

**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**

---

**Respuesta de la vegetación nativa al trazo de la Falla Agua  
Blanca, Ensenada, Baja California.**

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

Presenta:

**Mariana Elizabeth Espinosa Blas**

Ensenada, Baja California, México

2017

Tesis defendida por  
**Mariana Elizabeth Espinosa Blas**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**M.C. Alejandro Hinojosa Corona**  
Director de tesis

Miembros del comité

**Dra. María Clara Arteaga Uribe**

**Dr. John Fletcher Mackrain**

**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

*Mariana Elizabeth Espinosa Blas © 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 **Mariana Elizabeth Espinosa Blas** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

### **Respuesta de la vegetación nativa al trazo de la Falla Agua Blanca, Ensenada, Baja California.**

Resumen aprobado por:

---

M.C. Alejandro Hinojosa Corona  
**Director de tesis**

La distribución de la vegetación es modulada por diversos factores ambientales como la disponibilidad de agua, clima, orientación de laderas, tipo de suelo, elevación, relieve entre otros. En el caso de la disponibilidad de agua, discontinuidades como rocas fracturadas y fallas pueden actuar como barreras, conductos o una combinación de ambas en el desplazamiento del agua, donde la vegetación la aprovecha para su desarrollo. Este trabajo evaluó si la Falla Agua Blanca (FAB) tiene algún efecto en la distribución espacial de la vegetación nativa; para ello se prospectó un corredor a lo largo de la falla por vegetación nativa anómala (más verde y/o más alta que la de sus alrededores), asociándola con el agua atrapada a lo largo de la zona de falla. Para la anomalía de altura se utilizó una densa nube de puntos de la cubierta terrestre a lo largo de la falla generada en un levantamiento aéreo LiDAR y por reconstrucción fotogramétrica por dron. De la nube de puntos se calculó la estructura vertical de la vegetación normalizando su altura con respecto al nivel del suelo, construyendo así modelos de altura de dosel. Para el verdor de la vegetación, se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de una imagen Landsat 8 contemporánea al levantamiento LiDAR. Se identificaron zonas de acumulación de flujo superficial de agua, donde la vegetación se favorece por la disponibilidad de agua a lo largo de cañadas y corredores riparios. Además, se analizó la anomalía en la vegetación con respecto a la orientación de laderas Norte y Sur. Los resultados revelan la existencia de parches de vegetación anómala a lo largo de la FAB e indican que la vegetación anómala ocurre en cañadas y laderas Norte. Se hizo un comparativo entre las nubes de puntos generadas por levantamiento aéreo LiDAR y fotogrametría por dron, donde la nube LiDAR tiene ventajas por los múltiples rebotes a pesar de la menor densidad de puntos, sin embargo, la nube por fotogrametría no es despreciable como una alternativa de bajo costo.

**Palabras clave: Percepción Remota, Vegetación, LiDAR, Falla Agua Blanca**

Abstract of the thesis presented **by Mariana Elizabeth Espinosa Blas** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

**Response of native vegetation to Agua Blanca Fault trace, Ensenada, Baja California.**

Abstract approved by:

---

M.C. Alejandro Hinojosa Corona  
**Thesis Director**

The spatial distribution vegetation is modulated by various environmental factors such as water availability, climate, slope orientation, soil type, elevation, relief, among others. In the case of water availability, discontinuities such as fractured rocks and faults can act as barriers, conduits or a combination of both for a water passage, where vegetation takes advantage of the availability for its development. The objective of this research is to evaluate if the Agua Blanca Fault (ABF) has any effect on the spatial distribution of native vegetation. A corridor along the fault was prospected for anomalous native vegetation, anomalous due to its height and/or greenness, associating the vegetation anomaly to the water trapped in fractures along the fault zone. Anomalous vegetation is the one that is greener and/or higher than that of its surroundings. For the height anomaly we used a dense point cloud of the ground cover in a corridor along the fault generated from an aerial LiDAR survey and by photogrammetric reconstruction by drone. From the point cloud, we calculated the vertical structure of the vegetation, normalizing its height with respect to the ground level, thus constructing Canopy Height Models. For the vegetation greenness, we used the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from a Landsat 8 image representative to the end of the dry season and contemporary to the LiDAR survey. Areas of flow accumulation were identified, where the vegetation is favored by the greater availability of water along canyons and riparian corridors. The results reveal patches of anomalous vegetation along the ABF, also indicate that anomalous vegetation occurs along the thalweg of canyons and preferably on north facing slopes. We did a comparison between LiDAR and drone photogrammetry derived point clouds, where the LiDAR cloud has advantages due to the multiple rebounds of a laser pulse despite the lower point density; however the cloud by photogrammetry is not negligible as a low cost alternative.

**Keywords: Remote sensing, Vegetation, LiDAR, Agua Blanca Fault**

## Dedicatoria

Por el amor, paciencia, tiempo, enseñanzas y

el apoyo incondicional que me han otorgado:

A mi mamá (Ana), tías (Lily y Wando), hermano (César) y abuela.

Los Amo.

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por la oportunidad de ingresar al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra en la orientación de Geociencias Ambientales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado a través del programa de becas de maestría con número de becario: 338056.

Al M.C. Alejandro Hinojosa Corona por el apoyo, paciencia, enseñanzas y consejos brindados a lo largo de este periodo al realizar el presente trabajo de tesis.

A los miembros del comité: Dra. María Clara Arteaga Uribe, Dr. John Fletcher Mackrain y M.C. Francisco Suárez Vidal (QEPD), por todos sus comentarios, apoyo y consejos otorgados.

Al personal técnico: Sergio Arregui, Luis Gradilla y Octavio Meillón por su valioso apoyo en salidas de campo.

Al personal administrativo de Ciencias de la Tierra, especialmente a Ana Rosa Soto y Olympia Caudillo por su apoyo, consejos y el cafecito matutino.

A Hiram Rivera y José Delgadillo por sus comentarios y apoyo en salidas de campo.

A Martin Isunberg por la licencia LASMoons otorgada para continuar utilizando el programa LAsTools.

A mis tíos y primos, por el indiscutible amor, apoyo y consejos otorgados.

A mis amigas y colegas: Yadira y Patricia, gracias por su gran apoyo y su maravillosa amistad.

A mis amigos: Mayra, Hugo, Hebert, Sergio, Leandro, Ricardo, Abel, German, Jonathan, Miguel, Karina y Diego. Gracias por todo.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hidrogeología.....	1
1.2 Vegetación nativa de la región .....	1
1.3 Percepción remota.....	3
1.3.1 Sensor pasivo .....	3
1.3.2 Sensor activo: LiDAR (Light Detection and Ranging) .....	4
1.4 Localización de la zona de estudio.....	5
1.5 Justificación.....	6
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo general .....	7
1.6.2 Objetivos específicos .....	7
<b>Capítulo 2. Metodología</b> .....	<b>8</b>
2.1. Levantamiento aéreo LiDAR .....	8
2.2 Fotogrametría por dron .....	9
2.3 Herramientas para el procesado de fotografías aéreas y análisis espacial .....	11
2.4 Procesamiento de las nubes de puntos .....	12
2.5 Análisis hidrológico .....	13
2.6 Orientación de laderas.....	14
2.7 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	14
2.8 Modelo Digital de Altura del Dosel, Canopy Height Model (CHM):.....	16
2.9 Mediciones de árboles individuales.....	17
2.10 Análisis espacial .....	18
<b>Capítulo 3. Resultados</b> .....	<b>19</b>
3.1 Análisis hidrológico: Zonas de acumulación de flujo y cuencas .....	19
3.2 NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada).....	20

3.3 Orientación de laderas.....	21
3.4 Modelo de Altura del Dosel (CHM, Canopy Height Model).....	22
3.5 Identificación y medición de árboles individuales.....	25
3.6 Cálculo del Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital del Terreno.....	26
3.7 Análisis espacial entre variables.....	30
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>35</b>
4.1 Análisis espacial de la FAB y la vegetación.....	35
4.2 LiDAR aéreo vs Fotogrametría por dron.....	37
4.3 Contribución.....	38
4.4 Ejemplo de la relación falla-vegetación-agua en la FSA.....	38
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>40</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>42</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>45</b>

## Lista de figuras

Figura	Página	
1	<p>Bandas espectrales de los sensores a bordo de la constelación LANDSAT que han registrado la cubierta terrestre casi ininterrumpidamente desde 1972 con el LANDSAT 1 hasta la fecha con el LANDSAT 8. Se muestran los sensores desde las primeras versiones hasta el más reciente. El sensor más antiguo el MSS (Multi Spectral Scanner), seguido del TM (Thematic Mapper), y posteriormente el ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) que incorpora la banda pancromática (8), al igual que el OLI (Operational Land Imager) a bordo del Landsat 8 en combinación con TIRS (Thermal Infrared Sensor). De fondo la curva de transmitancia atmosférica de la tierra en función de la longitud de onda. (Figura tomada de: USGS, 2013). .....</p>	4
2	<p>Localización de la Falla Agua Blanca (FAB) y de las Fallas regionales (Imperial, Maximinos, Vallecitos, San Miguel, Tres Hermanos, entre otras), las flechas rojas representan los vectores de velocidad de estaciones GPS en sistema ITRF2000 tomados de González-García et al., (2003). En él se insertó los eventos sísmicos de magnitud &gt;2.5 registrados entre 1979 y 2016 por RESNOM (Red Sísmica del Noroeste de México), clasificados en 3 clases, de color negro aquellos eventos de magnitud entre 2.5 y 4, eventos <math>\geq 4.0</math> y <math>\leq 5.0</math> (color rojo) y por último la tercera clase correspondiente a eventos <math>\geq 5.0</math> (triángulo amarillo).....</p>	6
3	<p>Huella del levantamiento aéreo LiDAR realizado el 2 de Julio del 2014 con una densidad de puntos promedio de 5 puntos/m<sup>2</sup> a lo largo de la Falla Agua Blanca, pasando por el Valle Agua Blanca, Valle de Santo Tomás y parte de la península de Punta Banda.....</p>	9
4	<p>Ejemplo de cómo bajo el método Structure from Motion (SfM) se identifican rasgos similares de un objeto y se toman las imágenes en diferentes ángulos para la reconstrucción 3D a partir del traslape de las mismas (imagen tomada y modificada de Westoby et al., 2012).....</p>	10
5	<p>Modelo de geoprocésamiento desarrollado en ArcGis 10.1 para el análisis hidrológico a partir de un MDE SRTM1 para extraer las zonas de acumulación de flujo y cuencas que crucen la traza de la FAB.....</p>	13
6	<p>Respuesta espectral de diferentes superficies con diferentes longitudes de onda desde el visible al infrarrojo (figura tomada y modificada de: Singhal y Gupta, 2010)</p>	15
7	<p>Hipsómetro NIKON Forestry 550, herramienta para medir árboles.....</p>	17
8	<p>Identificación de zonas de acumulación de flujo (líneas azules) y subcuencas (Arroyo Las Ánimas, A. Santo Tomás y A. San Vicente) que crucen la traza de la Falla Agua Blanca (línea roja) a partir de un MDE SRTM1.....</p>	19

9	Índice de vegetación NDVI con un umbral de 0.15 a 0.40, indicando zonas con alta cobertura vegetal a lo largo de la FAB, calculado a partir de imágenes LANDSAT 8 OLI/TIRS. En la parte inferior se muestran 2 zonas amplificadas para la observación a mayor detalle de las zonas con alta cobertura, la primera de ellas en la península de Punta Banda (izquierda) y hacia el Valle Agua Blanca cercano al Cañón de Dolores (derecha) es evidente zonas de alta cobertura de vegetación (NDVI).....	20
10	Orientación de laderas clasificadas entre Norte (Azimut entre 292.5°-67.5°) y Sur (Azimut entre 112.5°-247.5°) a lo largo de la FAB conjuntamente se muestra los valores de NDVI mayores a 0.15 donde se observa que la mayor cobertura se encuentra en las laderas orientadas hacia el Norte (color verde).....	21
11	Segmento Norte (Punta Banda) de la FAB (línea negra) donde se presentan los CHMs en una escala de elevación de 0 a 20 metros sobre el terreno. En la parte inferior la imagen LANDSAT 8 OLI/TIRS muestra las zonas de acumulación de flujo.....	22
12	Segmento Centro (Valle de Santo Tomás) donde se observa la escasez de vegetación de altura mayor a 10 metros, en la parte inferior se muestra una imagen satelital (LANDSAT 8 OLI/TIRS) con los vectores de acumulación de flujo, donde se puede observar la existencia de zonas de agricultura.....	23
13	Localización de la sección 1 del segmento Sur (Valle de Agua Blanca), donde se observa en línea azul las zonas de acumulación de flujo y a su vez la escasez de alta vegetación corroborando lo mostrado del CHM con la imagen (LANDSAT 8 OLI/TIRS) de terreno real (parte inferior).....	24
14	Segmento Sur (sección 2) ubicado al final del Valle de Agua Blanca, donde se observa particularmente las zonas de acumulación de flujo siguiendo la orografía del terreno, junto a dos parches de vegetación, uno de ellos cercano a la zona de agricultura que corresponde al encinal del rancho Agua Blanca y otro paralelo a la traza de la falla.....	24
15	Localización de los árboles individuales segmentados a partir de los CHMs y medidos en campo.....	26
16	Modelos Digitales de la Superficie (MDS) calculados a partir de una nube de puntos LiDAR (a) y fotogrametría por dron (b), en los cuales se sobrepuso la vegetación mayor a 2 m filtrando sus respectivos CHMs, en donde se puede apreciar la similitud en los resultados.....	28
17	Modelos Digitales del Terreno (MDT) calculados a partir de una nube de puntos LiDAR (a) y fotogrametría por dron (b), en ellos se ha sobrepuesto un segmento de la falla AB.....	29
18	Intersección entre las variables orientación de laderas (Norte y Sur), zonas de acumulación de flujo, vegetación > 2 metros y trazo de la falla para el segmento Norte (Punta Banda) se identificaron en esta sección 2 zonas de alta acumulación (A y B) las cuales se observa en la imagen LANDSAT 8 OLI/TIRS (parte inferior).....	30

19	Intersección de las variables acumulación de flujo (línea azul), orientación de laderas (Norte y Sur) y la vegetación mayor a 2 metros calculada a partir de los modelos CHM, para el segmento Centro (Valle de Santo Tomás).....	31
20	Intersección en el segmento Sur de la Falla ubicado en el Valle Agua Blanca (sección 1), donde las zonas de identificadas como vegetación alta se encuentran mayormente orientada hacia el Sur.....	32
21	Intersección entre las variables para el segmento Sur (sección 2) al final del corredor del vuelo LiDAR donde se identifican 3 zonas de interés (D, E y L4), así mismo se observan zonas agrícolas.....	32
22	Localización de zonas de alta cobertura de vegetación (NDVI) a lo largo de la FAB junto a zonas de acumulación de flujo (línea azul), donde se identificaron 10 zonas de interés y se incorporaron los sitios de efectos prominentes por agua subterránea incorporados por Allen et al., (1960).....	33
23	Valores promedio de altura del dosel por zona identificada (color verde) con respecto a la orientación de las laderas, teniendo de color rojo laderas hacia el Sur y en verde laderas orientadas hacia el Norte.....	34
24	Valores promedio de NDVI a lo largo de la FAB con respecto a la orientación de laderas clasificadas en Norte (verde) y Sur (rojo) para las zonas identificadas.....	34
25	Segmento de la Falla San Andrés (línea negra) cercano al valle de Coachella en el Desierto Colorado (33°50'14.57"N, 116°18'37.70"O) donde se resaltó la vegetación anómala por verdor (A) a través del índice NDVI calculado a partir de la fotografía infrarroja (C). Vegetación anómala por altura resaltada a partir del modelo de altura de dosel CHM (B) en un parche de vegetación a lo largo de la falla que se desarrolla gracias a la persistente disponibilidad de agua. En la foto infrarroja (C) se indica la posición donde fueron tomadas las fotos D y E. La foto D tomada por Stabins y disponible en Google Earth, ubicación: 33°49'40.97"N, 116°17'36.50"O y la foto E tomada por Denis Lambert disponible en Google Earth, ubicación: 33°50'51.95"N, 116°18'47.63"O. La foto E captura una vista al horizonte hacia el SE donde se aprecia la línea de palmeras a lo largo FSA.....	39
26	Vegetación con altura mayor a los 2 metros filtrada de los CHM generados a partir de LiDAR para la Península de Punta Banda, donde se observa claramente el alineamiento de la vegetación con la traza de la Falla donde se identificaron 2 parches de vegetación anómala (A y B).....	55
27	Parche de vegetación anómala identificado a partir de los productos derivados por LiDAR y fotogrametría por dron, ubicado en Las Ánimas (Península de Punta Banda) donde se observa como la vegetación anómala se caracteriza por la altura sobresaliente y el tipo de vegetación encontrado en campo.....	55

28	Zonas de vegetación identificadas con una altura mayor a los 2 metros a partir de los modelos CHM, en esta sección la ladera que domina es la exposición hacia el Sur, donde se puede observar la escasez de vegetación de la altura establecida, y la que existe esta sobre o paralela a la falla.....	56
29	Visualización de la sección Sur ubicada a lo largo del Valle Agua Blanca, en la cual se puede observar que escasea la presencia de vegetación y la existente es de poca altura, es decir, no mayor al umbral establecido en el filtrado del CHM por lo que solo se puede observar claramente 2 zonas ubicadas sobre la traza de la falla.....	57

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Descripción estándar de las principales clases de una nube de puntos LiDAR en formato <i>.las</i> versión 1.2 por ASPRS (2008).....	12
2	Descripción de los valores del índice de vegetación NDVI (USGS, 2015).....	16
3	Medición de alturas máximas del dosel de árboles individuales identificados en los modelos CHM.....	25
4	Descripción de los vuelos realizados con el dron Ebee.....	27
5	Nube de puntos de árboles medidos en campo.....	51
6	Nube de puntos de árboles medidos en campo.....	52
7	Nube de puntos de árboles medidos en campo.....	53
8	Nube de puntos de árboles medidos en campo.....	54

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Hidrogeología

En términos geomorfológicos, diversos procesos (fluviales, erosivos, tectónicos, etc.) influyen en la evolución del paisaje, permitiendo desarrollar ciertas características (Keller y Pinter, 1996). Procesos tectónicos como fracturas (rocas que han presentado alguna rotura longitudinal sin un movimiento aparente) y fallas (fractura con un desplazamiento relativo generado por una suma de esfuerzos, clasificadas de acuerdo a su movimiento relativo entre verticales, horizontales u oblicuos) son de gran interés ya que estos influyen tanto en la disponibilidad de agua superficial como subterránea (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Estas discontinuidades geológicas facilitan el almacenamiento y movimiento de fluidos, ya que bajo ciertas circunstancias pueden actuar como barreras, conductos o una combinación de ambos en el movimiento del fluido (Singhal y Gupta, 2010; Hooper, 1991). Tal que, una falla se comportará como una barrera cuando los fluidos sean incapaces de fluir lateralmente a través de ella debido a una capa impermeable a lo largo del plano de la falla; por otro lado, mientras un fluido pueda pasar verticalmente a lo largo de la falla, se dice que la falla se está comportando como un conducto; y cuando el comportamiento es una combinación de ambas (barrera y conducto) el fluido tiene la habilidad de pasar parcialmente a lo largo de la falla en el mismo tiempo (Nasreen, 2003). Por ejemplo, cuando una falla es activa, la permeabilidad incrementa y con ello es posible el aumento de movimientos de fluidos; mientras que en una falla inactiva, la permeabilidad se reduce, y con ello el movimiento del fluidos se retrasa (Hooper, 1991). Este comportamiento de fluidos en zonas de fallas, puede tener grandes efectos sobre la variabilidad en la disponibilidad del recurso hídrico para el aprovechamiento de las plantas, y con ello influir sobre la distribución y el desarrollo de la vegetación.

