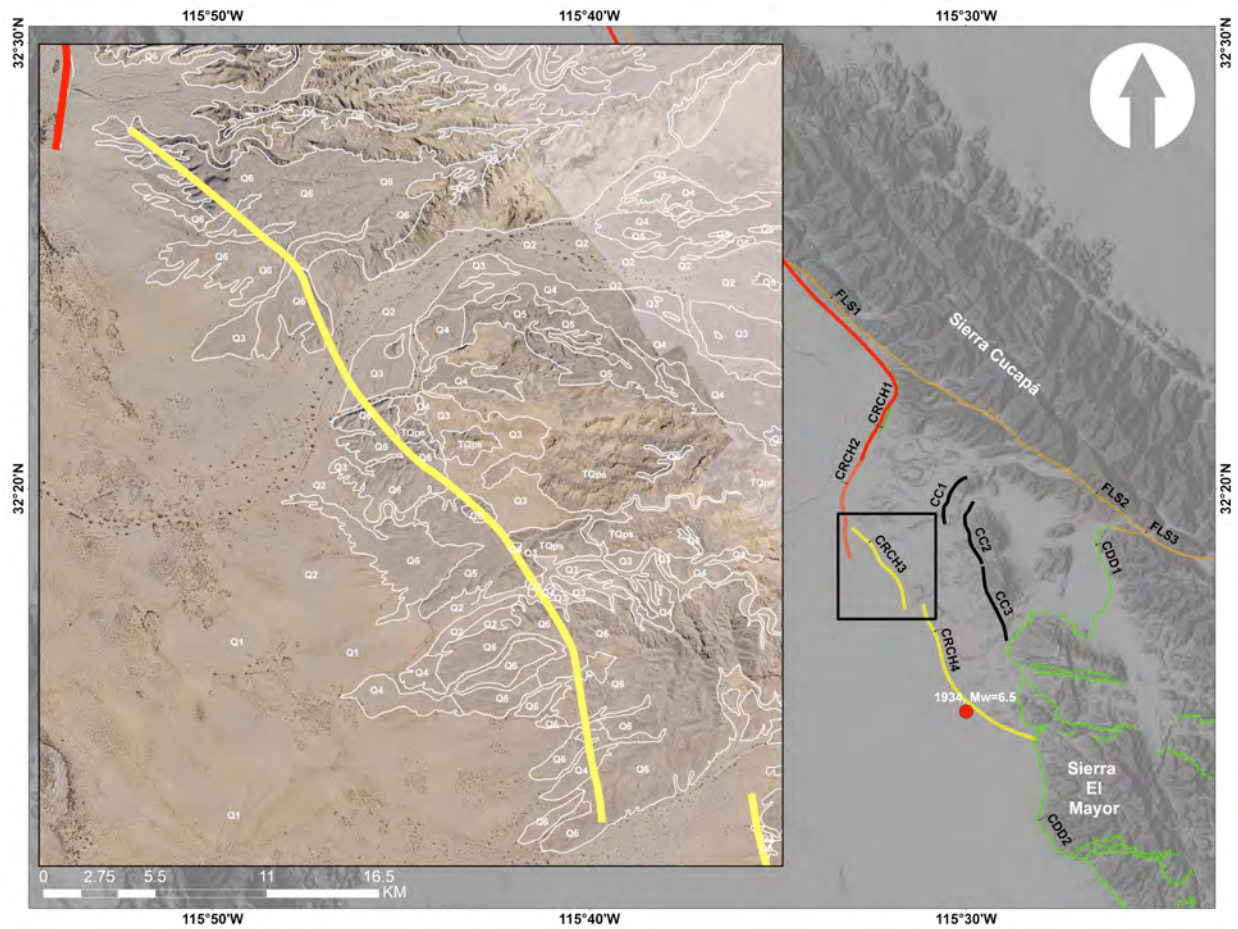


Figura 42. El segmento CRCH3 (en el recuadro negro) de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos ha sido el único que no ha roto en eventos históricos recientes. Las unidades aluviales afectadas en este segmento son únicamente pleistocénicas (Q6), los eventos registrados en este segmento son pleistocénicos. El evento de 1892 termina justo al norte del segmento CRCH3 y el evento de 1934 termina en el límite sur de dicho segmento. Ninguno de los eventos ha sido lo suficientemente fuerte como para romperlo. Por esto, consideramos que este segmento está cargado de esfuerzos. Hipotéticamente hablando, se infieren posibles estructuras que rompan la continuidad de la falla CRCH. O bien, que ningún evento ha tenido la suficiente energía para romper esta región. Línea roja= Ruptura del sismo 1892. Línea verde= Cañada David Detachment. Línea Anaranjada= Falla Laguna Salada.

5.4 Complejidades estructurales: Zonas de acomodamiento

Las complejidades estructurales norte y sur están ubicadas a los extremos de dos de los segmentos (CRCH2 y CRCH3) de la falla Cañón Rojo - Chupamirtos; seguido de las complejidades estructurales se registra un brinco hacia otro segmento de fallas. En el caso de la complejidad norte, el brinco es a la derecha generando una distancia de 500 m entre los segmentos CRCH1 y CRCH2; y en la complejidad sur, el brinco es a la izquierda, formando una distancia de 900 m entre los segmentos

CRCH3 y CRCH4 (Figura 43). Se considera que la deformación penetrativa característica de estas regiones se debe a zonas de transferencia entre los segmentos de falla, los cuales consideramos son contemporáneos, pero no están alineados entre sí, y por este motivo ambas rupturas pierden desplazamiento. Aunque en la complejidad norte la ruptura no fue frenada en el sismo más reciente (1892 $M_w = 7.2$).

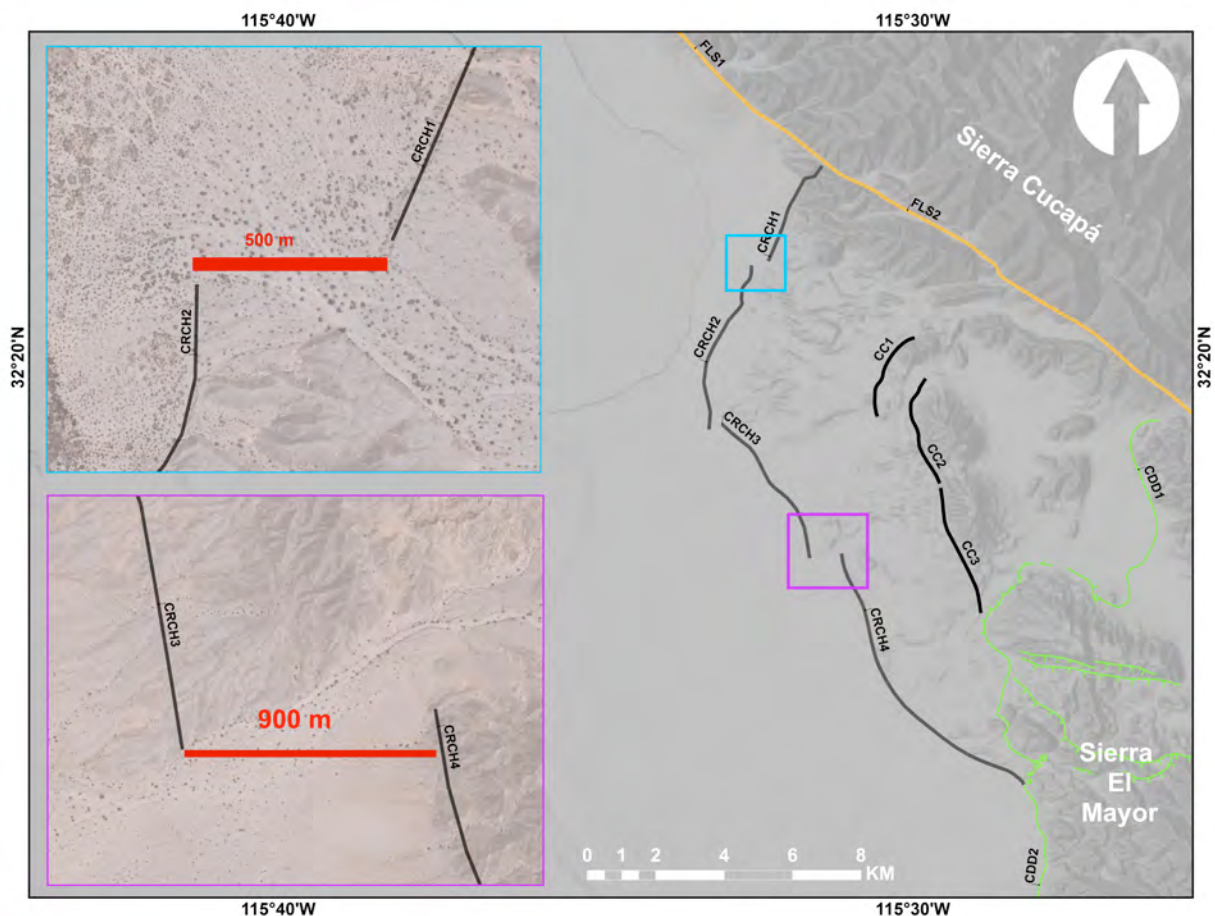


Figura 43. La figura en el recuadro azul muestra la zona de transferencia relacionada a la complejidad estructural norte entre los segmentos al CRCH1 y CRCH2, que pasa de un arreglo de escarpes alineados dando un brinco a la derecha (con una distancia de 500 m) para comenzar con una zona de deformación penetrativa. Ambos segmentos conforman el límite sur de la ruptura de 1892 M_w 7.2. El recuadro en morado muestra la relación entre los segmentos al sur CRCH3 que presenta una complejidad estructural similar que en el segmento CRCH2 en el norte, donde unidades aluviales pleistocénicas presentan deformación penetrativa por un arreglo de escarpes paralelos entre sí que generan una disminución en la altura relativa en el abanico, para posteriormente registrar un salto a la izquierda de 900 m y comenzar el segmento CRCH4, el cual presenta un arreglo ordenado y lineal de escarpes hasta topar de nuevo con la falla CDD, al pie de la Sierra el mayor. Esta zona es el límite del evento de 1934 M_w 6.5.