## 1.2 Vegetación nativa de la región

Por vegetación nativa se entiende al conjunto de plantas que pertenecen a una región determinada, bajo ciertas circunstancias ambientales que favorecen su desarrollo, tales como: el clima, orientación de laderas, tipo de suelo, topografía, etc.

Unas de las condiciones ambientales más importante es el recurso hídrico y su relación suelo-vegetación, debido a que la mayoría de las plantas obtienen el agua del suelo. En la región prevalecen suelos someros, poco desarrollados como Feozem, Fluvisol, Litosol y Regosol, siendo la de mayor cobertura el suelo Litosol

(INIFAP y CONABIO, 1995). La disponibilidad de agua en el suelo dependerá de la infiltración, porosidad, textura, percolación entre otras características físicas y químicas; las cuales en conjunto permiten que el suelo les sirva de sustento y se abastezcan de nutrientes (Acevedo, 1979; López, 2000).

Por lo que la presencia de vegetación nos permite conocer indirectamente el régimen de disponibilidad de agua que hay en una zona. En zonas desérticas la vegetación es escasa y de lento crecimiento, por el contrario en zonas con mayores eventos de precipitación, la vegetación tiende a ser exuberante infiriendo que existen altos niveles de disponibilidad de agua.

La distribución y adaptabilidad de la vegetación en climas mediterráneos (clima seco con lluvias en invierno y veranos cálidos) está influenciada principalmente por el gradiente térmico respuesta de las diferencias en altitud, latitud y topografía (Rzedowski, 1978; citado en: Delgadillo, 1998). Sin embargo, Shreve en 1941 (citado en: Delgadillo, 1998) expresa que las diferencias en topografía, sustrato geológico y del suelo en ocasiones causan mayor efecto en la distribución de la vegetación que la precipitación.

En la región, de acuerdo a la clasificación de vegetación que propone Delgadillo en 1998, existe vegetación costera (marismas y dunas costeras), matorral costero suculento, chaparral, bosque de coníferas, matorral desértico sonoreño hasta bosque subtropical caducifolio. Particularmente a zonas cercanas al área de interés en 1979 Mulroy y colaboradores (citado en: Delgadillo, 1998) indican que en la Península de Punta Banda existen 258 especies de flora vascular de las cuales, 208 especies son nativas, siendo principalmente matorral costero o chaparral.

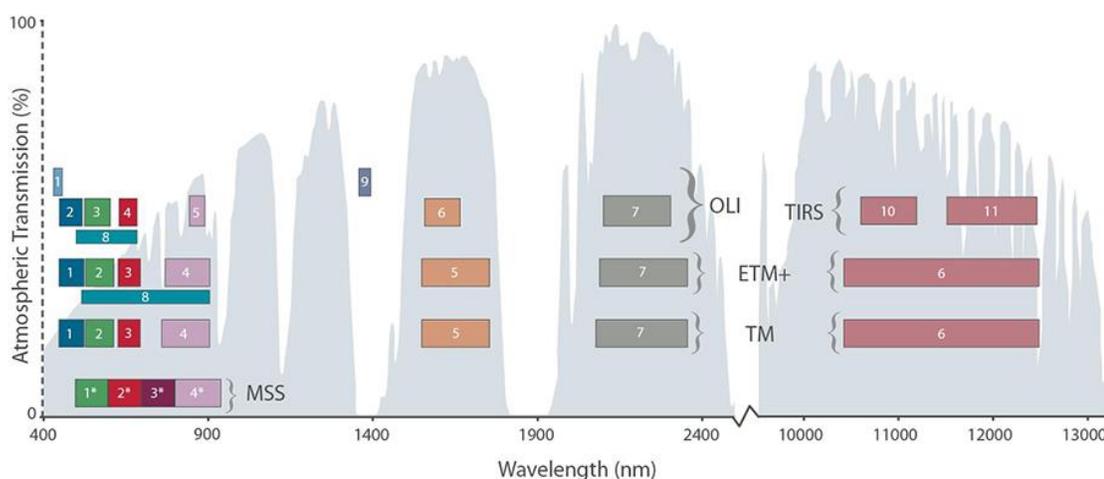
En el caso del matorral costero, éste se puede encontrar en sitios con una extensa cobertura de árboles o bosques, y distribuirse en zonas secas, por ejemplo, en laderas expuestas hacia el Sur. Así mismo en esta región el matorral generalmente se encuentra en zonas cercanas a la línea de costa o hasta 30 km continente adentro (Axelrod I. D., 1978; citado en: Delgadillo, 1998). Por mencionar algunos árboles que se pueden encontrar cercanos a la zona de interés están los encinos, los cuales se pueden encontrar junto a matorrales, sobre diversas rocas madres, así como en suelos aluviales profundos y en ciertos escenarios se pueden encontrar sobre suelos someros; por otro lado, la presencia de encinos está relacionada con la constante disponibilidad de agua, por lo que especies como *Q. agrifolia* y *Q. chrysolepis* pueden formar algunos parches sobre cañadas y laderas, otra especie que se puede encontrar en estos sitios son los Alisos o también llamados Sicomoros (*Platanus racemosa*) que al igual que los encinos se encuentran en zonas riparias, en suelos someros y rocosos (CONABIO, 2016).

## 1.3 Percepción remota

La percepción remota se refiere a tecnologías y procedimientos que tienen como finalidad identificar y caracterizar materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren, a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma (Gilbert et al., 1997). La percepción remota (PR) se clasifica de acuerdo al tipo de sensor (pasivos o activos) que se utiliza para adquirir información geoespacial. Los sensores pasivos, son aquellos que detectan la radiación natural emitida o reflejada de la tierra, mientras que los sensores activos generan su propia fuente de radiación para la adquisición de información. Estos sensores utilizan diferentes longitudes de onda visible ( $0.4 \mu\text{m} - 0.75 \mu\text{m}$ ), infrarrojo cercano ( $0.75 \mu\text{m} - 1.5 \mu\text{m}$ ), infrarrojo termal ( $3 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ ), microondas y ondas radio del espectro electromagnético (Cracknell, 2007).

### 1.3.1 Sensor pasivo

Este sensor se refiere, que a partir de una fuente de radiación natural o reflejada de la tierra adquiere información de los materiales o fenómenos que ocurren en ella. Una vez que la radiación solar incide sobre una superficie, una parte de ésta es reflejada, otra propagada en su interior y una parte es absorbida y otra dispersada, por lo tanto, la energía dispersada emerge de la superficie y se suma a la radiación reflejada (Singhal y Gupta, 2010; Gilbert et. al., 1997; Cracknell, 2007). En la región del espectro ( $0.4 - 3.0 \mu\text{m}$ ) la radiación procedente de las superficies es la radiación solar reflejada, la cual está fuertemente relacionada con la naturaleza del objeto (Gilbert et al., 1997). Este sensor es comúnmente utilizado en diversos estudios relacionados con recursos naturales, donde el principal insumo son las imágenes satelitales (e.g. LANDSAT, MODIS, QuickBird, etc.) (Figura 1), por la accesibilidad a estos productos y por la gran extensión de cobertura, sin embargo, para escalas más grandes, en los últimos años se ha popularizado la incorporación de drones o VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) en estos estudios.



\* MSS bands 1-4 were known as bands 4-7, respectively, on Landsats 1-3

**Figura 1.** Bandas espectrales de los sensores a bordo de la constelación LANDSAT que han registrado la cubierta terrestre casi ininterrumpidamente desde 1972 con el LANDSAT 1 hasta la fecha con el LANDSAT 8. Se muestran los sensores desde las primeras versiones hasta el más reciente. El sensor más antiguo el MSS (Multi Spectral Scanner), seguido del TM (Thematic Mapper), y posteriormente el ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) que incorpora la banda pancromática (8), al igual que el OLI (Operational Land Imager) a bordo del Landsat 8 en combinación con TIRS (Thermal Infrared Sensor). De fondo la curva de transmitancia atmosférica de la tierra en función de la longitud de onda. (Figura tomada de: USGS, 2013).

Una de las principales aplicaciones de los sensores pasivos está relacionada con estudios de la vegetación, ya que a partir de las imágenes satelitales es posible extraer información relevante a partir de índices de vegetación (IV), un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad en distintas longitudes de onda (Gilabert et al., 1997); Aunque existen diversos índices de vegetación, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es uno de los índices de vegetación más usados, ya que nos permite obtener información sobre la tasa de recubrimiento vegetal del suelo, cantidad de biomasa y el estado general de la vegetación (Flores et al., 2001).

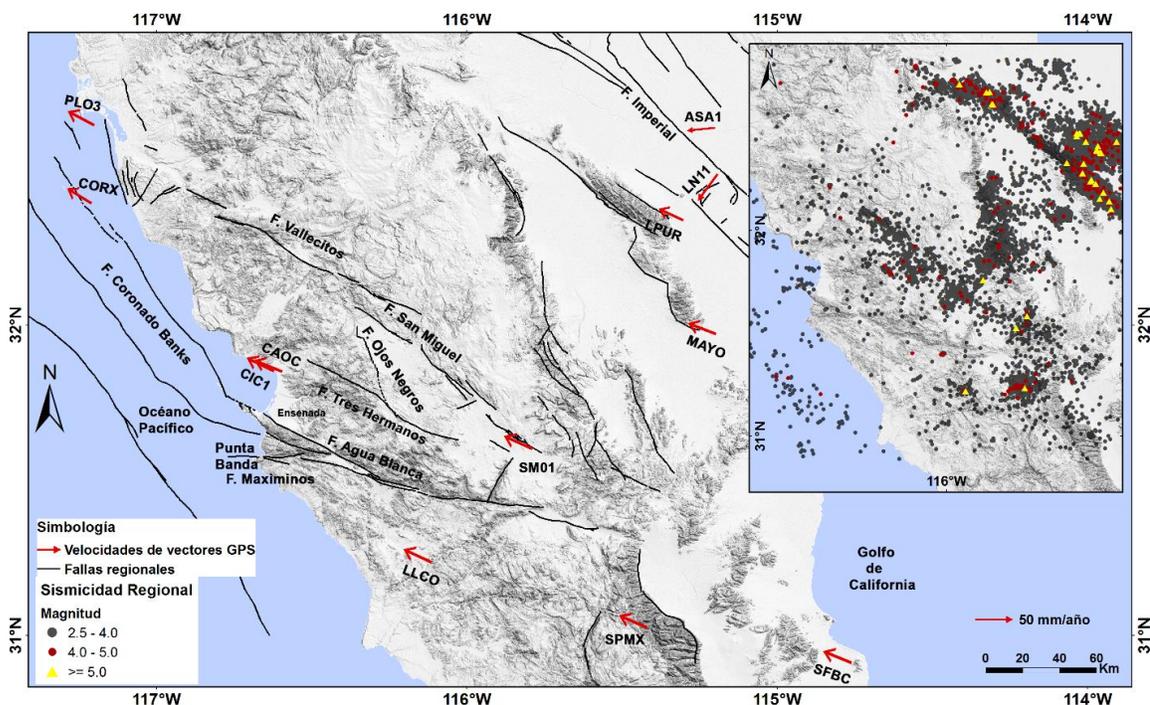
### 1.3.2 Sensor activo: LiDAR (Light Detection and Ranging)

Los sensores activos, son aquellos que a partir de una fuente interna de radiación se hace incidir sobre un objeto y su reflectividad adquiere información sobre este objeto, los principales ejemplos de estos sensores activos son Radar y LiDAR. En este caso particular se hace énfasis a la tecnología LiDAR, acrónimo de *Light Detection And Ranging*, sistema activo que permite obtener información de un objeto basado en un sensor láser; el sistema está integrado por un láser escáner instalado sobre una plataforma (aérea o terrestre), un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y un Sistema Inercial de Navegación (INS), (Wehr y Lohr, 1999). LiDAR mide los intervalos de tiempo entre la emisión de un pulso láser y la recepción de un

retorno después de haber incidido sobre un objeto en la superficie, con lo cual se obtiene un conjunto de datos (nube de puntos) con coordenadas  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ . Dado que se pueden registrar múltiples retornos de un objeto a partir de un mismo pulso láser, este sensor se aplica principalmente en estudios sobre la vegetación, ya que normalmente se obtienen cuatro o más retornos por cada haz láser que incide sobre un árbol. Tal que, se asocia el primer retorno con la copa de los árboles, retornos intermedios se relacionan con la estructura vegetal (tallos, ramas y hojas), y el último retorno con el terreno natural (Jensen, 2007). Entre los parámetros vegetativos que se pueden adquirir a partir de una nube de puntos LiDAR son: altura del dosel, biomasa aérea, área basal, volumen de copa, distribución vertical de los doseles, etc. (Dubayah y Drake, 2000). Estudios sobre la distribución espacio-temporal de distintas especies de árboles, y la estimación de características de la estructura vegetal han demostrado el gran potencial que tiene la tecnología LiDAR (Naesset, 2002; Andersen et al., 2009; Popescu, 2007; García et al., 2010).

#### **1.4 Localización de la zona de estudio**

El sistema de Fallas Agua Blanca (Agua Blanca, Maximinos y Santo Tomás (figura 2) se encuentra en la parte norte de la península de Baja California, México, al Sur de Ensenada. Es uno de los mayores sistemas estructurales con tendencia Este-Oeste que cruza la sierra peninsular (Wong, 1980). La Falla Agua Blanca (FAB), es el principal elemento dentro de la Planicie Costera de Todos Santos (Ensenada, Valle de Maneadero, Bahía de Todos Santos), el desplazamiento de la falla es de rumbo lateral derecho con orientación entre  $N 68^{\circ}-70^{\circ}W$  (Pérez-Flores et al., 2004; Allen et al., 1960). La longitud de la traza es de aproximadamente 130 km; va desde el Paso San Matías, cruzando por el Valle de La Trinidad, Cañón de Dolores, Valle de Agua Blanca, Valle de Santo Tomás, Bahía Soledad, la península de Punta Banda, siguiendo su trazo fuera de la costa (figura 2). La fisiografía de la península de Punta Banda es una clara evidencia del desplazamiento lateral derecho (la mayor evidencia se encuentra desde Punta Banda a Santo Tomás), sin embargo, también hay presencia de transiciones de movimientos laterales a un comportamiento de falla normal, con desplazamiento vertical significativo (Allen et al., 1960). Por otro lado, en el segmento Sur, no hay evidencia de un desplazamiento reciente como en el segmento Norte, no obstante, en esta sección se observan diversas características como escarpes, facetas triangulares, efectos de agua subterránea, alineamientos de vegetación, etc. (Allen et al., 1960; Pérez-Flores et al., 2004). A pesar de su clara firma en la fisiografía, la actividad sísmica a lo largo de ella es escasa, como se muestra en la figura 2. No obstante el registro instrumental sísmico inició en 1979.



**Figura 2.** Localización de la Falla Agua Blanca (FAB) y de las Fallas regionales (Imperial, Maximinos, Vallecitos, San Miguel, Tres Hermanos, entre otras), las flechas rojas representan los vectores de velocidad de estaciones GPS en sistema ITRF2000 tomados de González-García et al., (2003). En él se insertó los eventos sísmicos de magnitud  $>2.5$  registrados entre 1979 y 2016 por RESNOM (Red Sísmica del Noroeste de México), clasificados en 3 clases, de color negro aquellos eventos de magnitud entre 2.5 y 4, eventos  $\geq 4.0$  y  $\leq 5.0$  (color rojo) y por último la tercera clase correspondiente a eventos  $\geq 5.0$  (triángulo amarillo).

## 1.5 Justificación

Se sabe qué características del paisaje consecuencia de procesos geológicos y técnicos (fracturas, fallas, etc.), pueden influir en la disponibilidad del agua y que la presencia de vegetación nos permite conocer indirectamente su disponibilidad en una zona. Esto debido a que la vegetación responde a diversas condiciones ambientales (principalmente a la disponibilidad de agua) para su distribución y desarrollo. Así, el presente trabajo de investigación se enfocara en analizar la distribución de la vegetación nativa a lo largo del trazo de la falla Agua Blanca, a partir de la implementación e integración de nuevas tecnologías en percepción remota que permitan estimar y analizar espacialmente la distribución y estructura vertical de la vegetación a lo largo de la falla.

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es evaluar si el trazo de la Falla Agua Blanca tiene un efecto sobre la distribución espacial de la vegetación nativa a partir de la percepción remota.

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Delimitar el trazo de la Falla Agua Blanca a partir de datos LiDAR.
- Definir cuencas y zonas de acumulación de flujo de agua a partir de un Modelo de Elevación SRTM1 sobre las cuencas que cruzan la Falla Agua Blanca.
- Crear un Modelo Digital de Altura de Dosel a lo largo del corredor sobre la Falla Agua Blanca a partir de datos LiDAR.
- Calcular NDVI (*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*) de la Falla Agua Blanca a partir de imágenes Landsat 8 en fecha cercana al levantamiento LiDAR (Julio 2014) y comparar con el Modelo Digital de Altura de Dosel.
- Definir la orientación de laderas en el trazo de la Falla Agua Blanca.

## Capítulo 2. Metodología

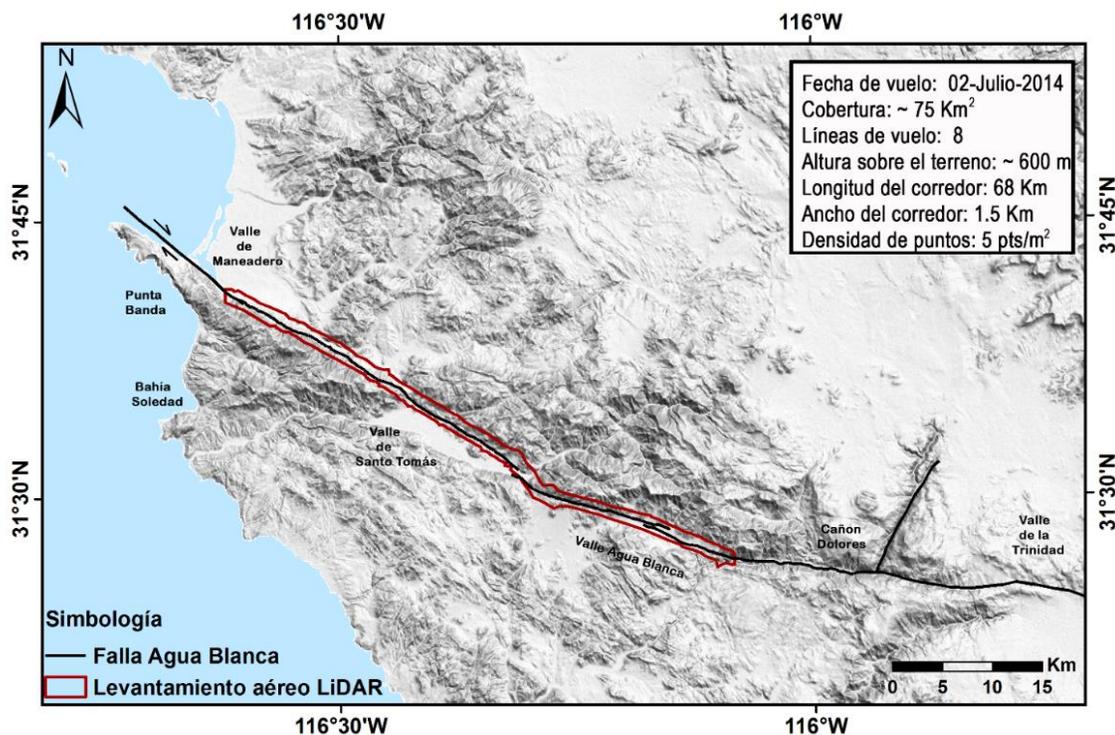
---

La metodología persigue por un lado delinear el trazo de la FAB y por otro detectar vegetación nativa anómala en la cercanía del trazo. Por vegetación anómala, nos referimos a aquella que es anormalmente alta y/o verde con respecto al promedio de la vegetación en los alrededores. Por vegetación nativa nos referimos aquella que no ha sido sembrada o trasplantada por acciones antropogénicas o agrícolas, es decir, aquella que se ha adaptado y responde a las condiciones del medio ambiente y del clima.

Para alcanzar las metas, se redefinió la traza de la falla FAB a partir de modelos digitales del terreno e imágenes satelitales, se identificaron zonas de acumulación de flujo de agua en la hidrología superficial, se calculó el índice de vegetación NDVI y la orientación de las laderas, se crearon Modelos Digitales del Terreno (MDT), Modelos Digitales de la Superficie (MDS) y Modelos de Altura del Dosel (en inglés, CHM, Canopy Height Model y referido así en el texto), estas variables fueron calculadas a partir de insumos producto de sensores activos y pasivos procesadas en diversos programas que son descritos más adelante.

### 2.1. Levantamiento aéreo LiDAR

La nube de puntos de la Falla Agua Blanca (FAB) se obtuvo de un vuelo LiDAR, realizado el 02 de Julio del 2014 por la agencia NCALM (*National Center for Airborne Laser Mapping*) de la NSF; a través de una colaboración con la Universidad de Texas en Austin (UTA) y un proyecto de grupo (133042) de investigación básica CONACYT, conjuntamente se financió el vuelo LiDAR a lo largo de un segmento de la Falla de Agua Blanca, Ensenada, Baja California; el cual tiene una longitud de 68 Km, un ancho promedio de 1.5 Km y una densidad de puntos promedio de 5 puntos/m<sup>2</sup> (figura 3).

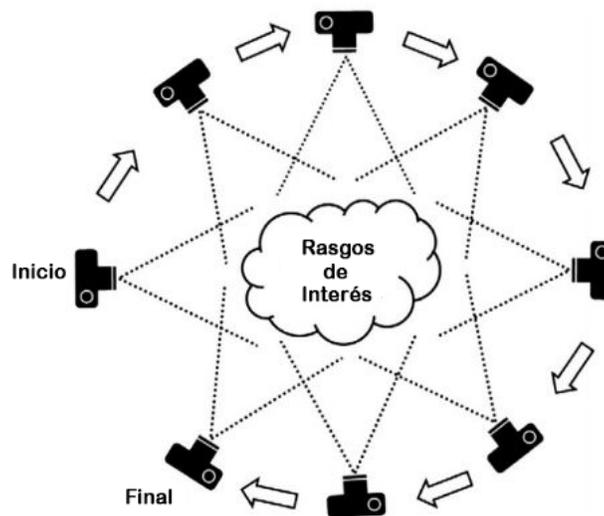


**Figura 3.** Huella del levantamiento aéreo LiDAR realizado el 2 de Julio del 2014 con una densidad de puntos promedio de 5 puntos/m<sup>2</sup> a lo largo de la Falla Agua Blanca, pasando por el Valle Agua Blanca, Valle de Santo Tomás y parte de la península de Punta Banda.

## 2.2 Fotogrametría por dron

Esta técnica emergente conocida también como “Structure from Motion (SfM)”, es un método que utiliza un conjunto de fotos tomadas sobre una escena desde diferentes posiciones con alto grado de traslape entre ellas habilitando la reconstrucción 3D (Westoby et al. 2012), donde se aplica la transformación SIFT (Scale Invariant Feature Transform), una técnica propuesta por Snavely et al., (2008) que permite identificar rasgos en común entre imágenes (invariantes a la escala, rotación e iluminación) con diferentes ángulos de toma de un mismo objeto (figura 4). La reconstrucción 3D se puede geo-localizar si se incorpora al proceso las posiciones de la cámara desde donde se tomaron las fotografías. En la actualidad algunas cámaras traen un GPS integrado que etiquetan las fotos con la ubicación fuente. Otra forma de geo-localizar o aumentar la exactitud en la posición en los productos de la reconstrucción, es a través de puntos de control terrestre (GCPs). Estos son rasgos o marcas claramente visibles en las imágenes y que son ubicadas con coordenadas precisas a partir de un levantamiento GPS diferencial (Cruz-Martínez, 2008). Los cuales se recomiendan que tengan una distribución homogénea a lo largo de la zona objetivo.

En la actualidad el uso de drones o VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) ha incrementado, principalmente por la accesibilidad y bajo costo que representa comparado con otras tecnologías para la extracción de información geoespacial. En el presente trabajo se tuvo acceso a 3 drones, con los cuales se realizaron un total de 4 vuelos sobre un segmento de la FAB donde se encuentra el parche más prominente de vegetación anómala; los 2 primeros vuelos fueron realizados en Diciembre del 2015, utilizando el dron multirrotor cuadracóptero DJI Phantom 2 y un octocóptero DJI S1000. En Febrero del 2016 se realizaron 2 vuelos con el dron de ala fija Ebee de Sensefly utilizando cámaras en la banda del Infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared, por sus siglas en inglés) y otra en color natural RGB (bandas Red, Green, Blue, por sus siglas en inglés).



**Figura 4.** Ejemplo de cómo bajo el método Structure from Motion (SfM) se identifican rasgos similares de un objeto y se toman las imágenes en diferentes ángulos para la reconstrucción 3D a partir del traslape de las mismas (imagen tomada y modificada de Westoby et al., 2012).

Apoyados con las herramientas descritas en la siguiente sección, se aplicó la técnica de SfM a las fotos tomadas por los drones para la reconstrucción. El producto principal de la reconstrucción 3D es la extracción de la nube de puntos de la superficie. Los puntos en la nube son primeramente clasificados para determinar si el punto corresponde al suelo, vegetación, infraestructura o algún otro tipo. Con la nube clasificada se construyeron modelos digitales de superficie (MDS) y del terreno (MDT) para comparar los resultados con los del levantamiento aéreo LiDAR de Julio 2014 descrito en la sección 2.1.

### **2.3 Herramientas para el procesamiento de fotografías aéreas y análisis espacial**

La planeación de vuelos con el dron de ala fija Ebee se hizo con el software eMotion 2 donde a partir de definir la zona de interés, la superposición lateral y longitudinal de las fotos (superposición de las fotografías entre las líneas de vuelo adyacentes), la resolución de productos resultantes y la duración de la pila, el programa se encarga de definir el número de vuelos, líneas de vuelo, espaciamiento entre fotos, altitud y otros factores que garantizan una misión exitosa para la reconstrucción 3D. Una vez adquiridas las imágenes, se geo-etiquetan con la bitácora de vuelo del dron, asignando a cada foto la posición y tiempo de captura. Las fotos geo-etiquetadas se pueden procesar con los programas Agisoft Photoscan Pro o Pix4D que aplican las técnicas de SfM para obtener los siguientes productos: nube de puntos, ortoimagen, modelos digitales de superficie y un reporte general del proceso. Durante la ejecución de los vuelos, se utilizaron 2 equipos GPS Magellan modelo ProMark 3 de doble frecuencia para ubicar puntos de control terrestre (GPCs) colocados en la zona. Se estableció la estación base y con una móvil se ubicaron los GCPs. Las observaciones GPS se procesaron con el software GNSS Solutions para obtener sus coordenadas apoyándonos con datos de las estaciones de la red geodésica activa del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/drgna2.aspx>). Las coordenadas resultantes se incorporan al proceso de reconstrucción (Agisoft o Pix4D) para obtener productos geo-localizados más precisos.

Para la planeación de los vuelos con los otros drones multirotores (Phantom 2 y S1000) se utilizaron otras herramientas con menores capacidades que el eMotion 2. Las fotos fueron procesadas con el mismo software de SfM, sin embargo la calidad en general de las fotos (sobre posición, geo-etiquetado) y extensión cubierta con el dron de ala fija Ebee fue superior. Las fotos y videos capturados por los multirotores fueron de propósito más bien documental y no se consideraron en la reconstrucción 3D.

Para el procesamiento de imágenes satelitales y ortofotos (RGB y NIR), se utilizaron diversas herramientas, principalmente el programa ArcGis 10.1, programa de sistemas de información geográfica (SIG) en donde se realizó el análisis hidrológico, cálculo del índice NDVI, orientación de laderas, análisis espacial entre las variables y la generación de productos cartográficos. Además se utilizó los software ENVI y ErMapper como apoyo de visualización y procesamiento de imágenes.

## 2.4 Procesamiento de las nubes de puntos

Las nubes de puntos, producto de levantamientos aéreos LiDAR y de la fotogrametría por dron, generalmente se almacenan en formato de intercambio *.las* o *.laz*. Este último es una versión comprimida reduciendo así su espacio de almacenamiento, sin la pérdida de exactitud o precisión de la información original. La extracción, manipulación y procesado de la nube de puntos, se realizó con el programa LAStools, el cual nos ofrece diversas herramientas, por mencionar algunas: *lasinfo*, *lascanopy*, *lasground*, *las2dem*, *blast2dem*, *entre otras*. Así mismo, se utilizó la herramienta CloudCompare la cual permite la extracción, manipulación, procesado y visualización de la nube de puntos.

En una nube de puntos, cada punto puede clasificarse con base al tipo de superficie de donde proviene el retorno del pulso láser. La ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) en el 2008, propone una clasificación estándar en donde se tienen al menos 31 clases (Tabla 1) de los retornos de una nube de puntos. Gracias a que un pulso láser llega a tener múltiples retornos, la segmentación y detección de vegetación es posible y con ello el posterior cálculo de métricas forestales. No es este el caso para las nubes generadas vía fotogrametría por dron.

**Tabla 1.** Descripción estándar de las principales clases de una nube de puntos LiDAR en formato *.las* versión 1.2 por ASPRS (2008).

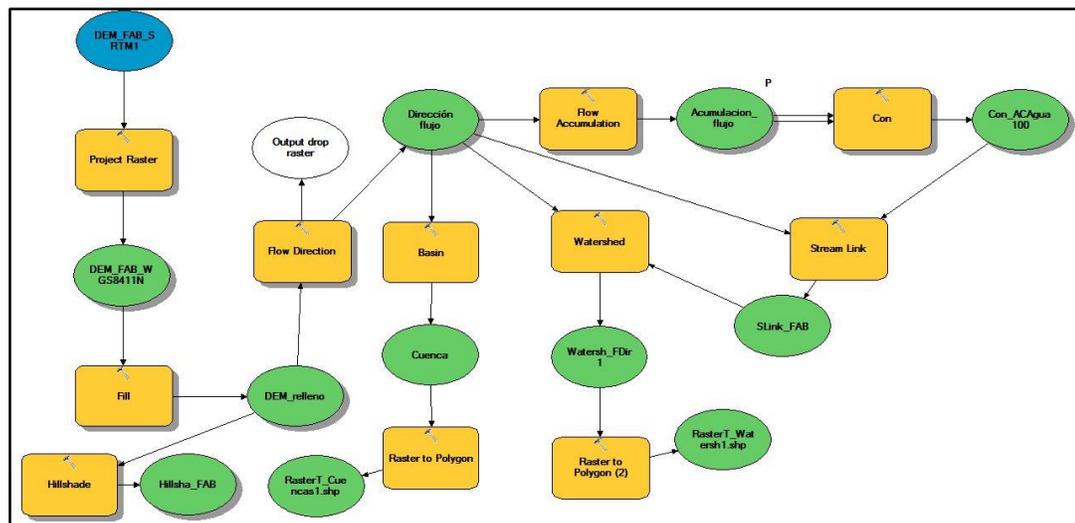
Clase	Descripción
0	Nunca Clasificado
1	No clasificado
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios
7-8	Ruido
9	Agua

Apoyados en las herramientas de LAStools, se realizó la limpieza del ruido de la nube de puntos que pudo haberse generado en el proceso de reconstrucción, para después clasificar en una primera instancia aquellos correspondientes a suelo (clase 2) y aquellos que no lo fueran (clase 1). Un Modelo Digital de

Superficie (MDS) representa todos los elementos existentes en la superficie (vegetación, edificios, infraestructura y el terreno), por lo tanto, en su generación se consideraron todos los puntos clasificados mientras que en el cálculo del Modelo Digital del Terreno (MDT) solo se consideró aquellos puntos clasificados como suelo (clase 2) (ver anexo A).

## 2.5 Análisis hidrológico

En el programa ArcGis 10.1 existen diversas herramientas para el análisis geoespacial, una de ellas corresponde a la delimitación de cuencas (en inglés, *Watershed Delimitation*) de la cual se puede calcular la dirección de flujo, zonas de acumulación, delimitación de cuencas hidrográficas, etc.; dichas herramientas se integraron en un modelo de geoprocetamiento (figura 5) para obtener las variables: zonas de acumulación de flujo, cuencas y subcuencas aledañas al trazo de la falla. Para ello se utilizó como principal insumo un modelo digital de elevación SRTM1 (Space Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución espacial de 30 m (1 segundo de arco); este MDE es producto de una misión conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la NGA (National Geospatial Intelligence Agency) que tiene por objetivo crear modelos digitales de elevación globales a partir de radar; el MDE para la zona de estudio se adquirió en la página de internet [www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov), donde además de estos modelos hay otros productos derivados de misiones de la NASA (e.g. imágenes satelitales).