5.5 Papel de la falla Cerro Colorado: Confirmación del mecanismo Rolling Hinge

Vázquez-Hernández (1996) identificó las estructuras geológicas ubicadas en la cuenca Cerro Colorado, considerando las fallas normales de alto ángulo y el cambio litológico de la zona de falla (Porque su unidad Pc y Pac es mas joven que Tps) describiendo la formación de un graben. Consideramos que el modelo estructural realizado por Vázquez-Hernández (1996) no es consistente con la topografía, ya que carece de sentido que las montañas más elevadas de la cuenca se encuentren en el bloque caído de la falla. Proponemos que dicho cambio en la litología se debe a que la falla definió la orilla de la cuenca mientras estuvo activa y que la estructura geológica es un un horst, totalmente antepuesto a la descripción de Vázquez-Hernández (1996).

Las facies conglomeráticas se encuentran en el bloque de piso al este de la falla (bloque levantado) y los sedimentos deltaicos y marinos que ocurren en el lado oeste de la falla coinciden con el bloque de techo (bloque caído). Estas mismas relaciones litológicas y estructurales están reproducidas a lo largo de la mayoría los segmentos de la Falla Cañón Rojo - Chupamirtos. Proponemos que que la falla Cerro Colorado define un frente montañoso relictos en una forma semejante de lo que está formando a lo largo de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos hoy en día. Lo cual es consistente con Fletcher y Spelz (2009), quienes proponen que la deformación migró en dirección del transporte tectónico desde la traza que define el escarpe principal de la falla CDD al frente de montaña de la sierra El Mayor (Figura 44).

En esta tesis proponemos que la migración hacia el oeste ha ocurrido en al menos dos fases: la primera produjo un nuevo frente de montaña a lo largo del margen oeste de Cerro Colorado, a una distancia de 6 km de la falla maestra CDD; y la segunda fase logró definir el nuevo frente de montaña actual y se ubica en el arreglo de escarpes que componen la falla Cañón Rojo – Chupamirtos, la cual delimita el nuevo frente de montaña, y está ubicada a 12 km de la falla maestra en su segmento inactivo (CDD1). Consideramos que la proyección de la falla Cerro Colorado de sur a norte, desde la intersección de con la falla Cañada David Detachment, justo en la cresta de un megamulion anticlinal (Monte Blanco), hacia el norte, donde el límite de la falla no está definido, y al parecer ésta termina antes de intersectar con la falla Laguna Salada. Se propone que la falla ha migrado en dirección del transporte tectónico de la falla normal de bajo ángulo (E – W), lo cual es consistente con el modelo estructural “*Rolling Hinge*” que rige la cuenca laguna Salada propuesto por Fletcher y Spelz (2009). El modelo “*Rolling Hinge*” se caracteriza por el rebote isostático del bloque de piso, al ser liberado por el bloque de techo, formando una protuberancia antiformal que migra en dirección del transporte tectónico siguiendo la ruta de la placa superior, recorriendo el arreglo de fallas relacionado a la falla maestra, en dirección de la cuenca.

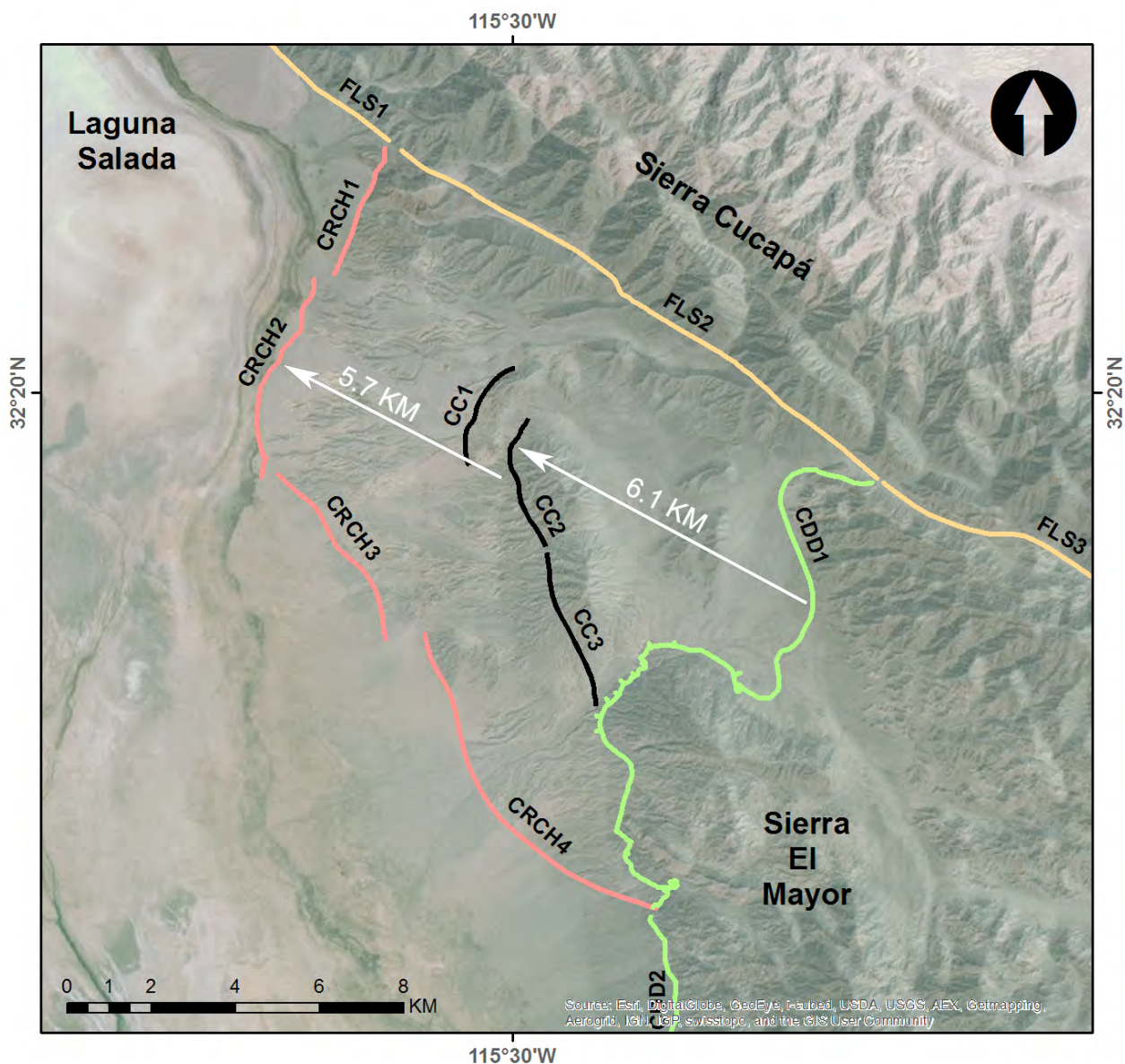


Figura 44. Delimitación del frente de montaña relicto en la intermediación de la cuenca Cerro Colorado. Podemos ver que el movimiento se ha desarrollado en dos eventos claramente definidos: El primero se registra a aproximadamente 6 km de la CCD en su parte inactiva (CDD1), por el arreglo de fallas que compone el sistema de Cerro Colorado (CC1, 2 y 3). El segundo esta definido por el sistema moderno de escarpes que componen los segmentos de la Falla Cañón Rojo – Chupamirtos (CRCH1 al CRCH4), ubicado a 12 km de la traza principal e inactiva de la CDD (CDD1). Líneas negras= segmentos de falla Cerro Colorado. Líneas Rosas= Segmentos de falla Cañón Rojo – Chupamirtos, que componen el frente de montaña actual. Línea verde= traza de la falla maestra CDD. Línea anaranjada= Segmentos de falla Laguna Salada.

6 Conclusiones

En la presente tesis se realizó un estudio geomorfológico y paleosísmico de la región norte de la Cañada David Detachment a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) integrando fotografías aéreas de alta definición de superficies aluviales ubicadas al margen oeste de la Sierra El Mayor, en la cuenca Laguna Salada. Las principales conclusiones generadas en esta tesis se enlistan a continuación:

1. Se determinó que el mecanismo de fallamiento de la Falla Cañada David Detachment es del estilo “Rolling Hinge” (Fletcher y Spelz, 2009), es decir, el bloque de piso rebota isostáticamente conforme es liberado del bloque de techo, en dirección del transporte tectónico, ocasionando que la falla disminuya su ángulo hacia la superficie. Específicamente, se concluye que la falla CDD ha registrado al menos dos eventos: El primero quedó registrado en el sistema de fallas relictas Cerro Colorado, a 6 km del trazo de la falla principal, y el segundo está sucediendo en la región cubierta por el nuevo arreglo de escarpes que componen la falla Cañón Rojo – Chupamirtos.

2. Por otra parte, se documentó por primera vez la ruptura superficial relacionada al evento $M_L=6.5$ de 1934. Se cartografiaron 30 km de ruptura en superficie, a través de las relaciones cortantes entre escarpes modernos y las unidades holocénicas más jóvenes de la región (Q1 – Q3) en la región oeste de la Sierra El Mayor. Se plantea que el epicentro del sismo fue en el límite sur del antiformal norte, y se propagó de sur a norte a través del segmento activo de la falla CDD, ubicado al margen oeste de la Sierra El Mayor. Posteriormente la ruptura cambió su rumbo en dirección NW, a través del cuarto segmento de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos, hasta detenerse en el límite norte de dicho segmento.

3. Se cartografió una extensión de 4 km adicionales al sur de la ruptura en superficie reportada por Rockwell (2015), quien definió una longitud de ruptura en superficie de 58 km, de los cuales 53 km rompieron a través de la falla Laguna Salada en el margen poniente de la Sierra Cucapah, hasta la intersección con la falla Cañón Rojo – Chupamirtos. Donde la ruptura cambió su dirección hacia el sur, rompiendo el primer segmento de la falla Cañón Rojo – Chupamirtos.

4. A partir de este análisis. Se considera que el nuevo segmento de ruptura en superficie relacionado al evento de 1892, el cual extiende por 4 km más la ruptura en superficie, vincula el arreglo de escarpes cuaternarios en el nuevo frente de la Sierra El Mayor. Se deduce que las fallas Cañón Rojo y Chupamirtos son un mismo sistema de fallas, que ha sido tratado como entidades separadas debido a que proyectaban en direcciones contrarias.

5. Se reconoció un sistema de fallas relictas en la cuenca Cerro Colorado, el cual se compone por un conjunto de fallas normales que proyectan de sur a norte. Las fallas del sistema Cerro Colorado buzan

hacia el oeste, en dirección del transporte tectónico de la falla CDD. Se considera que este sistema de falla se relaciona directamente con la falla CDD.

7 Bibliografía

- Armstrong, P.A., Perez, R., Owen, L. A., Finkel, R. C. 2010. Timing y controls on late Quaternary landscape development along the eastern Sierra El Mayor range front in northern Baja California, Mexico. *Geomorphology*, 114(3): 415–430
- Audemard, F. A. 2003. Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas. *Revista geográfica venezolana*, 44(1), 11-46.
- Axen, G. J., D. Stockli, M. Grove, O. M. Lovera, D.A. Rothstein, J. M. Fletcher, K. Farley, P. Abbott. 2000. Thermal Evolution of Monte Blanco dome: Low angle normal faulting during Gulf of California rifting an late Eocene denudation of the eastern Peninsular Ranges. *Tectonics* Vol. 19:197-212
- Axen, G. J., Fletcher, J. M., Cowgill, E., Murphy, M., Kapp, P., MacMillan, I., Ramos Velazquez, E., Aranda-Gomez, J. 1999. Range front fault scarps of the Sierra El Mayor, Baja California: Formed above an active low-angle normal fault? *Geology*, 27(3): 247–250.
- Axen, G. J., Fletcher, J. M. 1998. Late Miocene-Pleistocene extensional faulting, northern Gulf of California, Mexico y Salton Trough, California. *International Geology Review*, 40(3): 217–244
- Axen, G.J., Bartley, J.M. 1997. Field tests of rolling hinges: Existence, mechanical types, and implications for extensional tectonics. *Journal of Geophysical Research* 102: doi: 10.1029/97JB01355. issn: 0148-0227.
- Barnard F.L. 1968. Structural Geology of the Sierra de los Cucapah, northeastern Baja California, Mexico y Imperial County, California. PhD thesis: Boulder, Colorado, University of Colorado, 157
- Birkeland, P. W., & Noller, J. S. 2000. Rock and mineral weathering. *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*, 293-312.
- Blum, M.D., Törnqvist, T.E., 2000. Fluvial responses to climate and sea level change: a review and look forward. *Sedimentology* 47, 2-48.
- Boncio, P., Brozzetti, F., Lavecchia, G. 2000. Architecture and seismotectonics of a regional low-angle normal fault zone in central Italy. *Tectonics*, 19(6), 1038–1055. <http://doi.org/10.1029/2000TC900023>
- Brady, R., Wernicke, B., Fryxell, J. 2000. Kinematic evolution of a large-offset continental normal fault system, South Virgin Mountains, Nevada. *Geological Society of America Bulletin*, 112(9), 1375-1397.
- Brown, E.T., Bourlès, D.L., Burchfiel, B.C., Qidong, D., Jun, L., Molnar, P., Raisbeck, G.M., Yiou, F. 1998. Estimation of slip rates in the southern Tien Shan using cosmic ray exposure dates of abandoned alluvial fans. *GSA Bulletin* 110, 377-386.
- Buck, W. R. (1988). Flexural rotation of normal faults. *Tectonics*, 7(5), 959-973.
- Bull, W. B. 1991. *Geomorphic responses to climatic change*. New York: Oxford University Press. 326 p.

- Bull, W. B. 2000. Correlation of fluvial aggradation events to times of global climate change. *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*, 456-464.
- Bull, W.B., 2007. Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology. Blackwell Publishing, 328 pp.
- Chávez, R.E., Flores, E.L., Campos, J.O., Ladrón de Guevara, M., Fernández-Puga, M.C., Herrera, J., 2000. Three-dimensional structure of the Laguna Salada Basin and its thermal regime. *Geophys. Prospect.* 48, 835–870.
- Chora-Salvador, J. M. 2003. Analisis cinematico de fallas neogenicas normales de alto y bajo angulo en la Sierra Cucapa, Baja California, Mexico. Masters thesis, Centro de Investigacion Cientifica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 107 pp.
- Contreras, J., Barajas, A. M., Herguera, J. C. 2005. Subsidence of the Laguna Salada Basin, northeastern Baja California, Mexico, inferred from Milankovitch climatic changes. *Geofísica internacional*, 44(1), 103-111.
- Cruz-Castillo M. 2002. Catalogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, Mexico. *Union Geofísica Mexicana*, GEOS 37-42
- Díaz-Torres, J. J., Fletcher, J. M., Spelz-Madero, R. M., Martín-Barajas, A., Suárez-Vidal, F. 2012. Geomorfometría del Escarpe Principal del Golfo de California. Análisis comparativo entre dos segmentos del rift: Sierra San Pedro Mártir y Sierra Juárez, Baja California, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(3), 590-610.
- Dorsey, R., Martín-Barajas A. 1999. Sedimentation y deformation in a Pliocene- Pleistocene transtensional supradetachment basin, Laguna Salada, northwest Mexico. *Basin Research*. 11(3), 205-221.
- Dorn, R.I. 1994. The role of climatic change in alluvial fan development. In *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 593-615). Springer Netherlands.
- Doser, D. I. 1994. Contrasts between source parameters of $M \geq 5.5$ earthquakes in northern Baja California y southern California. *Geophysical Journal International*. 116:605-617.
- D'Arcy, M., Whittaker, A. C. 2014. Geomorphic constraints on landscape sensitivity to climate in tectonically active areas. *Geomorphology*, 204, 366-381
- Fletcher, J. M., Spelz, R. M. 2009. Patterns of Quaternary deformation y rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge? *Geosphere*, 5(4): 385–407.
- Fletcher, J. M., Teran, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hudnut, K. W., Mueller, K. J., Spelz, R. M., Akciz, S. O., Masana, E., Faneros, G., Fielding, E. J., Leprince, S., Morelan, A. E., Stock, J. M., Lynch, D. K., Elliot, A. J., Gold, P. O., Liu-Zeng, J., A, G.-O., Hinojosa-Corona, A., González-García, J. 2014. Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor–Cucapah (Mexico) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, 10(4), 797-827.
- Fregoso-Becerra, E., Garcia-Abdeslem J. 2011. A possible seismomagnetic precursor of the El Mayor-Cucapah earthquake (Mw 7.2 Baja California, Mexico. *Geofísica internacional* 50(2):211-225.

- Gold, P. O., Oskin, M. E., Elliott, A. J., Hinojosa-Corona, A., Taylor, M. H., Kreylos, O., Cowgill, E. 2013. Coseismic slip variation assessed from terrestrial LiDAR scans of the El Mayor–Cucapah surface rupture. *Earth and Planetary Science Letters*, 366, 151-162.
- Gómez, P., Soler, M. E., Rodríguez, B., Pérez, F., Palà, V., Arbiol, R. 2012. Ortofoto verdadera de zonas urbanas en el ICC. *Revista Catalana de Geografia*, 17(45).
- Gómez-Villar, A., Montserrat-Martí, G., Ortigosa, L. M., García-Ruiz, J. M. 1994. Colonización vegetal y actividad geomorfológica en abanicos aluviales del Pirineo español.
- Harvey, A. M., Silva, P. G., Mather, A. E., Goy, J. L., Stokes, M., Zazo, C. 1999. The impact of Quaternary sea-level and climatic change on coastal alluvial fans in the Cabo de Gata ranges, southeast Spain. *Geomorphology*, 28(1), 1-22.
- Harvey, A. M., Wigand, P. E., Wells, S. G. 1999. Response of alluvial fan systems to the late Pleistocene to Holocene climatic transition: contrasts between the margins of pluvial Lakes Lahontan and Mojave, Nevada and California, USA. *Catena*, 36(4), 255-281.
- Hernández Flores, A. P. 2015. Paleosismología del sistema de fallas imbricado en la Sierra Cucapah, Baja California, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California. 254 pp.
- Hinojosa-Corona, A., Oskin, M., Gold, P., Austin, E., Taylor, M., Andrew, H., Ramón, A., Fletcher, J. 2010. El relieve a lo largo de la falla en la Sierra Cucapá: Una perspectiva por levantamientos LIDAR de antes y después del sismo Mw= 7.2 del 4 de abril. En: *Geos*, Vol. 30, No. 1. Noviembre , 2010. Sesión especial El sismo de Baja California (Mw 7.2) del 4 de abril del 2010. p. 144 - 146.
- Hough, S. E., Elliot, A. 2004. Revisiting the 23 February 1892 Laguna Salada earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4): 1571–1578.
- Hsu, L., Pelletier, J. D. 2004. Correlation and dating of Quaternary alluvial-fan surfaces using scarp diffusion. *Geomorphology*, 60(3), 319-335.
- Jaimes, M. A., Reinoso, E., Veras, L., Ordaz, M. Espectro de sitio y el temblor del Mayor- Cucapah, Baja California, del 4 de abril de 2010 (mw= 7.2). (?) consultado en: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_04/ar_06.pdf
- Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J. R., McGarey, P., Scharer K., Blisniuk, K. (2014). Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure From motion. *Geosphere*, 10(5), 969-986.
- Lavier, L. L., Buck, W. R., Poliakov, A. N. 1999. Self-consistent rolling-hinge model for the evolution of large-offset low-angle normal faults. *Geology*, 27(12), 1127-1130.
- Leeds, A. 1979. The locations of the 1954 northern Baja California earthquake. Tesis de Maestría. Universidad de California. 101 p.
- Ley-García, J., de Dios, F. M. D., Cueto, R. O. G., Cardoso, F. R. V., & García, M. J. O. 2011. Atlas de riesgos del municipio de Mexicali, BC.