**Figura 5.** Modelo de geoprocetamiento desarrollado en ArcGIS 10.1 para el análisis hidrológico a partir de un MDE SRTM1 para extraer las zonas de acumulación de flujo y cuencas que cruzan la traza de la FAB.

Entre los objetivos del análisis hidrológico fue definir las zonas de acumulación de flujo en la red de hidrología superficial, ya que en estas es donde se desarrolla naturalmente la vegetación anómala. Teniendo como propósito diferenciar la vegetación anómala en el trazo de la FAB de aquella en las cañadas y cauces de la red hidrológica.

## **2.6 Orientación de laderas**

En latitudes medias a altas, la orientación de las laderas, también conocido como aspecto del terreno o exposición de laderas, determinan la cantidad de radiación solar que recibe la superficie de la tierra, lo que se ve reflejado en microclimas. En el hemisferio Norte, las laderas con exposición hacia el sur reciben hasta seis veces más radiación solar que aquellas con exposición hacia el Norte. Por el contrario, en el hemisferio Sur, las laderas con orientación hacia el Norte reciben mayor radiación que aquellas con exposición hacia el Sur (Auslander et al., 2003; Carter y Klinka, 1990).

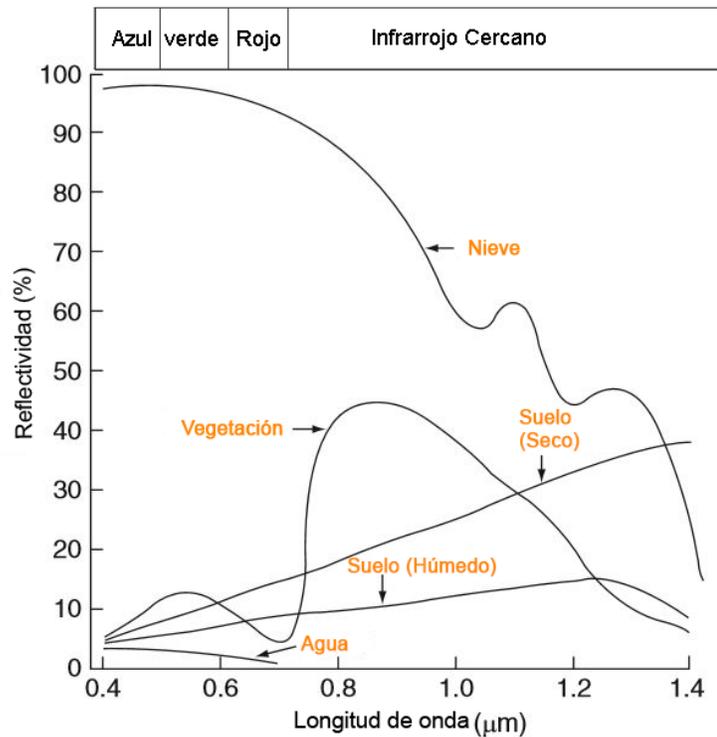
Son conocidos los efectos que tiene la orientación de las laderas sobre las características de la comunidad de plantas, tales como: la cubierta vegetal, la composición de especies y producción de biomasa aérea en los árboles y arbustos (Sternberg y Shoshany, 2001). Esta característica del terreno ha sido identificada como un factor importante que genera un cambio en las condiciones ecológicas del sitio como la diversidad de especies vegetales y la variación de la humedad del suelo (Armesto y Martínez, 1978; Auslander et al., 2003; Bennie, et al., 2008; Wang et al., 2011; Gutiérrez-Jurado et al., 2013; Albaba, 2014).

Tomando en cuenta la latitud media y el clima mediterráneo de la zona de estudio, donde existe un déficit hídrico, la orientación de laderas es un factor determinante para el desarrollo y la estructura de la vegetación. A partir del MDE SRTM1 se determinó la orientación de laderas en la vecindad de la FAB; donde se clasificaron aquellas laderas orientadas hacia el Norte (azimut entre 292.5°-67.5°) y al Sur (azimut entre 112.5°-247.5°), descartando pendientes menores a 10°; con la finalidad de identificar aquellas zonas con mayor probabilidad de presentar vegetación densa por su exposición Norte.

## **2.7 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

La vegetación se caracteriza por patrones específicos de absorción y reflexión de energía en las diferentes regiones del espectro electromagnético, consecuencia de la actividad fotosintética y la clorofila. La clorofila absorbe energía en la región del rojo y refleja fuertemente en la región del infrarrojo (figura 6). Los índices de vegetación se construyen a partir de estas señales colectadas por sensores pasivos en

plataformas satelitales o aéreas, generando indicadores que entre mayor sea el valor mayor será la presencia de verdor, abundancia o densidad de la vegetación en el área de estudio (Ramírez-Serrato, 2014).



**Figura 6.** Respuesta espectral de diferentes superficies con diferentes longitudes de onda desde el visible al infrarrojo (figura tomada y modificada de: Singhal y Gupta, 2010).

Con el propósito de detectar vegetación anómala a través de su verdor, en el presente trabajo se calculó el índice de vegetación NDVI, a partir de una imagen satelital LANDSAT 8 OLI/TIRS tomada el 23 de Septiembre del 2014 con una resolución espacial de 30 m, obtenida del portal [www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov). La fecha de la imagen es del mismo año en que el levantamiento LiDAR fue realizado (2014), considerando la época de estiaje y el final del verano cuando el verdor de la vegetación nativa anómala es más fácil detectarla, en contraste con imágenes colectadas al final de la época de lluvias cuando las plantas anuales y pastos tienen una fuerte señal en el índice de vegetación obscureciendo la respuesta de las plantas nativa a la persistente disponibilidad del agua atrapada a lo largo de la FAB.

El NDVI es un índice de vegetación que permite obtener información sobre la tasa de recubrimiento vegetal del suelo, cantidad de biomasa y el estado general de la vegetación (Flores et al., 2001). Este se

calcula a partir de la ecuación 1, donde *IRC* se refiere a la reflectancia en el canal infrarrojo cercano. En el sensor OLI de LANDSAT 8 se ubica en la longitud de onda de 0.85- 0.88  $\mu\text{m}$  (relacionado con la densidad de vegetación verde, generando múltiples dispersiones de la radiación por el interior de la estructura celular) mientras que la variable *R* corresponde a la reflectancia en el canal rojo visible con longitud de onda de 0.64-0.67  $\mu\text{m}$  (relacionada con la absorción de clorofila). En estas bandas se puede obtener aproximadamente el 90% de información relativa a la vegetación (Abaurrea-Pereda, 2013; Gilabert et al., 1997). En la figura 6 se muestra la reflectancia típica de varios tipos de cobertura terrestre entre ellos la vegetación, donde se nota la fuerte absorción en el canal rojo y una fuerte reflectancia en la región del infrarrojo cercano. En el caso de las imágenes LANDSAT 8 OLI/TIRS las bandas que pertenecen a *IRC* y *R* son las bandas 5 y 4 respectivamente (figura 1).

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (1)$$

Los valores que arroja la ecuación para el NDVI son entre -1 a 1, donde valores mayores a 0.1 se refiere a zonas donde la presencia de vegetación es evidente y valores cercanos a 1 definen un mayor verdor en la cubierta vegetal y entre mayor sea el índice mayor la actividad fotosintética (Tabla 2).

**Tabla 2.** Descripción de los valores del índice de vegetación NDVI (USGS, 2015).

Umbral	Descripción
-1 -0.1	Cuerpos de agua y tierra desnuda
>0.1 – 0.5	Escasa vegetación, arbustos o pastos.
>0.5 – 1	Densa vegetación, bosques tropicales, cultivos templados, o aquella vegetación en su máximo crecimiento.

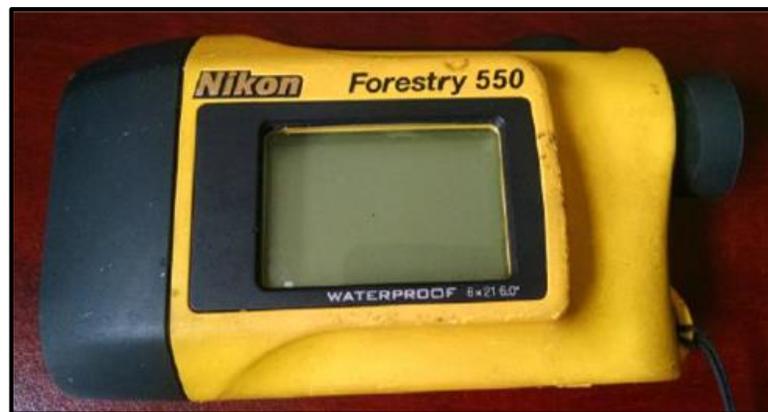
## 2.8 Modelo Digital de Altura del Dosel, Canopy Height Model (CHM):

La vegetación anómala caracterizada por su gran altura se estableció a partir de un Modelo Digital del Altura del Dosel o CHM (Canopy Height Model, por sus siglas en inglés), el cual se refiere a la altura del dosel (capa de hojas, ramas y copas de los árboles) sobre el terreno. Estos modelos se calculan a partir de la nube de puntos LiDAR en el programa LAsTools. Donde esta se clasificó entre los puntos clase 1 y clase 2 (Tabla 1) respectivamente. Una vez clasificados se normalizaron las alturas, es decir, la clase 2 se igualó a cero y los puntos restantes a una elevación relativa a su altura, posteriormente se incorporó el algoritmo

“*Pit free*” propuesto por Khosravipour et al., (2014), el cual permite crear CHMs “libres de huecos” generados principalmente por los múltiples retornos del haz láser. La integración del algoritmo “*Pit free*” se llevó a cabo en 2 pasos, el primero de ellos fue crear un CHM en el cual se tomaran en cuenta todos los primeros retornos de la nube de puntos (previamente clasificada y normalizada), posteriormente se realizaron los CHMs individuales en los cuales se contemplaron todos los primeros retornos por debajo de cierto rango de altura. El último paso fue unir todos los CHMs generados para obtener un ráster CHM final (ver anexo B).

## 2.9 Mediciones de árboles individuales

Se hicieron algunas mediciones en campo, de árboles identificados en los CHM como individuos destacados por su altura y fácil acceso en terreno. Se utilizó un hipsómetro marca NIKON Forestry 550 (figura 7), el cual cuenta con diversas modalidades que facilitan la estimación de altura de los árboles como: obtener distancia horizontal entre uno o dos puntos, estimar ángulos o calcular la distancia vertical entre dos puntos, así mismo se midió con una cinta el diámetro a la altura del pecho (~ 1.37 m) de los árboles individuales seleccionados.



**Figura 7.** Hipsómetro NIKON Forestry 550, herramienta para medir árboles.

En gabinete se extrajo de la nube de puntos LiDAR normalizada (previamente utilizada para crear los CHM) en LAsTools y a través de la herramienta *Lascanopy* se estimaron las alturas máximas del dosel de los individuos medidos en campo. Una de las opciones que se tiene de la herramienta es especificar áreas de interés para la extracción de dicha información, por lo tanto, se hizo una vectorización de los individuos medidos en campo para posteriormente extraer sus métricas (ver anexo C).

## **2.10 Análisis espacial**

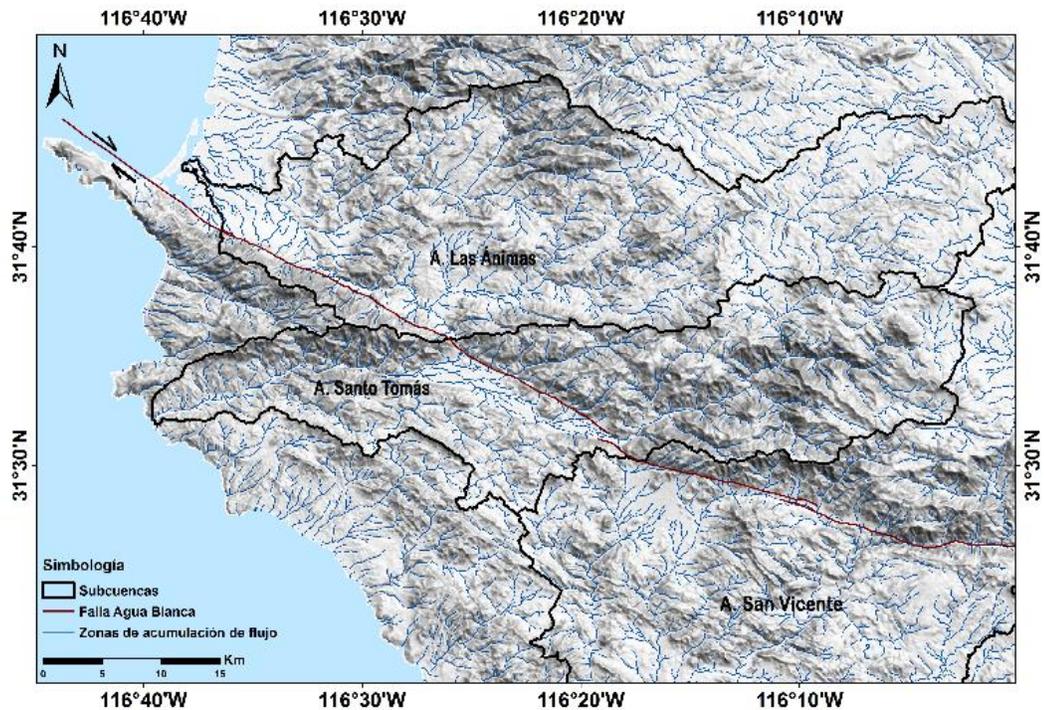
En un SIG se integraron las variables ambientales (orientación de laderas, NDVI, zonas de alta acumulación, CHM) establecidas en el presente trabajo para observar su correlación espacial y con ello determinar zonas de intersección entre las variables. Posteriormente se calcularon los valores máximo y promedios de altura de vegetación (determinadas a partir de los CHMs) así como de verdor (determinado a partir del índice de vegetación NDVI) para las zonas de interés vecinas a la falla y con respecto a la orientación de laderas, es decir, laderas orientadas hacia el Sur y hacia el Norte.

## Capítulo 3. Resultados

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar si el trazo de la Falla Agua Blanca (FAB) tiene algún efecto sobre la distribución espacial de la vegetación nativa, para ello se han realizado diversos análisis geospaciales, tales como: la identificación de zonas de acumulación de flujo, zonas de alta cobertura de vegetación, zonas de vegetación de altura sobresaliente y determinar la orientación de las laderas que en conjunto permitirá evaluar su relación con la falla. El trazo de la FAB se ha redefinido a partir de datos LiDAR e imágenes satelitales de alta resolución espacial.

### 3.1 Análisis hidrológico: Zonas de acumulación de flujo y cuencas

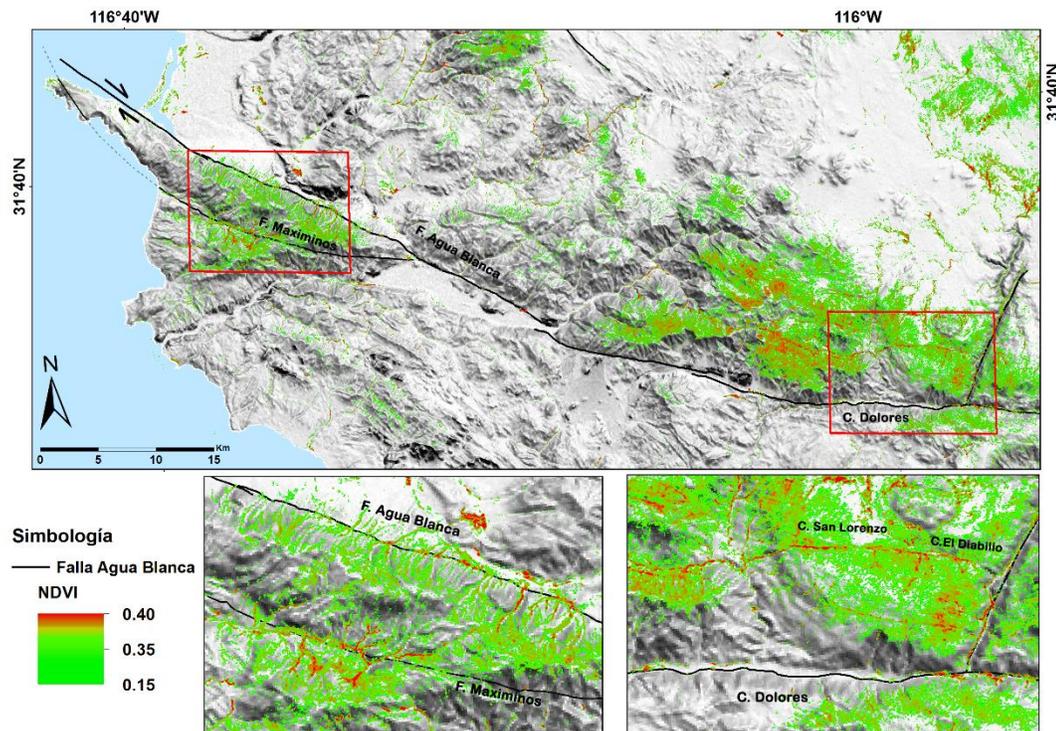
La FAB cruza tres subcuencas que desembocan en el océano Pacífico, esta son: la subcuenca del arroyo Las Ánimas, del A. Santo Tomás y del A. San Vicente. En la figura 8 se muestran los límites de estas subcuencas así como la red de drenaje calculados a partir del modelo de elevación SRTM de un segundo de arco (~30m). En el proceso de delineado de la red, se especificó un umbral de acumulación de 500 celdas para ser considerado arroyo.