- Martín-Barajas, A., Vázquez-Hernández, S., Carreño, A. L., Helenes, J., Suárez-Vidal, F., Álvarez-Rosales, J. 2001. Late Neogene stratigraphy and tectonic control on facies evolution in the Laguna Salada basin, northern Baja California, Mexico. *Sedimentary Geology*, 144(1), 5-35.
- Mc Calpin, J.P., 2009, *Paleoseismology*, 2nd Edition, Academic Press Inc., 848 p., California.
- Meneses, J. 2010. The El Mayor-Cucapah, Baja California Earthquake April 4, 2010, An EERI Reconnaissance Report. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. Disponible en: <http://www.eqclearinghouse.org/20100404-baja/general-information/eeri-recon-report>.
- Mueller, K. J., Rockwell, T. K. 1995. Late Quaternary activity of the Laguna Salada fault in northern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 107(1): 8–18.
- Mueller, K., Kier, G., Rockwell, T., Jones, C. H. 2009. Quaternary rift flank uplift of the Peninsular Ranges in Baja and southern California by removal of mantle lithosphere. *Tectonics*, 28(5). <http://doi.org/10.1029/2007TC002227>
- Mueller, K. J., Rockwell, T. K. 1991. Late Quaternary structural evolution of the western margin of the Sierra Cucapa, northern Baja California. The Gulf and Peninsular province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 47, 249-260.
- Munguía, L. Navarro, M. Valdez, T., Luna, M. 2010. Informe preliminar sobre la localización y registros de movimientos fuertes del sismo El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) del 4 de abril de 2010. *Gaceta CICESE*, No. 143.
- Nash, D. B. 1980. Morphologic dating of degraded normal fault scarps. *The Journal of Geology*, 353-360.
- Nash, D.B., 1986. Morphologic dating and modeling degradation of fault scarps. In: Wallace, R.E. (Editor), *Active tectonics*. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 181-194.
- Rockwell T.K., Fletcher, J.M., Terán O.J., Hernández-Flores A.P., Mueller, K.J., Barrett J., Akciz, S., Štěpančíková, P., Hough, S.E. 2015. Reassessment of the 1892 Laguna Salada Earthquake - fault kinematics and rupture patterns. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Submitted BSSA-D-14-00274R1
- Snavely, N., Seitz, S. M., Szeliski, R. 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210. <http://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Spelz Madero, R. M. 2002. Evolución del sistema de fallas mioceno-cuaternarias sobre la margen oriente de Laguna Salada, Baja California, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California. 172 pp.
- Spelz, R., Fletcher J. M., Owen L., Caffee M. 2008. Quaternary alluvial-fan development, climate y morphologic dating of fault scarps in Laguna Salada, Baja California, Mexico. *Geomorphology*.
- Strand, C.L. 1980. Pre-1900 earthquakes of Baja California y San Diego County. Tesis de maestría: San Diego State University. San Diego, California. 320p.

- Terán J.O., Fletcher J.M., Oskin M.E., Rockwell T.K., Hudnut K.W., Spelz R.M., Akciz S.O., Hernandez-Flores A.P., Morelan A.E. 2014. Geologic y structural controls on rupture zone fabric: A field-based study of the 2010 Mw 7.2 El Mayor Cucapah earthquake surface rupture. *Geosphere* 1078:1-82.
- Terán, J.O., Fletcher, J. M., Oskin, M. E., Rockwell, T. K., Hudnut, K. W., Spelz, R. M. Morelan, A. E. 2015. Geologic and structural controls on rupture zone fabric: A field-based study of the 2010 Mw 7.2 El Mayor–Cucapah earthquake surface rupture. *Geosphere*, 11(3), 899-920.
- Vázquez Hernández, S. 1996. Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia al oriente de Laguna Salada, Baja California. Tesis de Maestría: CICESE. Ensenada, Baja California, México. P.148.
- Villar, A. G. 1996. Abanicos aluviales: aportación teórica a sus aspectos más significativos. *Cuatern. Geomorfol.*, 10(3–4), 77-124.
- Wei, S., Fielding, E., Leprince, S., Sladen, A., Avouac, J. P., Helmberger, D., ... & Herring, T. 2011. Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nature Geoscience*, 4(9), 615-618.
- Wernicke, B. 1995. Low-angle normal faults and seismicity: A review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B10), 20159-20174.
- Wernicke, B. P. 1988. Low-angle normal faults and seismicity: A review. *J. Geophys. Res.* 100, 20,159–20174 (1995). *Geology* 16, 848–851.
- Westaway, R. 1999. The mechanical feasibility of low-angle normal faulting. *tectonophysics* 308, 407–443.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. 2012. “Structure- from-Motion” photogrammetry: A low- cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

8 Anexos

8.1 Anexo 1.

Se anexan los reportes generados por el Software PostFlight Terra 3D con respecto a los productos obtenidos: Ortomosaico, nubes de puntos y modelos digitales de la superficie.

Quality Report

Generated with Postflight Terra 3D version 4.0.104

- 1 Important: Click on the different icons for:
- 2 Help to analyze the results in the Quality Report
- 3 Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	liguinasaia2016
Processed	2016-02-03 14:01:30
Average Ground Sampling Distance (GSD)	11.83 cm / 4.58 in
Area Covered	13.9851 km ² / 1398.51 ha / 54,025 sq. mi. / 3457.59 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:34m:05s

Quality Check

2 Images	median of 4844.0 keypoints per image	✓
2 Dataset	649 out of 649 images calibrated (100%), all images enabled	✓
2 Camera Optimization	0.27% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
2 Matching	median of 14302.9 matches per calibrated image	✓
2 Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

2 Preview

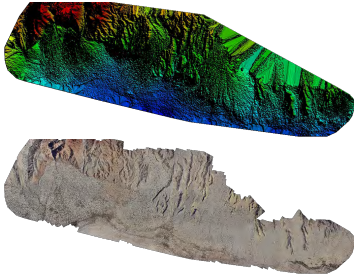


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images

649 out of 649

Number of Geolocated Images

649 out of 649

3 Initial Image Positions

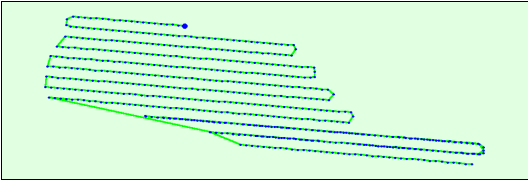


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

3 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

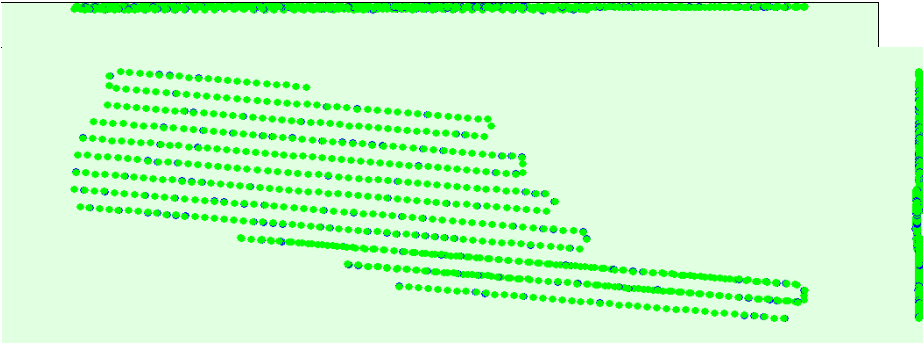
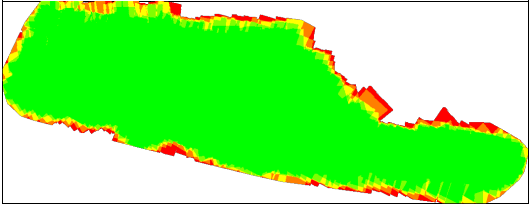


Figure 3. Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

2 Overlap

1



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Figure 4. Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

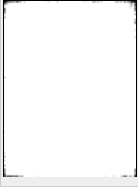
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	10168555
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3231724
Mean Reprojection Error [pixels]	0.168909

2 Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3872 (RGB)(V). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: DSC-WX220_4.4_4896x3872

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.987 [pixel] 3.066 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3632.695 [pixel] 4.576 [mm]	2474.659 [pixel] 3.119 [mm]	1864.749 [pixel] 2.350 [mm]	0.001	-0.021	0.019	0.002	0.003



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(5). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3644.254 [pixel] 4.593 [mm]	2467.630 [pixel] 3.110 [mm]	1867.121 [pixel] 2.353 [mm]	0.000	-0.018	0.017	0.003	0.002

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(6). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3639.920 [pixel] 4.587 [mm]	2481.770 [pixel] 3.128 [mm]	1868.540 [pixel] 2.355 [mm]	-0.000	-0.017	0.016	0.003	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(7). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3655.744 [pixel] 4.607 [mm]	2483.076 [pixel] 3.129 [mm]	1859.967 [pixel] 2.344 [mm]	-0.001	-0.018	0.017	0.002	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	48440	14303
Min	20386	1856

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(2). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3631.484 [pixel] 4.576 [mm]	2473.798 [pixel] 3.118 [mm]	1868.422 [pixel] 2.355 [mm]	-0.001	-0.015	0.012	0.003	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(3). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3625.842 [pixel] 4.569 [mm]	2480.931 [pixel] 3.128 [mm]	1869.071 [pixel] 2.355 [mm]	0.001	-0.018	0.017	0.003	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(4). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel] 4.572 [mm]	2447.997 [pixel] 3.085 [mm]	1836.004 [pixel] 2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3624.100 [pixel] 4.567 [mm]	2473.917 [pixel] 3.116 [mm]	1878.758 [pixel] 2.368 [mm]	0.001	-0.013	0.011	0.003	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

Internal Camera Parameters

Max	79888	37778
Mean	48750	15668

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(1)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	49113	10723
Mn	31910	1856
Max	79493	17830
Mean	50992	10448

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(2)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	47522	14442
Mn	29940	5139
Max	67658	22027
Mean	48246	14355

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(3)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	50412	16969
Mn	22692	2139
Max	61517	22335
Mean	48085	16169

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(4)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	62008	22919
Mn	26323	7095
Max	79372	34421
Mean	57255	22011

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(5)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	41266	13928
Mn	21517	6838
Max	79410	34911
Mean	45591	16729

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(6)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	35762	10964
Mn	20386	3403
Max	79888	37778
Mean	43261	14929

2D Keypoints Table for Camera DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(7)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	45007	10649
Mn	22625	5729
Max	79493	27796
Mean	46045	13112

Median / 75% Maximal Number of Matches Between Camera Models

	DSC- WX220_4_4... (RGB)(1)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(2)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(3)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(4)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(5)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(6)	DSC- WX220_4_4... (RGB)(7)
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(1)	404 / 1608 / 10887	178 / 554 / 5015	12 / 43 / 280				
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(2)		1145 / 2585 / 12978	184 / 549 / 5005	9 / 25 / 292			
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(3)			1394 / 3483 / 12422	201 / 564 / 5689	5 / 13 / 44	5 / 16 / 50	
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(4)				2059 / 5167 / 13737	8 / 33 / 420	13 / 46 / 459	3 / 5 / 18
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(5)					1467 / 3317 / 19009	689 / 1673 / 12505	94 / 238 / 2326
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(6)						879 / 2441 / 21561	103 / 315 / 4809
DSC- WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(7)							1864 / 4161 / 17230

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1824986
In 3 Images	615701
In 4 Images	302579
In 5 Images	165315
In 6 Images	99321
In 7 Images	68003
In 8 Images	48559
In 9 Images	35201
In 10 Images	24239
In 11 Images	16144
In 12 Images	10480
In 13 Images	6776
In 14 Images	4587
In 15 Images	3228
In 16 Images	2306
In 17 Images	1637
In 18 Images	1009
In 19 Images	632
In 20 Images	353
In 21 Images	187
In 22 Images	61
In 23 Images	19
In 24 Images	2

2D Keypoint Matches

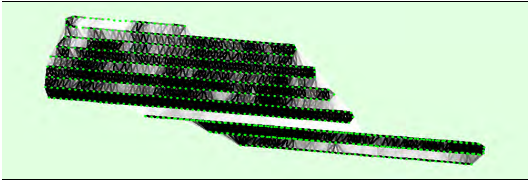


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 3D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual file points or more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-7.62	0.00	0.00	0.00
-7.62	-6.10	0.00	0.00	0.00
-6.10	-4.57	0.00	0.15	0.31
-4.57	-3.05	0.77	1.39	0.46
-3.05	-1.52	5.08	12.33	8.63
-1.52	0.00	45.61	36.67	37.44
0.00	1.52	40.99	37.29	44.22
1.52	3.05	6.47	8.94	8.32
3.05	4.57	1.08	2.62	0.31
4.57	6.10	0.00	0.46	0.00
6.10	7.62	0.00	0.15	0.15
7.62	-	0.00	0.00	0.15
Mean[m]		0.014673	-0.056277	0.03069
Sigma [m]		1.087793	1.480499	1.298647
RMS Error [m]		1.087892	1.481568	1.287088

Min Error and Max Error represent geolocation errors between 1.5 and 4.5 feet, the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation error into the provided error parameters. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	91.68	81.51	98.61
[-2.00, 2.00]	99.23	97.53	99.69
[-3.00, 3.00]	100.00	99.38	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	1.819122	1.819122	2.791048
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.203165	0.203165	0.587744

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	2.922555
Phi	4.205454
Kappa	11.093047

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	GPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 @ 2.10GHz GPU: NVIDIA Quadro K4000 (Driver: 10.18.13.5456) ROPDD Chained DD (Driver: unknown) ROP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown) ROP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Ultimate, 64-bit
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(1)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(2)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(3)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(4)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(5)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(6)
Camera Model Name	DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB)(7)
Image Coordinate System	WGS84
Output Coordinate System	WGS84 / UTMZone 11N
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: no

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced Matching Window Size	7x7 pixels

Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Denification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Denification	02h19m:18s
Time for 3D Textured Mesh Generation	01h55m:10s

Results

Number of Processed Clusters	7
Number of Generated Tiles	26
Number of 3D Denified Points	104013563
Average Density (per m³)	2.46

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (11.6 [m/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	48m:24s
Time for Orthomosaic Generation	05h:35m:31s

Quality Report

1

Important

Click on the different icons for:

2

Help to analyse the results in the Quality Report

3

Additional information about the sections

Lightbulb icon

Click [here](#) for additional tips to analyse the Quality Report

Summary

Project	cdshu_m1
Processed	2016-03-23 15:50:28
Average Ground Sampling Distance (GSD)	12.44 cm / 4.9 in
Area Covered	21.0028 km² / 2100.26 ha / 8.1481 sq. mi / 5214.79 acres
Time for Initial Processing (without report)	03h:23m:01s

Quality Check

3 Images	median of 35066 keypoints per image	✓
2 Dataset	663 out of 663 images calibrated (100%), 76 images disabled	✓
3 Camera Optimization	0.98% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
2 Matching	median of 12186.8 matches per calibrated image	✓
3 Outlier filtering	yes, no 3D GCP	⚠

4 Preview

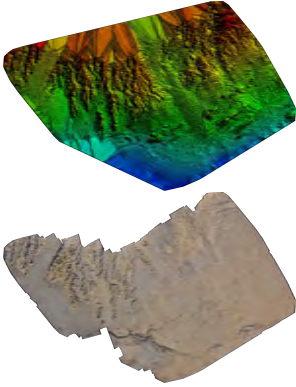


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before denification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	663 out of 759
Number of Geolocated Images	759 out of 759

5 Initial Image Positions

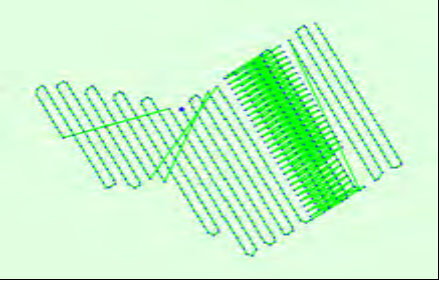


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

3

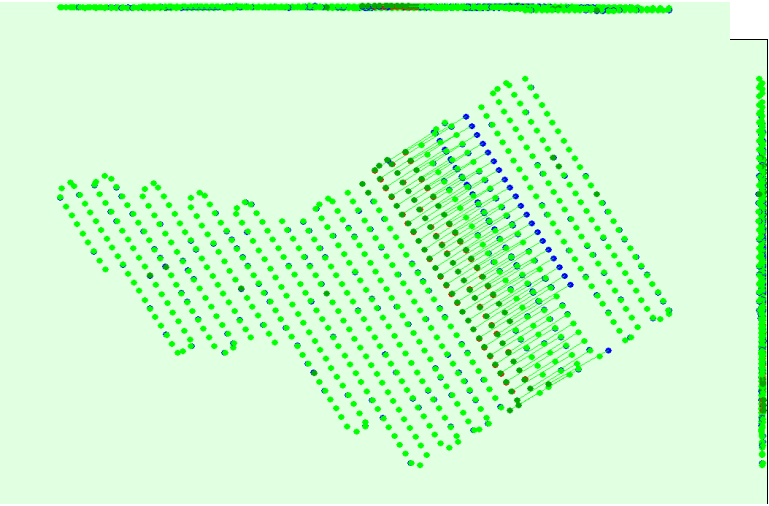
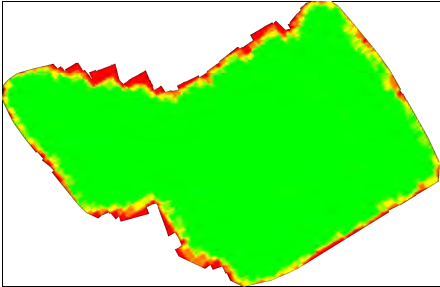


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses). Red dots indicate disabled or uncalibrated images.

Overlap

4



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Red and white areas indicate poor quality. Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthorectified image. The color scale indicates the number of overlapping images. A value of 1 indicates that the pixel is only in one image. A value of 5+ indicates that the pixel is in five or more images. Good quality areas will be green and as long as the number of overlapping images is 3 or more, the quality is generally good. The number of overlapping images is also sufficient for most areas, as shown in Figure 5 for keypoint matches.