**Figura 8.** Identificación de zonas de acumulación de flujo (líneas azules) y subcuencas (Arroyo Las Ánimas, A. Santo Tomás y A. San Vicente) que cruzan la traza de la Falla Agua Blanca (línea roja) a partir de un MDE SRTM1.

### 3.2 NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada)

La figura 9 nos muestra la distribución espacial del índice de vegetación NDVI a lo largo de la falla. Para claridad de los resultados y hacer énfasis en la vegetación nativa, se enmascararon la mayoría de las zonas agrícolas o que reciben algún tipo de riego. Es decir, se filtraron las zonas agrícolas en el valle de Maneadero, Santo Tomás. Sin embargo accidentalmente falto excluir el área del parque recreativo “Las Cañadas”, el cual se mantiene verde por el riego y se alcanza apreciar en el acercamiento inferior izquierdo de la figura 9 con altos valores del NDVI, al norte de la FAB. Mostrando celdas con un valor del índice mayor a un umbral de 0.15 que representan vegetación verde. La vegetación anómala por su verdor (AV), es aquella con valores mayores que su zona circundante, representando los valores más altos del índice en color rojo. En la figura 9 se puede apreciar valores mayores al umbral (mayor cobertura de vegetación) que siguen la red de drenaje. Se observa vegetación anómala siguiendo el trazo de la FAB específicamente en la península de Punta banda así como en la falla Maximinos y al este del valle Agua Blanca se observa un alineamiento de alta cobertura de vegetación (en color rojo).

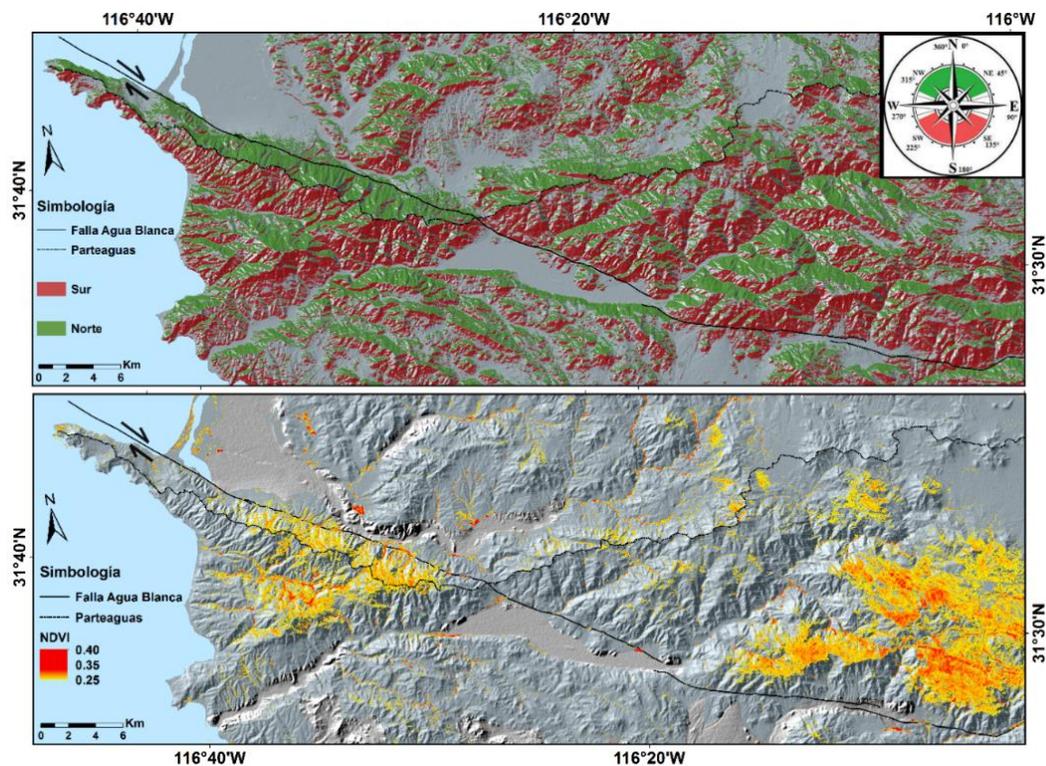


**Figura 9.** Índice de vegetación NDVI con un umbral de 0.15 a 0.40, indicando zonas con alta cobertura vegetal a lo largo de la FAB, calculado a partir de imágenes LANDSAT 8 OLI/TIRS. En la parte inferior se muestran 2 zonas amplificadas para la observación a mayor detalle de las zonas con alta cobertura, la primera de ellas en la península de Punta Banda (izquierda) y hacia el Valle Agua Blanca cercano al Cañón de Dolores (derecha) es evidente zonas de alta cobertura de vegetación (NDVI).

Al norte del cañón de Dolores, sobresale una línea de vegetación paralela a la FAB, a lo largo de la cañada El Diablito con una vertiente hacia el Este y del cañón San Lorenzo con vertiente hacia el Oeste.

### 3.3 Orientación de laderas

La orientación de laderas se muestran en la parte superior de la figura 10 donde en color verde están representadas las laderas con pendiente mayor a  $10^\circ$  clasificadas como Norte (azimut entre  $292.5^\circ$ - $67.5^\circ$ ) y en color rojo aquellas orientadas hacia el Sur (azimut entre  $112.5^\circ$ - $247.5^\circ$ ), se puede observar como el parteaguas (línea intermitente negra) establece una división clara entre laderas Norte y Sur en la fisiografía de la Península de Punta Banda

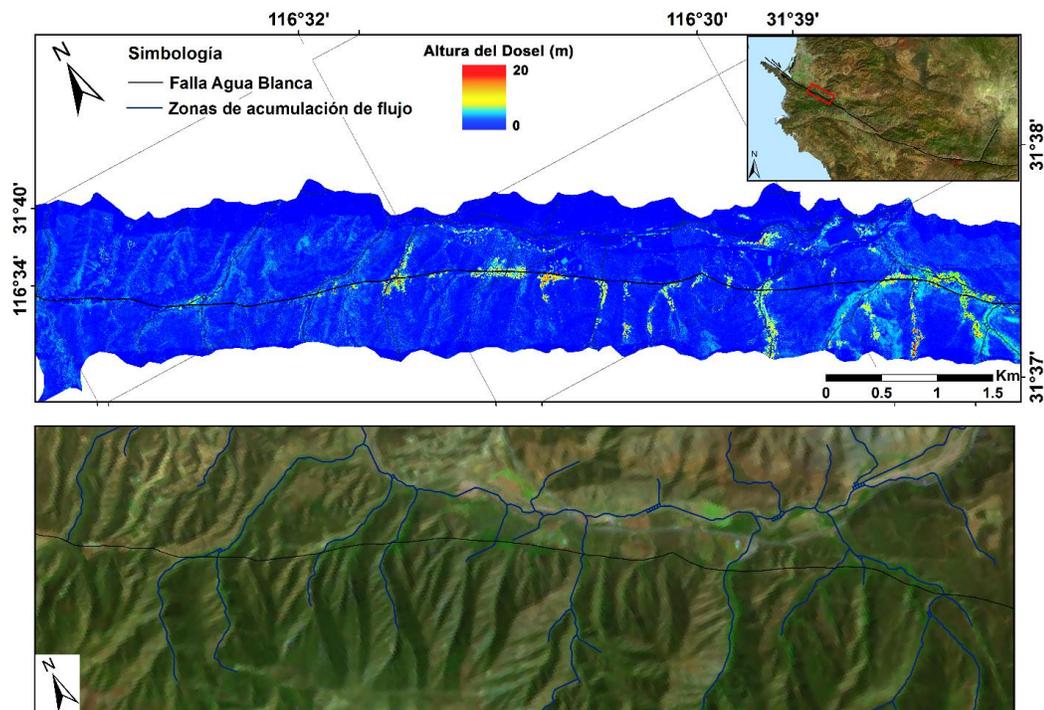


**Figura 10.** Orientación de laderas clasificadas entre Norte (Azimut entre  $292.5^\circ$ - $67.5^\circ$ ) y Sur (Azimut entre  $112.5^\circ$ - $247.5^\circ$ ) a lo largo de la FAB conjuntamente se muestra los valores de NDVI mayores a 0.15 donde se observa que la mayor cobertura se encuentra en las laderas orientadas hacia el Norte (color verde).

Por otro lado, en la parte inferior de la esta misma figura (10), se muestra la distribución del NDVI mayor a un umbral de 0.15, donde se observan valores más altos están sobre las laderas orientadas hacia el Norte. Aplicando una estadística zonal del NDVI la clasificación establecida de laderas, arroja que laderas orientadas hacia el Norte contienen un valor máximo de 0.48 y un promedio de 0.18, mientras que laderas orientadas hacia el Sur tienen un valor máximo de 0.39 y promedio de 0.17.

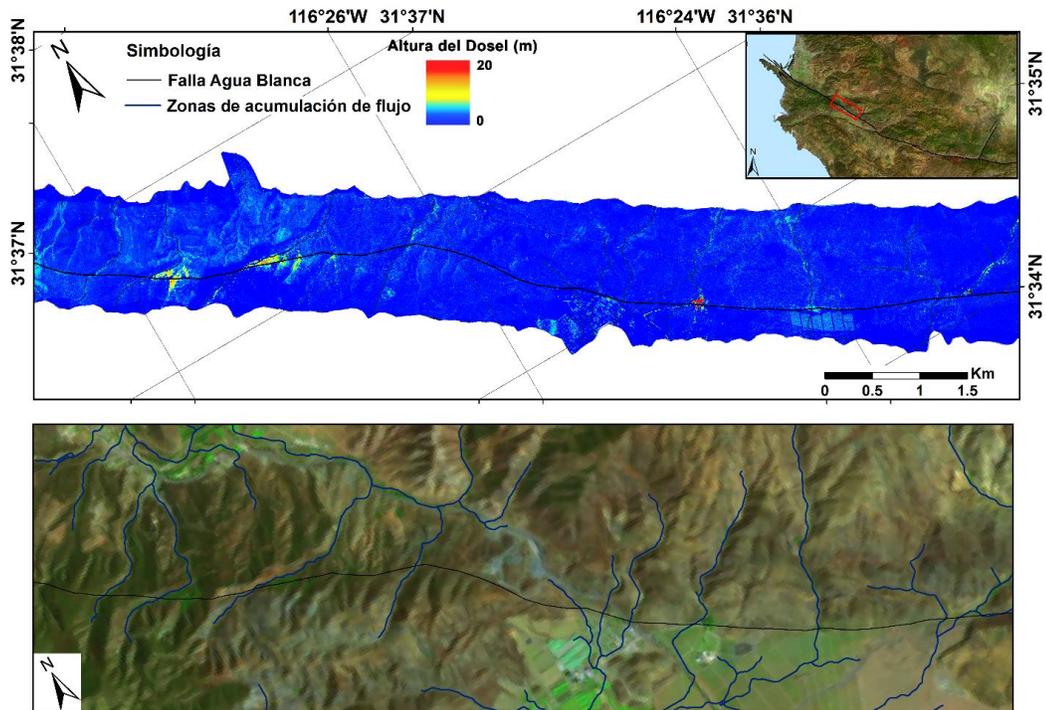
### 3.4 Modelo de Altura del Dosel (CHM, Canopy Height Model).

La distribución espacial del verdor de vegetación a lo largo de la falla se determinó a partir del índice de vegetación NDVI, sin embargo, este no incorpora información sobre su altura. Bajo ciertas condiciones favorables y persistentes, la vegetación logra desarrollarse y crecer más alta con respecto a vegetación circundante. La altura del dosel relativa al terreno se presenta en los CHM generados a partir de la nube de puntos LiDAR, permitiéndonos establecer aquellas zonas de vegetación anómala por altura e individuos con altura sobresaliente. Para la presentación de resultados de los CHMs, la FAB se ha dividido en 3 segmentos: Norte (Punta Banda), Centro (Valle Santo Tomás) y Sur (Valle de Agua Blanca), donde el intervalo de alturas del dosel va desde 0 a 20 metros sobre el terreno en una escala de color de azul (bajo) al amarillo-rojo (alto). En la figura 11 se presenta el CHM del segmento Norte (Punta Banda), en el cual se observan parches de vegetación de mayor altura (anómala) sobre la traza de la falla, y sobre las zonas de acumulación de flujo superficial en la red de drenaje.



**Figura 11.** Segmento Norte (Punta Banda) de la FAB (línea negra) donde se presentan los CHMs en una escala de elevación de 0 a 20 metros sobre el terreno. En la parte inferior la imagen LANDSAT 8 OLI/TIRS muestra las zonas de acumulación de flujo.

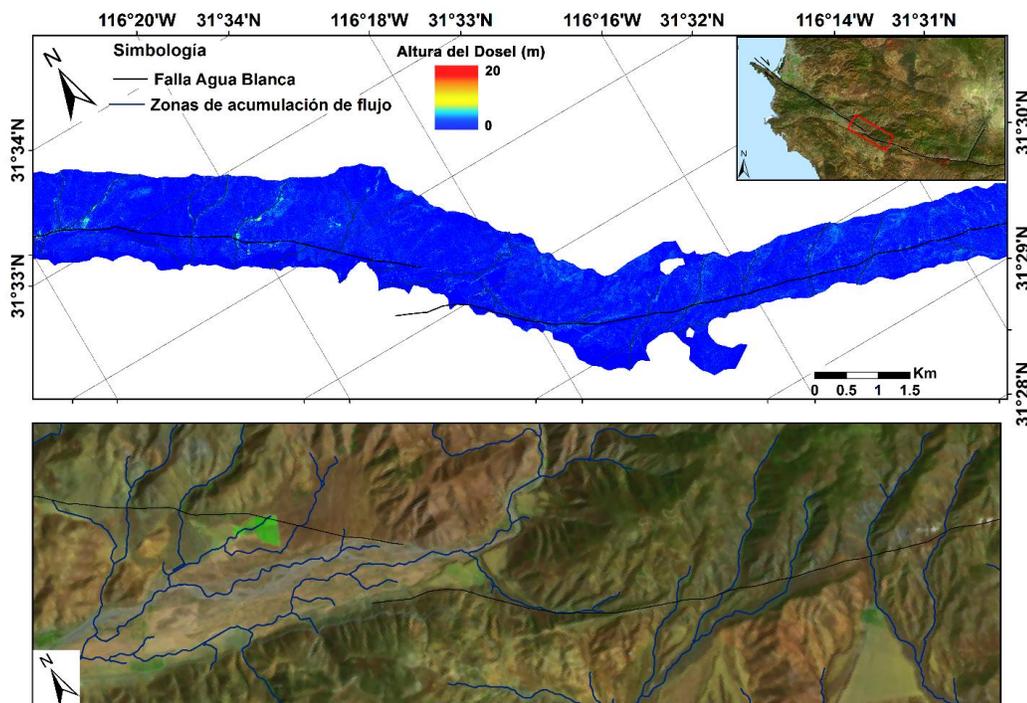
En el Valle Santo Tomás (segmento centro) vegetación con altura del dosel cercana a los 20 metros sigue el mismo patrón, sobre la FAB y la red de drenaje. Se observa una zona de vegetación muy alta (manchón rojo) en la parte central del CHM, el cual corresponde a una zona arbolada no nativa de la vinícola Santo Tomás y que coincide con la FAB. Además, en la parte inferior de la figura 12 se observa que en la zona se practica la agricultura por lo que hay poca vegetación nativa en esta sección.



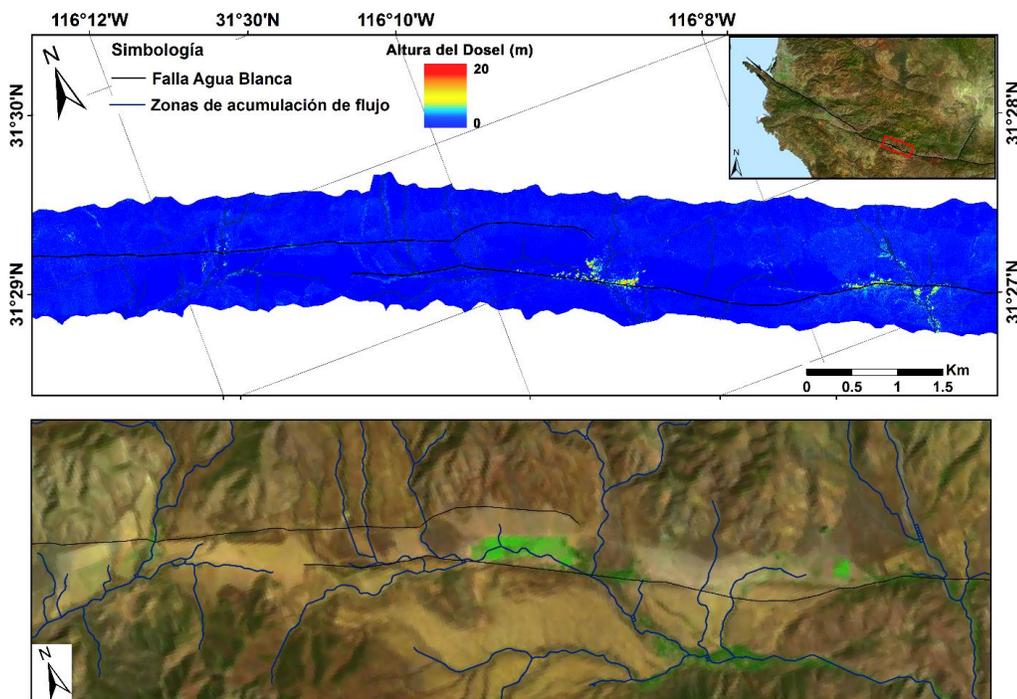
**Figura 12.** Segmento Centro (Valle de Santo Tomás) donde se observa la escasez de vegetación de altura mayor a 10 metros, en la parte inferior se muestra una imagen satelital (LANDSAT 8 OLI/TIRS) con los vectores de acumulación de flujo, donde se puede observar la existencia de zonas de agricultura.

Hacia el sur del corredor del vuelo LiDAR corresponde el segmento Sur, dividido en 2 secciones. La primera al final del Valle de Santo Tomás y la segunda iniciando el Valle Agua Blanca, donde los modelos CHM muestran valores de vegetación de poca altura (figura 13).

En el valle de Agua Blanca (sección 2) se pueden observar en la figura 14 dos parches de vegetación anómala, que de acuerdo al CHM la altura es cercana a los 4 metros, así mismo en la parte inferior paralela a la traza de la falla se puede observar una zona agrícola.



**Figura 13.** Localización de la sección 1 del segmento Sur (Valle de Agua Blanca), donde se observa en línea azul las zonas de acumulación de flujo y a su vez la escasez de alta vegetación corroborando lo mostrado del CHM con la imagen (LANDSAT 8 OLI/TIRS) de terreno real (parte inferior).



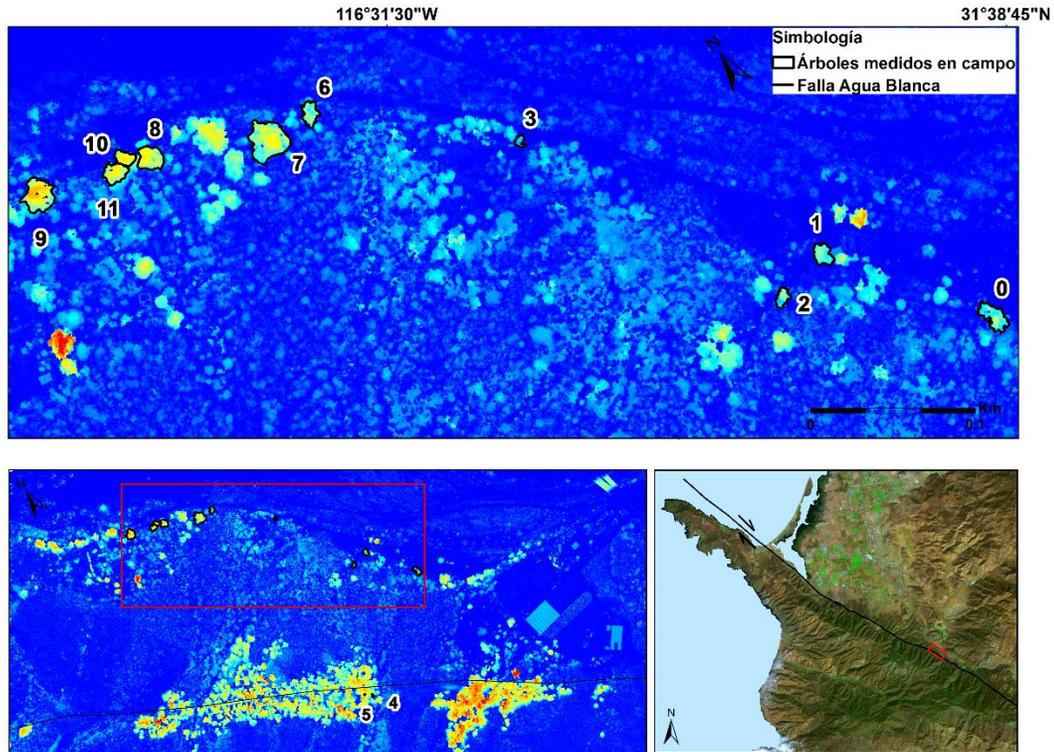
**Figura 14.** Segmento Sur (sección 2) ubicado al final del Valle de Agua Blanca, donde se observa particularmente las zonas de acumulación de flujo siguiendo la orografía del terreno, junto a dos parches de vegetación, uno de ellos cercano a la zona de agricultura que corresponde al encinal del rancho Agua Blanca y otro paralelo a la traza de la falla.

### 3.5 Identificación y medición de árboles individuales

En total se midieron 12 árboles (anexo C) en su mayoría Encinos (*Quercus Agrifolia*) con la finalidad de corroborar los resultados de altura del dosel que arrojó la nube de puntos en LAStools. Las alturas máximas del dosel de los árboles segmentados (figura 15) van desde los 9 metros hasta los 17 metros teniendo como diferencias de aproximadamente 2 metros entre las alturas calculadas por el hipsómetro y alturas calculadas a partir de datos LiDAR (Tabla 3).

**Tabla 3.** Medición de alturas máximas del dosel de árboles individuales identificados en los modelos CHM.

ID	Coordenadas		Altura_Campo (m)	Altura_CHM (m)
0	545238.81	3501138.33	12.3	11.82
1	545175.81	3501233.93	9.9	10.68
2	545137.07	3501222.68	9.4	10.68
3	545058.87	3501392.26	7.3	6.43
4	545018.92	3500983.86	11.5	10.16
5	545005.22	3500995.1	11.3	12.9
6	544967.36	3501476.31	11.7	12.09
7	544950.27	3501486.77	12.8	14.4
8	544876	3501512	11.3	14.85
9	544816.3	3501529.75	15.2	17.04
10	544866.89	3501539.5	13.5	14.98
11	544866.52	3501536.62	13.24	14.94



**Figura 15.** Localización de los árboles individuales segmentados a partir de los CHMs y medidos en campo.

### 3.6 Cálculo del Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital del Terreno

En el parche de vegetación anómala más prominente a lo largo de la FAB, ubicado en el cañón de las Ánimas, se hicieron vuelos con drones en dos fechas, con el objeto de hacer su reconstrucción por fotogrametría y comparar con los productos derivados por LiDAR aéreo.

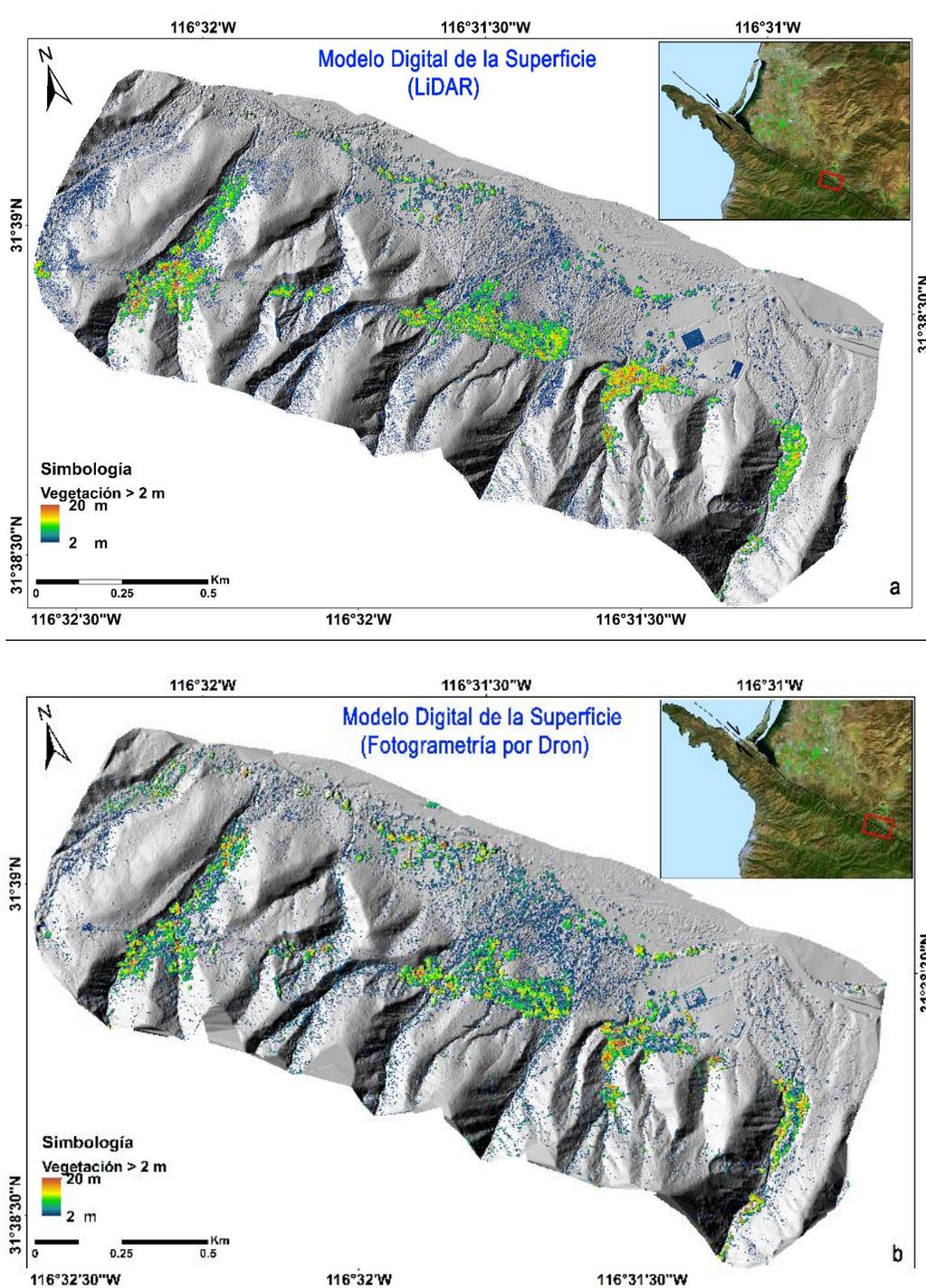
De las imágenes recolectadas por los drones: 248 imágenes fueron por el dron phantom 2 y 100 por el dron S1000 en Diciembre del 2015; 651 fotos en color natural (RGB) y 207 con cámara infrarroja cercano (NIR) por el dron Ebee de ala fija en Febrero del 2016. Para la reconstrucción fotogramétrica se utilizó las fotos en color natural del dron Ebee por su mayor extensión en cobertura, mayor y mejor traslape entre fotos. En la Tabla 4, se muestra información relevante sobre los vuelos con el dron Ebee.

**Tabla 4.** Descripción de los vuelos realizados con el dron Ebee.

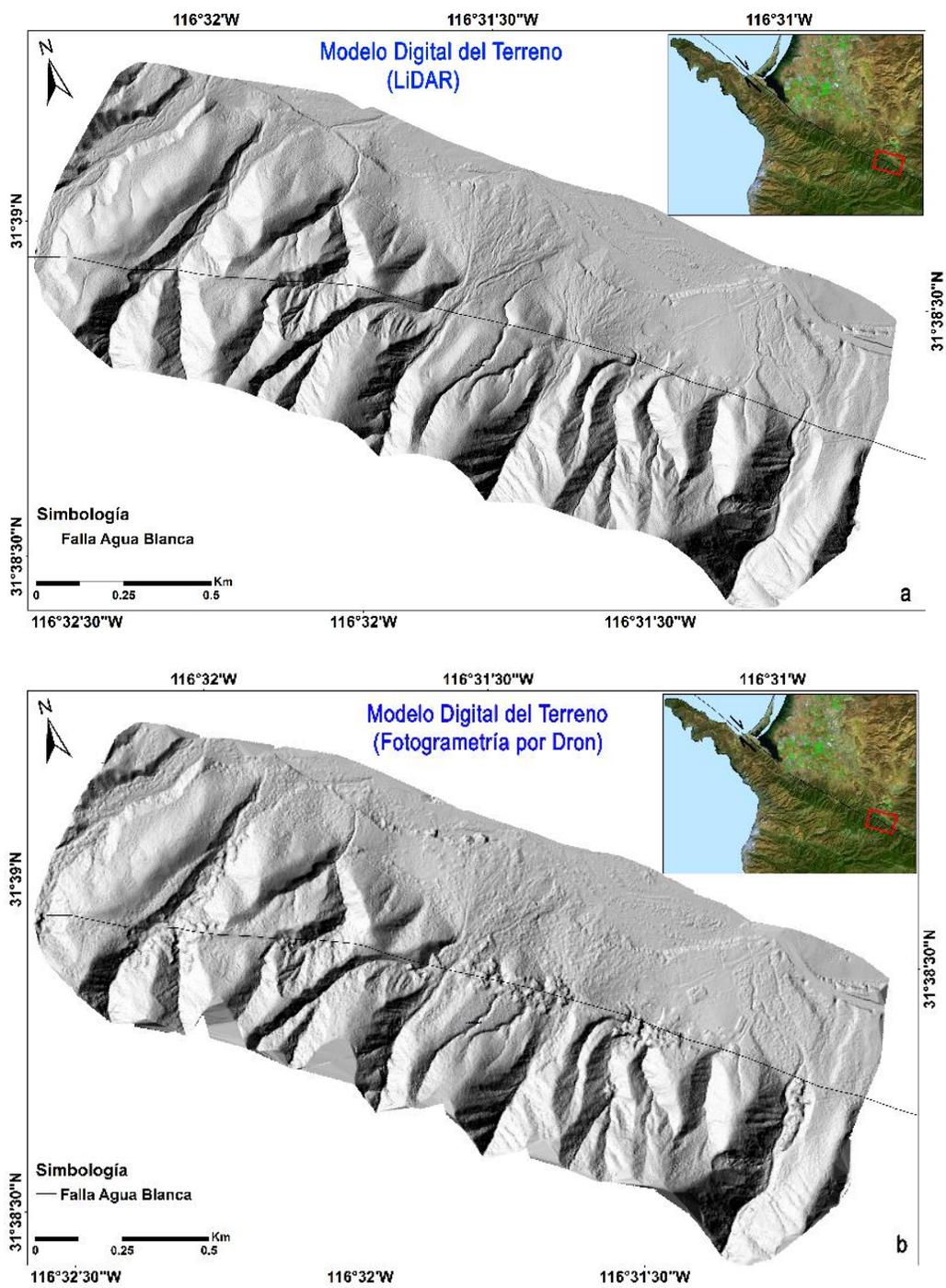
Fecha	Fuente	Tipo	Densidad de puntos	Cobertura	Imágenes geolocalizadas
Febrero,2016	Ebee	RGB	23 pts/m <sup>2</sup>	2.16 Km <sup>2</sup>	651
Febrero,2016	Ebee	NIR	12.5 pts/m <sup>2</sup>	1.02 Km <sup>2</sup>	207

En la parte superior de la figura 16 (a) se muestra el modelo MDS calculado a partir de la nube de puntos LiDAR, sobreponiendo a éste la vegetación con una altura mayor a 2 metros del modelo de altura de dosel (CHM) calculado de la misma nube. Mientras en la parte inferior de la figura 16 (b) se muestra el modelo MDS creado a partir de la nube de puntos generada por fotogrametría de las fotos RGB del dron Ebee, sobreponiendo la vegetación filtrada (mayor a 2 metros).

Cada filtrado de vegetación corresponde a las alturas del dosel de sus respectivos CHMs realizados para ambas fuentes de información (LiDAR y fotogrametría). Por otro lado, en la figura 17 se tiene en la parte superior (a) el MDT a partir de nube de puntos LiDAR, y en la parte inferior (b) el realizado a partir de fotogrametría. En ambos modelos (a y b) se tiene el trazo de la falla AB, el cual gracias al detalle del terreno se logra identificar.



**Figura 16.** Modelos Digitales de la Superficie (MDS) calculados a partir de una nube de puntos LiDAR (a) y fotogrametría por dron (b), en los cuales se sobrepuso la vegetación mayor a 2 m filtrando sus respectivos CHMs, en donde se puede apreciar la similitud en los resultados.

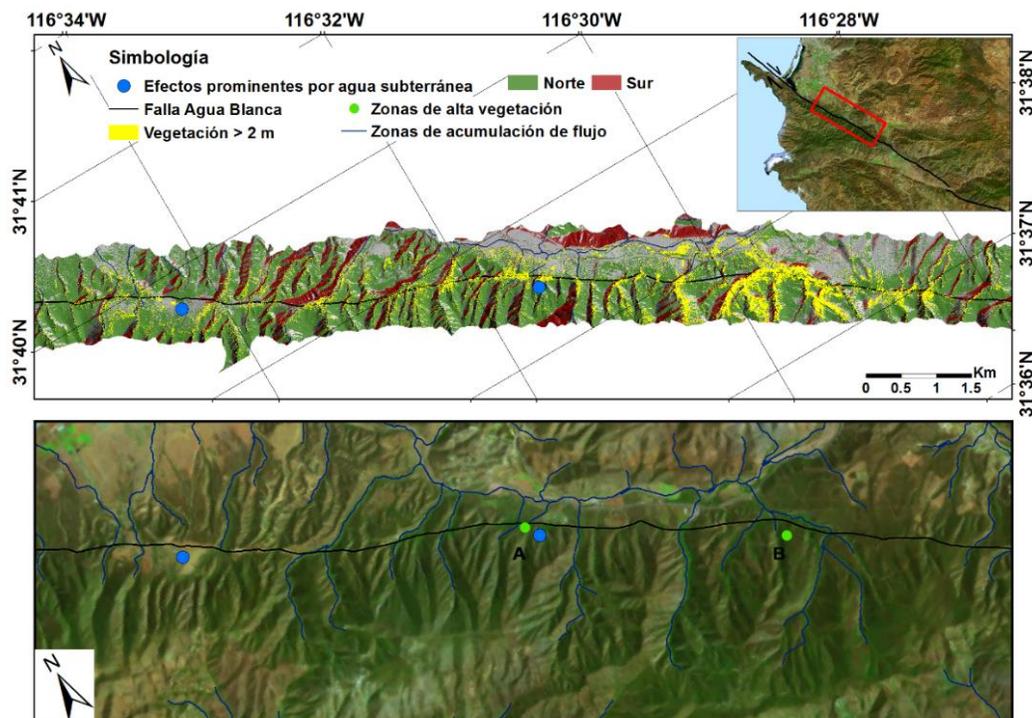


**Figura 17.** Modelos Digitales del Terreno (MDT) calculados a partir de una nube de puntos LiDAR (a) y fotogrametría por dron (b), en ellos se ha sobrepuesto un segmento de la falla AB.