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	8470535
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	2820819
Mean Reprojection Error [pixels]	0.191653

Internal Camera Parameters

DSC-WK210_4_4_4896x3372 (RGB). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: DSCW210_4_4_4896x3372

	Focal Length [mm]	Principal Point x [mm]	Principal Point y [mm]	R1	R2	R3	T1	T2
Valid Values	4.572 [mm]	3.055 [mm]	2.314 [mm]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3849.395 [pixel]	2446.354 [pixel]	1882.573 [pixel]	0.004	-0.022	0.019	0.004	0.003

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are found per pixel. Black indicates that, in average, less than 16 ATPs are found per pixel. The color scale is located on the right side of the image. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

2D Keypoints Table

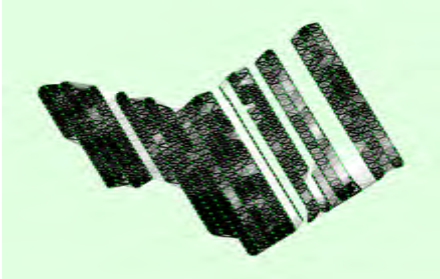
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	35068	12187
Min	20068	1830
Max	78608	35321
Mean	37616	12776

3D Points from 2D Keypoint Matches

Number of 3D Points Observed	
------------------------------	--

In 2 Images	1607378
In 3 Images	565556
In 4 Images	272254
In 5 Images	137212
In 6 Images	87312
In 7 Images	59452
In 8 Images	37707
In 9 Images	23006
In 10 Images	15008
In 11 Images	9037
In 12 Images	4389
In 13 Images	1617
In 14 Images	622
In 15 Images	215
In 16 Images	40
In 17 Images	12
In 18 Images	2

2D Keypoint Matches



Number of matches: 25 222 444 686 888 1111 1333 1555 1777 2000
Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual inspection of the points or more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

88 out of 688 geotagged and callibrated images have been labelled as inaccurate.

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-6.80	-6.80	0.00	0.00	0.00
-5.44	-5.44	0.00	0.00	0.00
-4.08	-4.08	3.48	0.17	0.00
-2.72	-2.72	4.52	3.65	3.48
-1.36	-1.36	12.52	16.65	22.43
0.00	0.00	26.22	32.17	26.87
1.36	1.36	27.65	31.65	27.83
2.72	2.72	14.26	17.24	13.39
4.08	4.08	6.61	2.43	2.98
5.44	5.44	1.74	0.52	0.70
6.80	6.80	0.00	0.00	0.35

6.80	-	0.00	0.00	0.00
Mean[m]		0.033150	-0.048791	-0.139713
Sigma[m]		1.908995	1.485922	1.610333
RMS Error [m]		1.908184	1.486723	1.616882

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and +1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images in which the geolocation error is within the specified interval. The percentage of images with a geolocation error that is outside the specified interval and computed image positions. Note that the image geolocation error do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	60.52	68.00	83.48
[-2.00, 2.00]	87.13	95.30	98.13
[-3.00, 3.00]	97.91	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy[m]	1.484640	1.484640	2.000897
Sigma of Geolocation Accuracy[m]	0.202381	0.202381	0.334017

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.724952
Psi	2.597613
Kappa	6.275977

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU W5540 @2.50GHz
RAM [GB]	16.00
Video Card/Adapter [GPU/VRAM (Driver, 10.1.28.16.0), ROP/DG Channel/D3 (Driver: unknown), ROP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), ROP Reflector Display Driver (Driver: unknown)]	
Operating System	Windows 7 Enterprise, 64-bit
Camera Model	DSO-W0220_4L_4596x3072 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84
Image Coordinate System Coordinate	WGS84 / UTMZone 11N
Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairwise	Awati Grid or Confor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: no

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Treated Mesh Generation	yes, Minimum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 6192x6192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Denstification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Abnormality	no
Time for Point Cloud Densification	09h39m40s
Time for 3D Treated Mesh Generation	01h21m07s

Results

Number of Processed Outliers	4
Number of Generated Tiles	44
Number of 3D Densified Points	11526285
Average Density (per m³)	1.74

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM/land Orthomosaic Resolution	1 x GSD (124 [m/pixel])
DSM/Flags	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	02m40m07s
Time for Orthomosaic Generation	05m40m08s

Quality Report

Generated with PostFlight Terra 3.0 version 4.0.1104

1

Important Click on the different icons for:

2

Help to analyze the results in the Quality Report

3

Additional information about the sections

Lightbulb icon

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary	
Project	1
Processed	2016-05-05 18:56:48
Average Ground Sampling Distance (GSD)	12.33 cm / 4.85 in
Area Covered	11.4808 km ² / 1146.08 ha / 4.4273 sq. mi. / 2833.49 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:26m:53s

Quality Check	
1 Images	median of 25156 keypoints per image ✓
2 Dataset	362 out of 362 images calibrated (100%), all images enabled ✓
3 Camera Optimisation	0.25% relative difference between initial and optimised internal camera parameters ✓
4 Matching	median of 12561 matches per calibrated image ✓
5 Georeferencing	yes, no 3D GCP ⚠

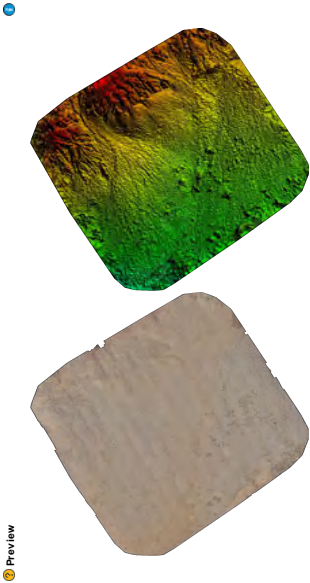


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Calibration Details	
Number of Calibrated Images	362 out of 362
Number of Geolocated Images	362 out of 362

7 Initial Image Positions

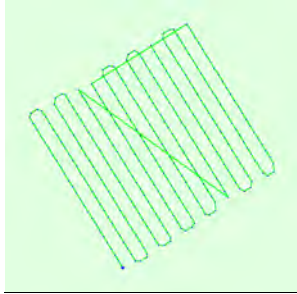


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

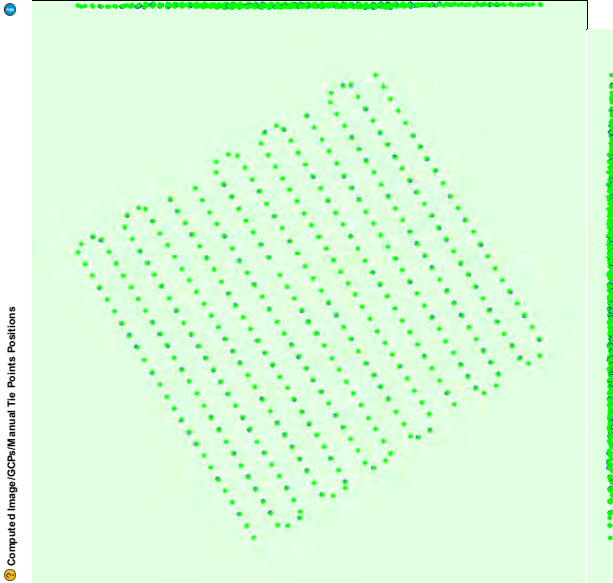
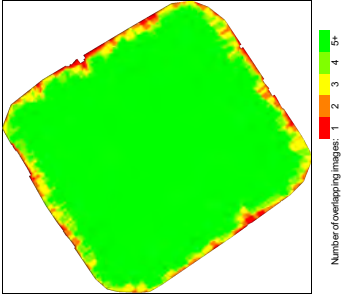


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

10 Overlap



Red and yellow areas indicate low quality results, while green areas indicate good quality results. The number of overlapping images is also sufficient for these areas (see Figure 5 for 4 keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	4431051
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1572563
Mean Reprojection Error [pixels]	0.21954

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3572 (RGB), Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: DSCWX220_4.4_4896x3572

	Focal Length [mm]	Principal Point X [mm]	Principal Point Y [mm]	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4.572 [mm]	2445.897 [pixel]	2004 [pixel]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3838.817 [pixel]	2430.154 [pixel]	1878.224 [pixel]	0.000	-0.021	0.018	0.004	0.004

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are present in the image. The color scale is logarithmic. The color scale is also sufficient for these areas (see Figure 5 for 4 keypoint matches). Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

2D Keypoints Table

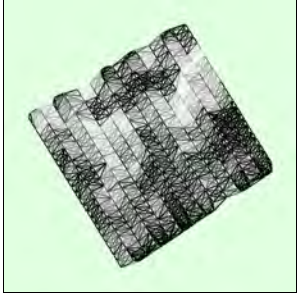
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	25156	12651
Min	20075	2306
Max	40402	22251
Mean	25941	12240

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	869446
In 3 Images	268623
In 4 Images	126959
In 5 Images	65304
In 6 Images	38663
In 7 Images	25627
In 8 Images	16777
In 9 Images	10315

In 10 Images	5762
In 11 Images	3107
In 12 Images	1177
In 13 Images	362
In 14 Images	90
In 15 Images	27
In 16 Images	4

2D Keypoint Matches



Number of matches: 25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Top view of the image computed point cloud with a link between matching images. The thickness of the links indicates the number of matched 3D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual inspection of more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

9 out of 362 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

	Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-4.48	-3.98	0.28	0.28	0.00
-	-3.98	-2.69	1.38	0.00	0.00
-	-2.69	-1.79	2.21	1.66	0.00
-	-1.79	-0.90	7.18	4.14	3.04
-	-0.90	0.00	16.02	15.75	11.33
-	0.00	0.90	24.59	25.97	34.53
-	0.90	1.79	23.48	23.76	32.04
-	1.79	2.69	14.64	19.81	16.30
-	2.69	3.98	5.80	7.46	2.76
-	3.98	4.48	1.66	1.10	0.00
-	4.48	-	0.83	0.00	0.00
-	-0.034787	0.103140	0.059653	0.097219	0.027414
Mean [m]	-0.034787	0.103140	0.059653	0.097219	0.027414
Sigma [m]	1.541360	1.301789	1.305649	1.305649	0.827414
RMS Error [m]	1.541752	1.305649	1.305649	1.305649	0.827414

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between 4.5 and 4.5 times the mean accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predicted error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

	Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
-	[1.00, 1.00]	79.28	81.22	93.60
-	[-2.00, 2.00]	96.13	96.02	100.00
-	[-3.00, 3.00]	99.40	99.45	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	1.728199	1.728199	1.728199	2.331724
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.302607	0.302607	0.302607	0.258755

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Calibration Orientation Variance		RMS (Rope)
Omega	Phi	3.73/224
	Chi	3.087 177
Kappa		7.961628

Calibration RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU W0540 @2.39GHz	
RAM	8GB	
Graphics	NVIDIA GeForce RTX 3080 (Driver: 456.54.0), OpenGL: OpenCL (Driver: unknown), RDP Encoder: Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)	
Operating System	Windows 7 Enterprise, 64-bit	
Camera Model	DSC-W0230 _4.L_45980672 (RGB)	
Image Coordinate System	WGS84	
Output Coordinate System	WGS84 / UTM Zone 11N (epsg:31466)	
Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1	
Aerial Grid or Contour	Aerial Grid or Contour	
Adapted: Matching Image	No	
Adapted: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no	
Adapted: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic	
Adapted: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes	

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (12.3 (cm/pixel))
DSM Files	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	Yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	01h:27m:08s
Time for Orthomosaic Generation	03h:49m:44s

Quality Report

Generated with PostFlight Terra 3.0 Version 4.0.104

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyse the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyse the Quality Report

Summary

Project	9
Processed	2016-05-16 18:42:46
Average Ground Sampling Distance (GSD)	13.64 cm / 5.37 in
Area Covered	4.1177 km ² / 411.765 ha / 1.5907 sq. mi. / 1016.02 acres
Time for Initial Processing (without report)	25m:28s

Quality Check

Images	median of 27519 keypoints per image	✓
Dataset	83 out of 83 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.25% relative difference between initial and optimised internal camera parameters	✓
Matching	median of 14950.9 matches per calibrated image	✓
Outlier filtering	yes, no 3D GCP	⚠

Preview

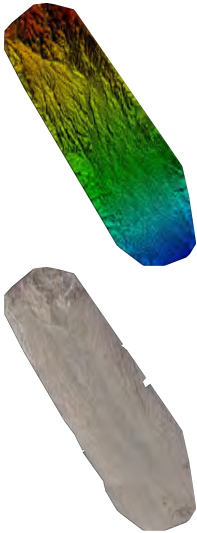


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	83 out of 83
Number of Outlier Images	83 out of 83

Initial Image Positions

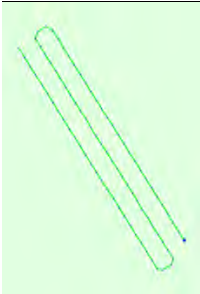


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line shows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCP's Manual Tie Points Positions

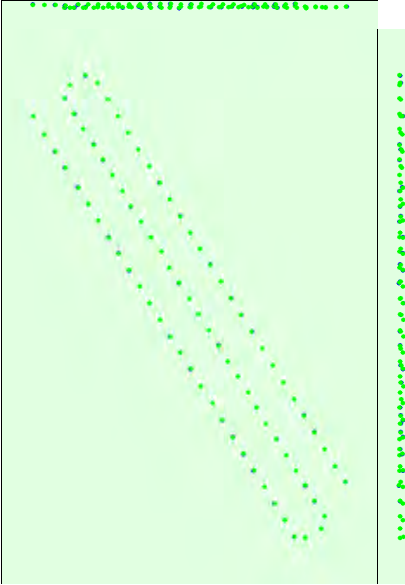


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCP's initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

Overlap

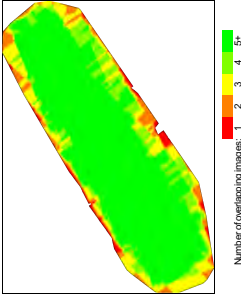


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the surface. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1272953
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	447035
Mean Reprojection Error [pixels]	0.189535

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4_4_4896x3672 (RGB), Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: 08-04-WX220_4_4_4896x3672

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel]	2447.597 [pixel]	1836.004 [pixel]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3619.915 [pixel]	2475.648 [pixel]	1874.383 [pixel]	0.001	-0.024	0.023	0.003	0.002
Delta	8.369 [mm]	3.120 [mm]	2.352 [mm]					

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	27519	14891
Min	20764	4919
Max	46385	25335
Mean	28846	15337

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	274988
In 3 Images	85333
In 4 Images	38268
In 5 Images	18630
In 6 Images	10810
In 7 Images	7968
In 8 Images	5156
In 9 Images	3074
In 10 Images	1596
In 11 Images	870
In 12 Images	410
In 13 Images	172
In 14 Images	42

2D Keypoint Matches



Figure 5: Top view of the image computed overlap with its keypoint matches shown. The color scale of the table indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links that require manual inspection or more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

0 out of 82 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

	Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-	-	0.00	0.00	0.00
-	-4.16	-3.33	0.00	0.00	0.00
-	-3.33	-2.50	1.20	1.20	0.00
-	-2.50	-1.67	6.02	4.82	2.41
-	-1.67	-0.83	21.69	20.46	14.46
-	-0.83	0.00	22.89	28.82	28.82
-	0.00	0.83	24.10	24.10	36.14
-	0.83	1.67	15.66	14.46	16.87
-	1.67	2.50	6.02	2.41	1.20
-	2.50	3.33	1.20	2.41	0.00

3.33	4.16	1.20	0.00	0.00
4.16	-	0.00	1.20	0.00
Mean[m]				
-0.011976				
-0.018212				
0.018213				
Sigma[m]				
1.200130				
1.184948				
0.871616				
RMS Error [m]				
1.200190				
1.184988				
0.872028				

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and +1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images in which the geolocation error is within the specified interval. The last column shows the percentage of images in which the geolocation error is within the specified interval and computed image positions. Note that the image geolocation error do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	84.34	84.34	100.00
	98.80	98.80	100.00
	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
	100.00	100.00	100.00
	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy[m]			
1.638133			
2.459783			
Sigma of Geolocation Accuracy[m]			
0.055500			
0.178399			

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientation Variance	RMS [degree]
Omega	3.510264
Psi	3.687272
Kappa	7.753413

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU V05540 @2.50GHz
RAM	64 GB
Video Card	Nvidia GeForce RTX 3090
Display Adapter	MSDMA (Driver: 10.1.2816.0), ROPDD Chained DD (Driver: unknown), ROP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), ROP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Enterprise 64-bit
Camera Model	DSO-M220_4L_45968072 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84
Image Coordinate System	WGS84 / UTMZone 11N (epsg:46)
Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pyramid	Awali Grid or Conboid
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscala, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Truncated Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 100000, Texture Size: 6192x6192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Abnormality	no
Time for Point Cloud Densification	44m:52s
Time for 3D Truncated Mesh Generation	12m:27s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	15164687
Average Density (per m³)	1.33

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (13.6 (m/pixel))
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	25m:14s
Time for Orthomosaic Generation	45m:28s

Quality Report

**Important:** Click on the different icons for:

 Help to analyze the results in the Quality Report

 Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary	
Project	2
Processed	2016-05-16 16:31:19
Average Ground Sampling Distance (GSD)	12.27 cm / 4.83 in
Area Covered	16.896 km² / 1689.96 ha / 65284 sq. mi. / 4178.15 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:10m:45s

Quality Check	
Images	median of 31954 keypoints per image
Dataset	596 out of 596 images calibrated (100%), all images enabled
Camera Optimization	0.61% relative difference between initial and optimized internal camera parameters
Matching	median of 108123 matches per calibrated image
Georeferencing	yes, no 3D GCP

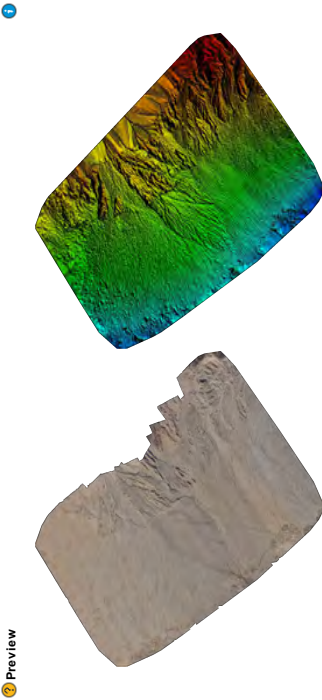


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	596 out of 596
Number of Geolocated Images	596 out of 596

Initial Image Positions

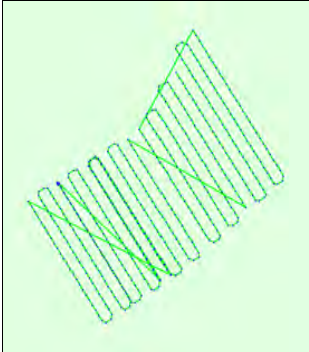


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

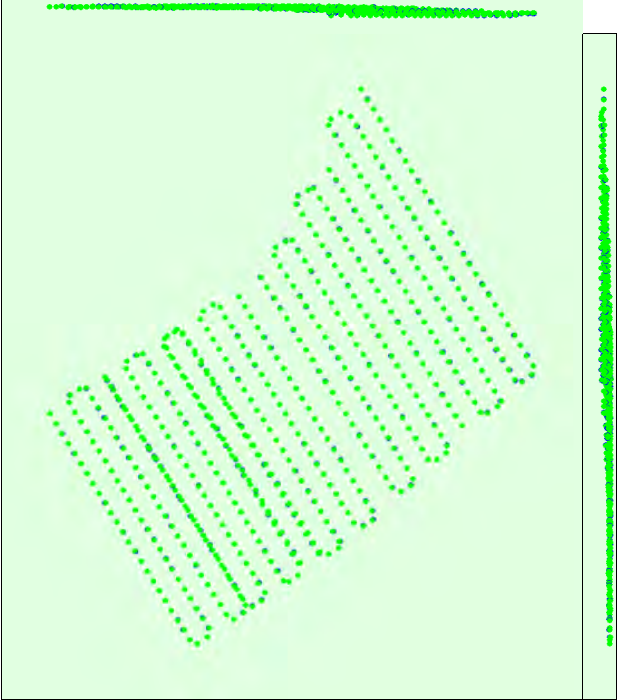


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

Overlap

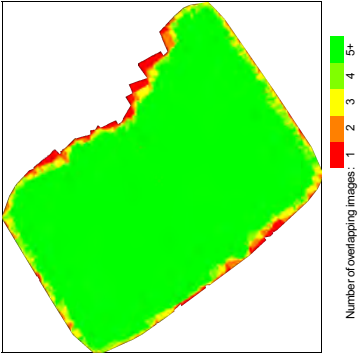


Figure 4. Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	6054168
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1977802
Mean Reprojection Error [pixels]	0.173606

Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB), Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: DSC-WX220_4.4_4896x3672

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel]	2447.597 [pixel]	1836.004 [pixel]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3650.654 [pixel]	2488.126 [pixel]	1876.543 [pixel]	0.003	-0.020	0.018	0.004	0.004

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

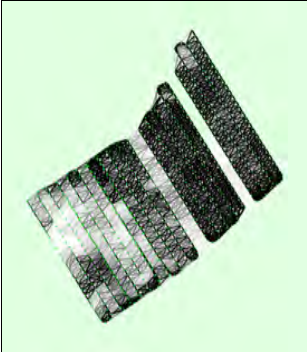
2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	31954	10812
Min	20014	796
Max	55201	24244
Mean	33279	10331

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1104306
In 3 Images	388458
In 4 Images	194036
In 5 Images	106936
In 6 Images	68692
In 7 Images	46593
In 8 Images	30690
In 9 Images	17532
In 10 Images	9783
In 11 Images	5343
In 12 Images	2701
In 13 Images	1230
In 14 Images	702
In 15 Images	449
In 16 Images	217
In 17 Images	86
In 18 Images	47
In 19 Images	17
In 20 Images	8
In 21 Images	6

2D Keypoint Matches



Number of matches
25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5. Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual file points or more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

0 out of 586 geolocated and calibrated images have been labelled as inaccurate.

	Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-	-4.72	0.51	0.51	0.00
-4.72	-3.77	-3.77	2.05	0.17	0.00
-3.77	-2.83	-2.83	4.44	1.19	0.51
-2.83	-1.89	-1.89	4.61	4.10	5.63
-1.89	-0.94	-0.94	11.43	12.12	15.36
-0.94	0.00	0.00	21.50	30.20	27.13

1

Important: Click on the different icons for:

2

Help to analyze the results in the Quality Report

3

Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	3
Processed	2016-05-17 10:20:43
Average Ground Sampling Distance (GSD)	13.79 cm / 5.43 in
Area Covered	4.3364 km ² / 433.644 ha / 1.6752 sq. mi. / 1072.11 acres
Time for Initial Processing (without report)	15m:58s

Quality Check

Images	median of 33090 keypoints per image
Dataset	88 out of 88 images calibrated (100%), all images enabled
Camera Optimization	0.63% relative difference between initial and optimized internal camera parameters
Matching	median of 18663.8 matches per calibrated image
Georeferencing	yes, no 3D GCP

Preview

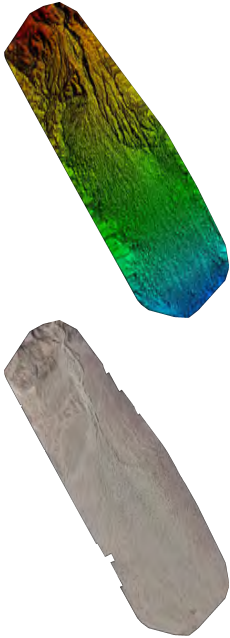


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before denormalization.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	88 out of 88
Number of Geolocated Images	88 out of 88

Initial Image Positions

0.00	0.94	25.77	29.01	28.67
0.94	1.89	15.70	17.24	14.33
1.89	2.83	9.39	3.58	6.83
2.83	3.77	2.73	1.54	1.37
3.77	4.72	1.54	0.17	0.17
4.72	-	0.34	0.17	0.00
Mean [m]		0.103578	0.018375	0.065242
Signs [m]		1.759929	1.263116	1.256220
RMS Error [m]		1.73027	1.263250	1.259910

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the real and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	67.75	81.91	93.00
[-2.00, 2.00]	91.13	96.93	100.00
[-3.00, 3.00]	97.78	99.15	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	1.588116	1.568116	2.285794
Signs of Geolocation Accuracy [m]	0.240677	0.240677	0.396568

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.888494
Phi	3.319367
Kappa	7.182414

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 @ 2.10GHz RAM: 24GB GPU: NVIDIA Quadro K4000 (Driver: 10.18.13.5456), RDPDD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Ultimate, 64-bit
Camera Model	DSC-WX220_4.4_4896x6772 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 11N
Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: no

Point Cloud Denormalization details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal

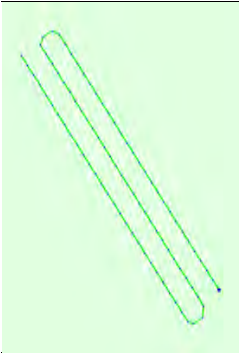


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the image 1 in line starting from the large blue dot.

2 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

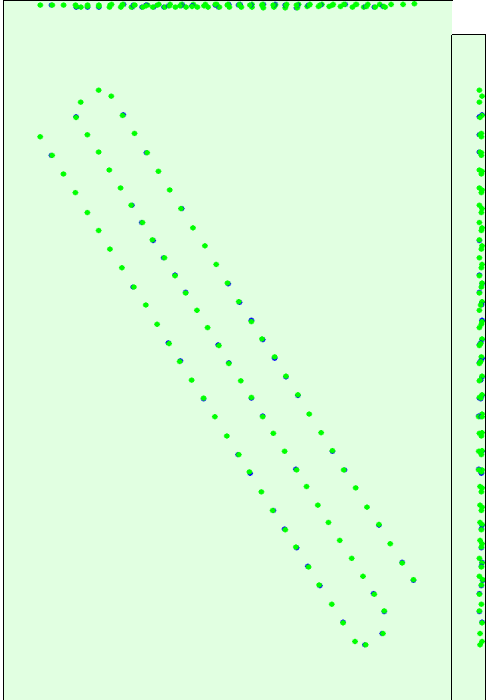
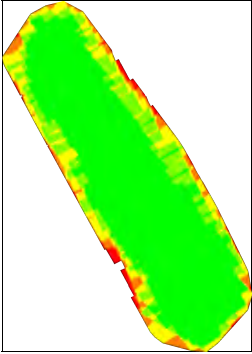


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

2 Overlap



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap, which means that the images are not well aligned. Black areas indicate no overlap. The number of overlapping images is 5. Images for very good quality results will be generated in long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for support materials).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1648288
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	594851
Mean Reprojection Error [pixels]	0.226747

2 Internal Camera Parameters

DSC-WX220_4.4_4896x3672 (RGB), Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.627 [mm]

EXIF ID: DSC-WX220_4.4_4896x3672

	Focal Length	Principal Point X	Principal Point Y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3628.284 [pixel]	2447.997 [pixel]	1836.004 [pixel]	0.012	-0.045	0.050	0.005	0.003
Optimized Values	3651.182 [pixel]	2472.179 [pixel]	1897.192 [pixel]	0.002	-0.026	0.026	0.004	0.002

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. While indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled to better its collation.

2 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	33090	18664
Min	22246	6180
Max	51436	25398
Mean	34371	18731

2 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	363421
In 3 Images	117288

In 4 Images	50365
In 5 Images	23126
In 6 Images	13674
In 7 Images	9609
In 8 Images	6562
In 9 Images	3254
In 10 Images	1740
In 11 Images	1028
In 12 Images	554
In 13 Images	255
In 14 Images	33
In 15 Images	2

2D Keypoint Matches



Number of matches
25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 3D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual file ports or more images.

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

0 out of 88 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.						
Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]		
-	-4.18	3.41	1.14	0.00		
-4.18	-3.34	2.27	1.14	0.00		
-3.34	-2.51	0.00	3.41	0.00		
-2.51	-1.67	7.95	7.95	1.14		
-1.67	-0.84	17.05	10.23	15.91		
-0.84	0.00	26.14	21.59	32.95		
0.00	0.84	13.64	18.18	34.09		
0.84	1.67	9.09	27.27	11.36		
1.67	2.51	9.09	7.95	3.41		
2.51	3.34	6.82	1.14	1.14		
3.34	4.18	3.41	0.00	0.00		
4.18	-	1.14	0.00	0.00		
Mean [m]		0.012089	0.014118	0.024223		
Sigma [m]		1.876001	1.452603	0.875335		
RMS Error [m]		1.876040	1.452671	0.873871		

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the (real) and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	61.36	69.32	100.00
[2.00, 2.00]	87.59	96.59	100.00
[-3.00, 3.00]	96.59	98.86	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	1.477545	1.477545	2.318818
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.059087	0.059087	0.151222

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	3.540815
Phi	2.8291917
Kappa	4.2471505

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Processing Options

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 @ 2.10GHz RAM: 24GB GPU: NVIDIA Quadro K4000 (Driver: 10.18.13.5459), ROPFD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Ultimate, 64-bit
Camera Model	DSC-WX220_4.1_4896x6772 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 11N (egm96)
Keypoints Image Scale	Full Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group 1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	14m:33s
Time for 3D Textured Mesh Generation	13m:01s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	16168252
Average Density (per m³)	1.29

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (13.8 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	12m 04s
Time for Orthomosaic Generation	21m 40s

Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced Image Groups	group1
Advanced Use Denatification Area	yes
Advanced Use Annotations	yes
Advanced Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Denatification	02h 27m 18s
Time for 3D Textured Mesh Generation	32m 28s

Results

Number of Processed Clusters	2
Number of Generated Tiles	34
Number of 3D Densified Points	101727303
Average Density (per m³)	1.97

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (12.3 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	53m 54s
Time for Orthomosaic Generation	02h 59m 44s