### 3.7 Análisis espacial entre variables

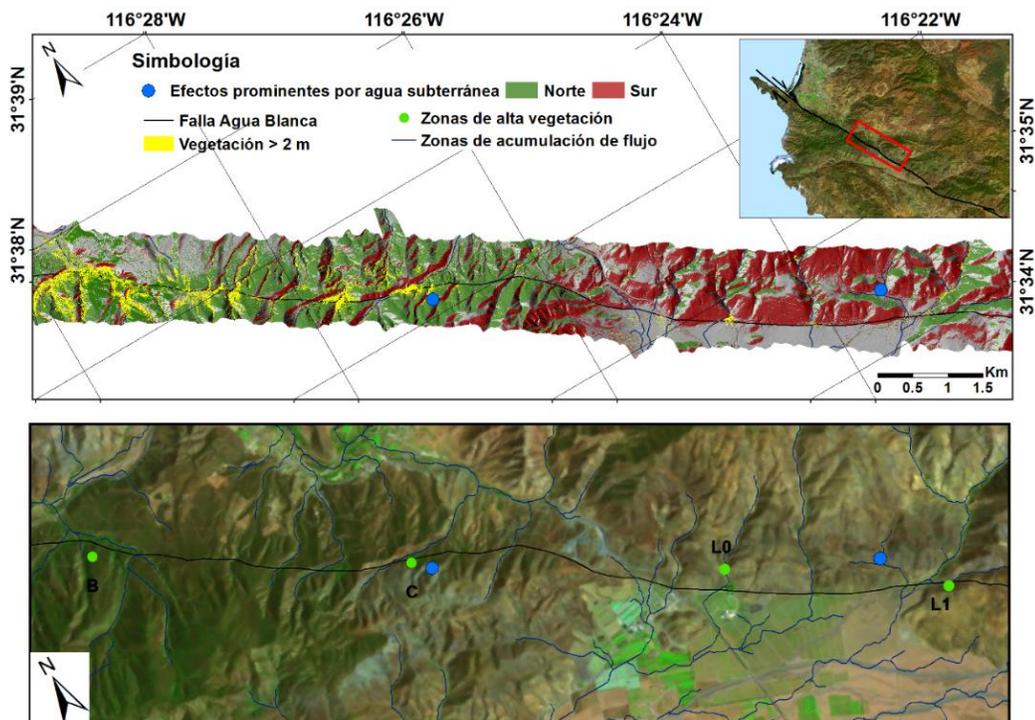
Siguiendo la segmentación establecida para la FAB, se realizaron intersecciones entre las variables: CHM (vegetación > 2 m), orientación de laderas (Norte y Sur), zonas de acumulación de flujo y el trazo de la Falla. La orientación de laderas mostradas en las siguientes figuras, han sido calculadas a partir del MDT de la nube de puntos LiDAR, a diferencia de los resultados en la figura 10 calculadas a partir del modelo SRTM1. A la serie de figuras de esta sección, se sobrepuso la ubicación aproximada de los efectos prominentes por agua subterránea reportados por Allen et al. (1960).

En la figura 18 se puede observar la intersección entre las variables CHM, orientación de laderas, zonas de acumulación de flujo y el trazo de la falla para el segmento Norte, en el cual se observa que hay ciertas zonas donde la vegetación está siguiendo la red de drenaje de la zona, donde también existen altos valores de NDVI. En esta sección se observa que vertientes aledañas a la FAB mayormente están orientadas hacia el Norte (color verde), y pocas orientadas hacia el Sur (rojo) (ver anexo D.1)



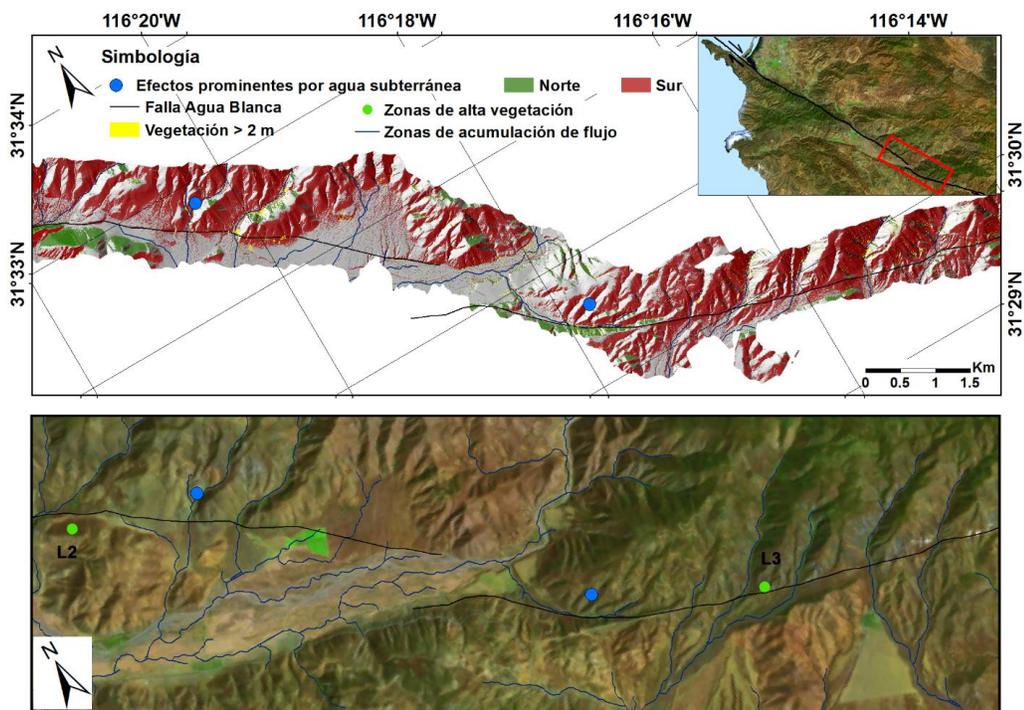
**Figura 18.** Intersección entre las variables orientación de laderas (Norte y Sur), zonas de acumulación de flujo, vegetación > 2 metros y trazo de la falla para el segmento Norte (Punta Banda) se identificaron en esta sección 2 zonas de alta acumulación (A y B) las cuales se observa en la imagen LANDSAT 8 OLI/TIRS (parte inferior).

Hacia el valle de Santo Tomás (figura 19) se puede observar alta cobertura vegetal en la zona, cuyos parches se encuentran mayormente sobre el patrón de drenaje (zonas B, C, y L0), además se logra identificar solo ciertos parches aleatorios al trazo, particularmente expuestos hacia el norte (verde) (ver anexo D.2).

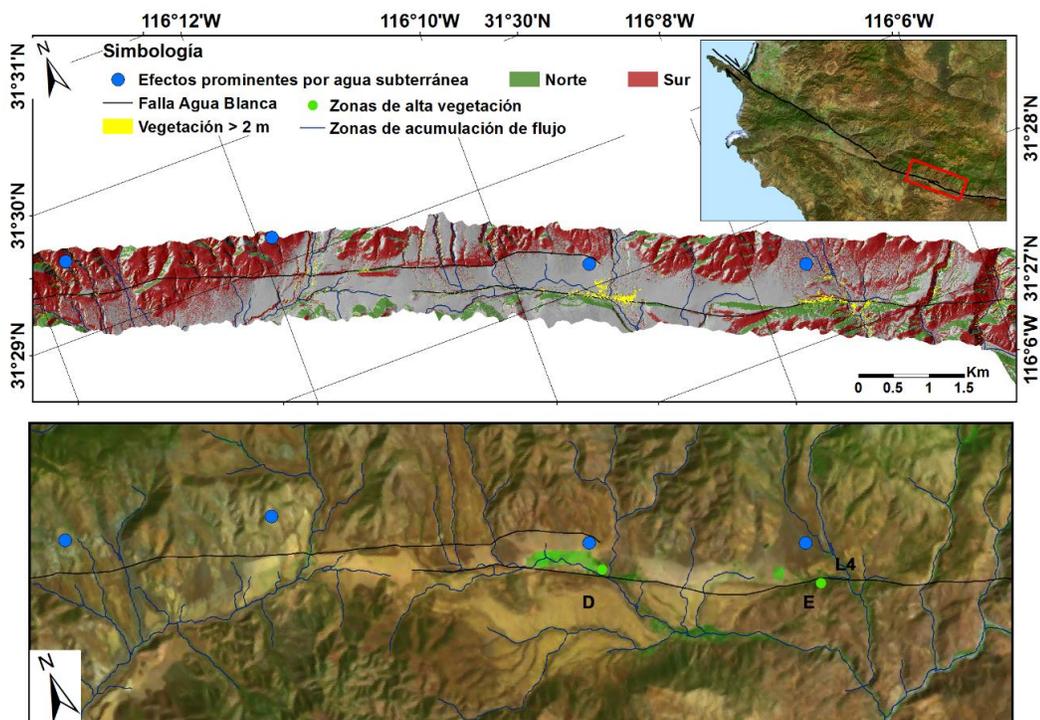


**Figura 19.** Intersección de las variables acumulación de flujo (línea azul), orientación de laderas (Norte y Sur) y la vegetación mayor a 2 metros calculada a partir de los modelos CHM, para el segmento Centro (Valle de Santo Tomás).

El segmento Sur subdivido en 2 secciones situadas en el Valle de Agua Blanca (figuras 20 y 21), muestran diferencias en la distribución espacial de vegetación mayor a 2 m, donde se observa la escasez de zonas de intersección entre la acumulación de flujo y el NDVI, además en esta sección la orientación de las laderas mayormente están hacia el Sur y presentan cobertura de vegetación mayor a 2 m. (ver anexo D.3)

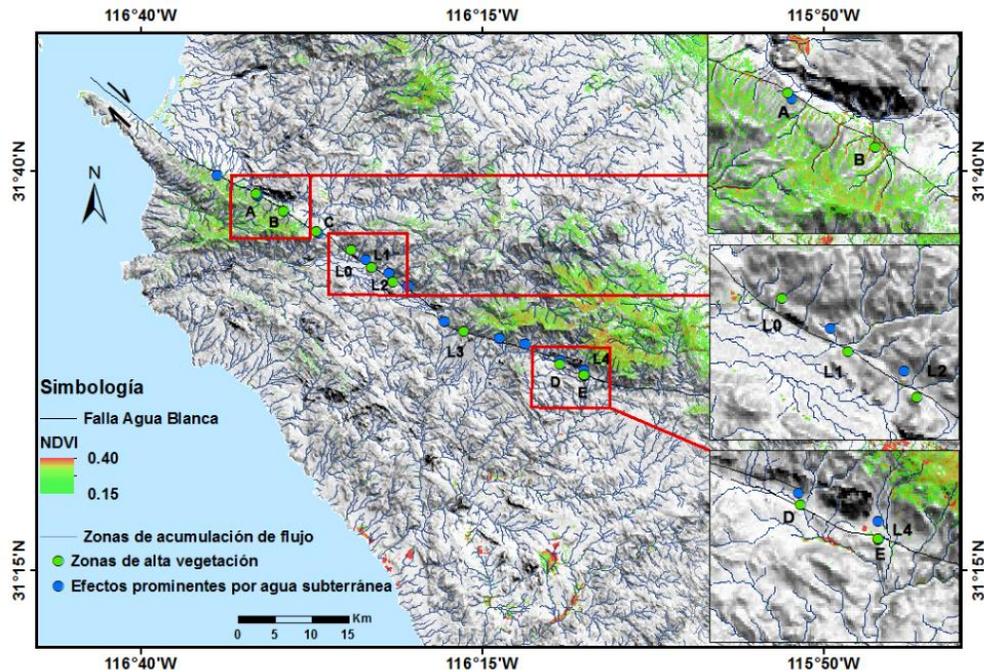


**Figura 20.** Intersección en el segmento Sur de la Falla ubicado en el Valle Agua Blanca (sección 1), donde las zonas de identificadas como vegetación alta se encuentran mayormente orientada hacia el Sur.



**Figura 21.** Intersección entre las variables para el segmento Sur (sección 2) al final del corredor del vuelo LiDAR donde se identifican 3 zonas de interés (D, E y L4), así mismo se observan zonas agrícolas.

Al analizar las variables calculadas y su intersección, se distinguen ciertas zonas donde existe alta acumulación de flujo, vegetación anómala por altura junto al trazo de la FAB, esta relación espacial se puede observar en la figura 2, donde además las zonas identificadas también coinciden con las zonas de vegetación anómala por verdor (cobertura de vegetación).



**Figura 22.** Localización de zonas de alta cobertura de vegetación (NDVI) a lo largo de la FAB junto a zonas de acumulación de flujo (línea azul), donde se identificaron 10 zonas de interés y se incorporaron los sitios de efectos prominentes por agua subterránea incorporados por Allen et al., (1960).

Una vez identificadas las zonas de intersección entre las variables ya mencionadas, se calcularon los valores promedios de NDVI y de altura del dosel con respecto a la orientación de laderas de las zonas identificadas (figura 22).

Primeramente se hace referencia a los resultados de vegetación anómala por altura, es decir, con una altura mayor a 2 metros con respecto a la orientación de laderas (figura 23), donde se observa que la altura del dosel para la ladera Norte tiene alturas entre los 2 y 8 metros, las laderas Sur tienen valores promedio entre los 2 y 9.5 metros, mientras que las alturas de dosel por zona tienen promedios de entre 3 y 12.5 metros. Por otra parte, se calcularon los valores promedio del índice NDVI para cada una de las zonas identificadas a lo largo de la FAB, en general, se observa que el umbral del índice de vegetación NDVI tiene promedios entre 0.15 y 0.18 (figura 24).

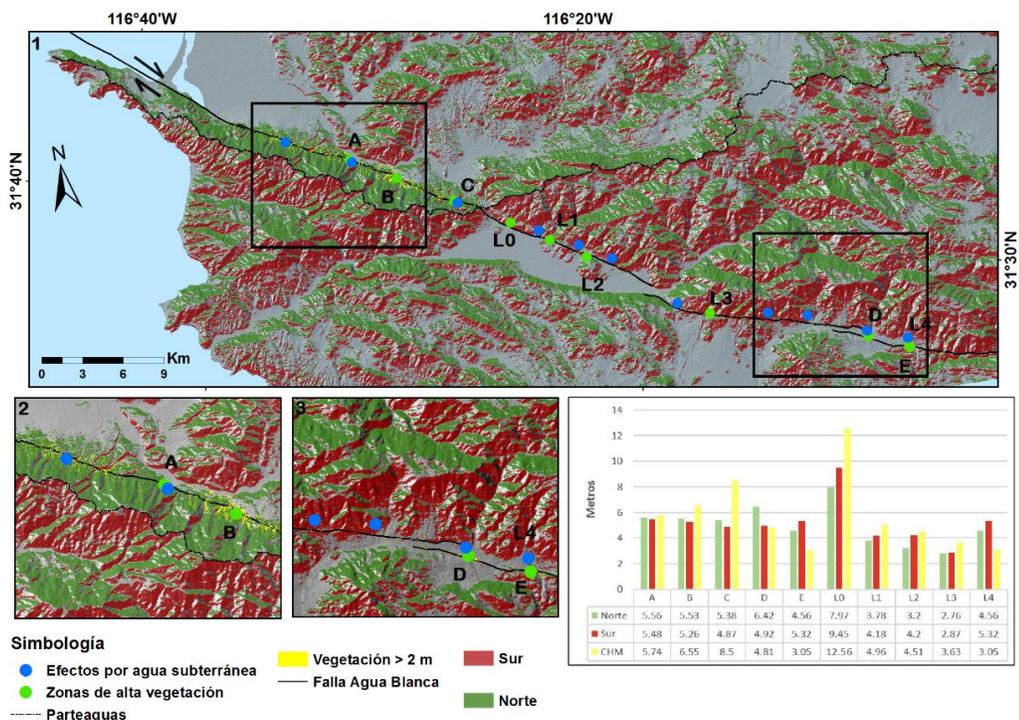


Figura 23. Valores promedio de altura del dosel por zona identificada (color verde) con respecto a la orientación de las laderas, teniendo de color rojo laderas hacia el Sur y en verde laderas orientadas hacia el Norte.

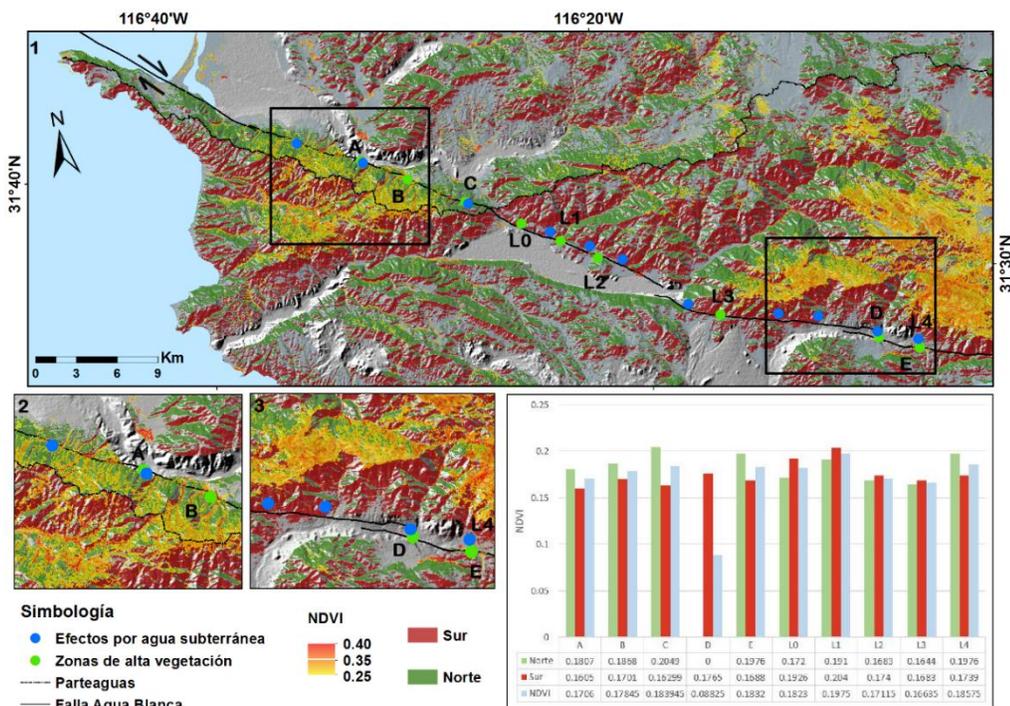


Figura 24. Valores promedio de NDVI a lo largo de la FAB con respecto a la orientación de laderas clasificadas en Norte (verde) y Sur (rojo) para las zonas identificadas.

## Capítulo 4. Discusión

---

Es conocida la relación que hay entre las fallas, fracturas y el agua subterránea. Una forma indirecta de identificar el recurso es a través de la vegetación, ya que ésta lo aprovecha para su desarrollo y crecimiento (Nasreen, 2003; Singhal y Gupta, 2010). Si el recurso es persistente, la vegetación crece anómalamente (abundancia y altura) con respecto a la vegetación circundante.

Esta relación (fallas-agua-vegetación) es más evidente en zonas áridas y semiáridas donde el verdor y la altura anómala de la vegetación sobre sale en su entorno, particularmente en la época de secas donde la disponibilidad del agua por eventos de precipitación es mínima o nula. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar si el trazo de la Falla Agua Blanca (FAB) tiene algún efecto sobre la distribución espacial de la vegetación nativa. Esto implicó, delinear el trazo de la FAB y detectar vegetación anómala por su verdor y altura, para buscar alguna asociación entre ellas.

El trazo de la FAB se definió inicialmente apoyándose en trabajos previos (Gastil et al., 1973; Allen et al., 1960; Rockwell et al., 1993; Rockwell et al., 1989) y refinando su trazo con un artículo de Gold (2016), modelos MDT y MDS derivados del vuelo LIDAR, así como de imágenes satelitales de alta resolución y apoyo del Dr. John M. Fletcher y M.S. Peter O. Gold.

### 4.1 Análisis espacial de la FAB y la vegetación

Bajo los resultados obtenidos del análisis hidrológico, se encontró que a lo largo de la traza de la FAB hay 3 subcuencas (A. Las Ánimas, A. Santo Tomás y A. San Vicente). El segmento Norte (Punta Banda) corresponde a la subcuenca Arroyo Las Ánimas, zona donde han ocurrido los primeros desplazamientos tipo lateral derecho de la falla (Allen et al., 1960); respuesta a este proceso, la fisiografía de la zona se logra observar en campo y digitalmente en los modelos de elevación (MDT y MDS) con mayor claridad, lo que además facilitó la redefinición de la traza de la FAB. Para el segmento Centro (Valle de Santo Tomás) corresponde la subcuenca A. Santo Tomás, donde el relieve de la zona es controlado por el desplazamiento del valle, y el A. Santo Tomás es controlado por la falla (Allen et al., 1960); por otro lado el segmento Sur (Valle Agua Blanca) le corresponde la subcuenca A. San Vicente.

Se sabe que a lo largo de la FAB existen manantiales y manifestaciones hidrotermales. Allen y colaboradores (1960) en sus mapas incorporaron sitios con efectos prominentes de agua subterránea, asociados a parches de vegetación anómala. La ubicación de estos sitios se incorporaron en el análisis de

la FAB y la vegetación anómala (figuras 18 y 24), donde algunos de estos sitios coinciden con la vegetación anómala revelada por los métodos de percepción remota aplicados.

Por otro lado, se analizaron factores que pueden favorecer el desarrollo de la vegetación, como la exposición de laderas en latitudes medias y altas (Del Toro-Guerrero et al., 2016; Albaba, 2014; Auslander et al., 2003), y zonas de acumulación de flujo superficial que ocurren en las cañadas y cauces principales de arroyos. En esta red de drenaje es donde se desarrollan corredores de vegetación riparia (anómala). Así que el objetivo de este análisis es separar los tres factores analizados (orientación de laderas, red de drenaje y agua en FAB) para distinguir la contribución de cada factor en el desarrollo de la vegetación, y en particular la influencia de la FAB.

La presencia de vegetación anómala en segmentos de la FAB no ocurre por la falla en sí, sino debido al agua atrapada o conducida por sus fracturas, y que las plantas aprovechan para su desarrollo. En los resultados del análisis se encontraron zonas de vegetación anómala donde coinciden con el trazo de fallas o fracturas con la red de drenaje. Tal que, se puede observar en la figura 9 vegetación anómala por su verdor (AV) a lo largo de la FAB (parte superior de la figura) y así mismo, se puede apreciar vegetación AV a lo largo de la falla Maximinos (parte inferior de la figura), y en general la vegetación AV siguiendo la red de drenaje (figura 22).

Por otro lado, el análisis sobre el efecto de la orientación de laderas (N y S) en la vegetación (NDVI) arrojan lo esperado para latitudes medias, un patrón general de valores más alto en las laderas Norte que en laderas Sur. El trazo de la falla sigue un patrón bien definido y con poca variabilidad con respecto a su ubicación relativa a la orientación de laderas que cruza.

En el segmento Norte (Punta Banda), el trazo de la FAB se ubica sobre laderas orientadas preferentemente hacia el Norte, donde el promedio general de NDVI es mayor (0.18) que en las laderas orientadas hacia el Sur (0.17). Existen valores altos de NDVI (0.48) y vegetación alta (CHM), tanto en la FAB como en cañadas. La presencia de mayor vegetación a lo largo de este segmento revela mayor disponibilidad de humedad en toda la vertiente, como se esperaría en una ladera Norte. Los parches de anomalía de vegetación por altura (AA) revelada por el CHM a lo largo de la FAB es muy evidente en este segmento, y es claramente distinguible la AA y AV que ocurren a lo largo de las cañadas (figuras 11, 18 y 23).

En los segmentos Centro y Sur (valle de Santo Tomás y Valle Agua Blanca), la FAB corre a lo largo de laderas primordialmente orientadas hacia el Sur (figuras 19, 20 y 21) así como en terrenos con pendiente menor a 10 grados. Encontrando mayormente valores más bajos de NDVI (0.39) y menos vegetación alta que en la

ladera Norte. Sin embargo la presencia de vegetación anómala (AV y AA) se ve favorecida por la red de drenaje (figuras 22 y 23).

## 4.2 LiDAR aéreo vs Fotogrametría por dron

Como complemento del análisis espacial en este trabajo, se realizó una reconstrucción del relieve y altura de la vegetación a través de fotogrametría por dron sobre uno de los parches de vegetación anómala más prominente a lo largo de la FAB, con la finalidad de comparar los productos derivados de la nube de puntos del levantamiento aéreo LiDAR. Teniendo así, modelos digitales de la superficie (MDS), del terreno (MDT) y de altura del dosel (CHM), calculados con las dos fuentes de datos (LiDAR y fotogrametría por dron) para la ladera Norte de la península de Punta Banda (segmento Norte) sobre la FAB (figuras 16 y 17).

Los MDS texturizados con la vegetación mayor a 2 m (figura 16) a pesar de ser generados con diferentes fuentes y diferentes densidades de puntos, ambos presentan con claridad los rasgos de la superficie y delimitan los parches de vegetación anómala. En este modelo no se puede apreciar una ventaja sobresaliente entre la nube de puntos RGB por dron (23 pts/m<sup>2</sup>) y la nube de puntos LiDAR (5 pts/m<sup>2</sup>). En el caso de los MDT (figura 17), ambos modelos permiten observar con claridad y detalle las características del paisaje, como por ejemplo, las facetas triangulares, la red de drenaje, abanicos aluviales, escarpes, etc., permitiendo así redefinir el trazo de la falla AB. Sin embargo, en este modelo se alcanza apreciar las ventajas en la nube de puntos LiDAR, en particular en las zonas de mayor densidad y altura de la vegetación.

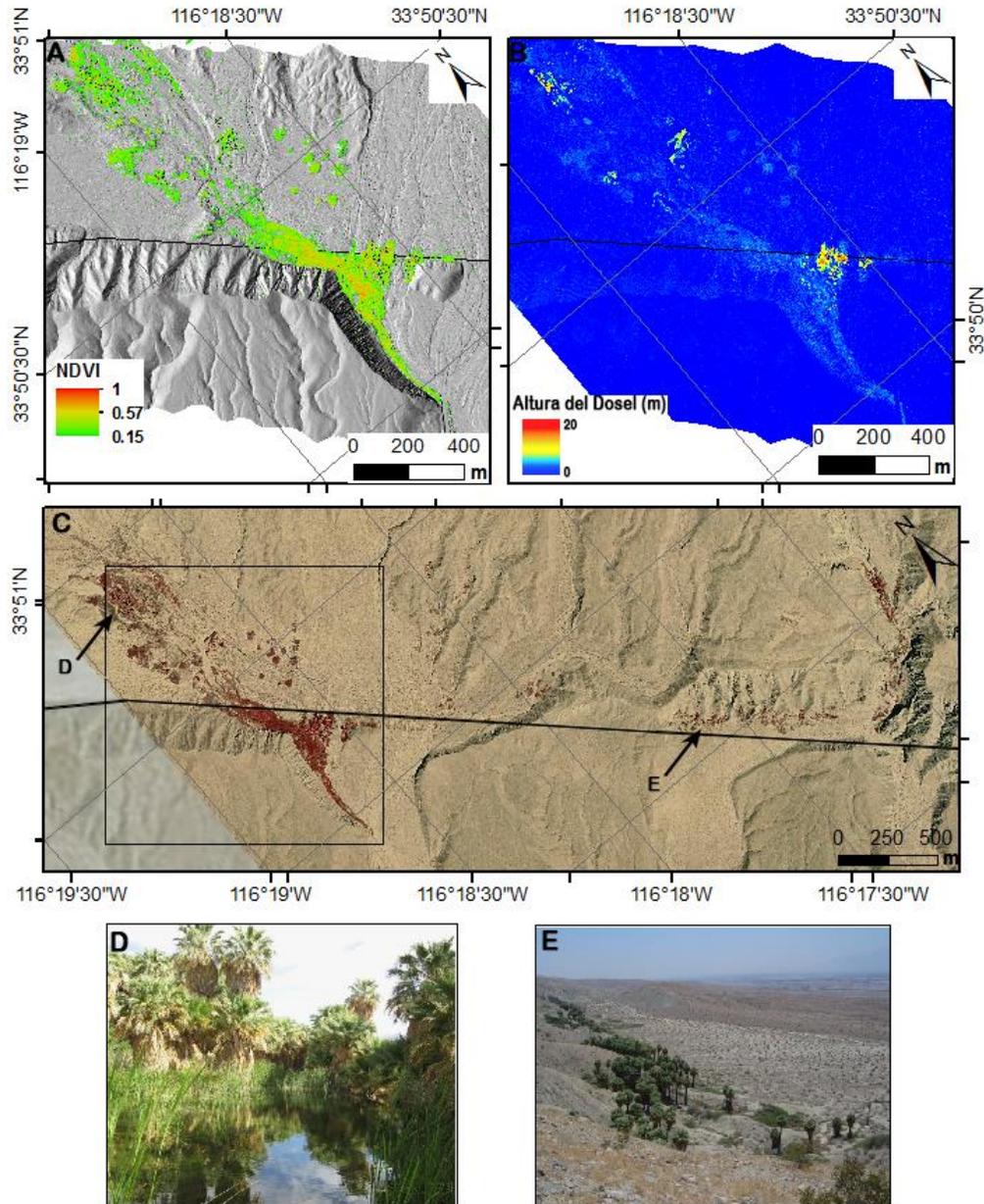
Cabe destacar que se utilizaron los mismos métodos y herramientas para calcular ambos productos a partir de las dos nubes de puntos fuente, no obstante a pesar de la diferencia de las densidades de puntos en ambas fuentes, ambas tecnologías permitieron generar productos de alta resolución, precisión y detalle. Además de las ventajas de la tecnología LiDAR aéreo por la mayor penetración y múltiples retornos del pulso láser, otra de sus ventajas es la capacidad de cubrir mayores extensiones con respecto a la de los drones. Por lo que el cubrir el corredor de la FAB del levantamiento LiDAR con el dron Ebee hubiera tomado mucho tiempo.

### 4.3 Contribución

Una de las principales contribuciones del presente trabajo fue las aplicaciones de técnicas emergentes de percepción remota como LiDAR aéreo y fotogrametría por dron, sobre un fenómeno ya conocido como la relación entre el agua, fallas y vegetación. Bajo la reconstrucción de la estructura vertical de la vegetación para detectar anomalías de altura y su relación con el trazo de la FAB; determinando la altura de su dosel e identificando las zonas de mayor verdor (NDVI) permitieron confirmar y ubicar con exactitud los parches de vegetación a lo largo de la FAB.

### 4.4 Ejemplo de la relación falla-vegetación-agua en la FSA

Como un ejercicio adicional a esta investigación, y donde se puede observar esta relación (falla-vegetación-agua) se exploró una zona árida donde se cuenta con un levantamiento aéreo LiDAR así como fotografía aérea infrarroja. Se aplicó la misma metodología en un segmento de la Falla San Andrés (FSA) cercano al valle de Coachella ( $33^{\circ}50'14.57''N$ ,  $116^{\circ}18'37.70''O$ ), donde existe un oasis a lo largo de la FSA. Una diferencia con lo aplicado con la FAB, fue el uso de fotografía infrarroja con una resolución espacial de 1 m tomada el 26/09/1996 (de, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) para calcular el índice de vegetación NDVI, a diferencia de los 30 m de la imagen satelital LANDSAT 8 OLI/TIRS. Para el modelo CHM se tenía una nube de puntos LiDAR (de, <http://www.opentopography.org/>) del proyecto B4, el cual realizó un levantamiento aéreo LiDAR a lo largo de la FSA y Falla San Jacinto al sur de California entre 18 y 27 de Mayo del 2005. A pesar de la diferencia de años entre la adquisición de la fotografía infrarroja y la nube de puntos, en los productos generados, se puede apreciar la vegetación anómala por verdor (NDVI) y por altura (CHM). A diferencia de la FAB donde la vegetación anómala son principalmente encinos, en este sitio de la FSA, la vegetación predominante son palmeras, las cuales han sido estudiadas previamente por Vogl y McHargue (1966), donde determinaron los factores que intervenían en la distribución de estos parches, encontrando diferentes especies de palmeras en su distribución a lo largo de la falla, atribuyéndoselo principalmente por la disponibilidad de agua.



**Figura 25.** Segmento de la Falla San Andrés (línea negra) cercano al valle de Coachella en el Desierto Colorado ( $33^{\circ}50'14.57''N$ ,  $116^{\circ}18'37.70''O$ ) donde se resaltó la vegetación anómala por verdor (A) a través del índice NDVI calculado a partir de la fotografía infrarroja (C). Vegetación anómala por altura resaltada a partir del modelo de altura de dosel CHM (B) en un parche de vegetación a lo largo de la falla que se desarrolla gracias a la persistente disponibilidad de agua. En la foto infrarroja (C) se indica la posición donde fueron tomadas las fotos D y E. La foto D tomada por Stabins y disponible en Google Earth, ubicación:  $33^{\circ}49'40.97''N$ ,  $116^{\circ}17'36.50''O$  y la foto E tomada por Denis Lambert disponible en Google Earth, ubicación:  $33^{\circ}50'51.95''N$ ,  $116^{\circ}18'47.63''O$ . La foto E captura una vista al horizonte hacia el SE donde se aprecia la línea de palmeras a lo largo FSA.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal evaluar la influencia del trazo de la falla Agua Blanca (FAB) en la distribución espacial de la vegetación nativa incorporando tecnologías y técnicas emergentes en percepción remota.

Se confirma que la vegetación anómala por verdor está fuertemente relacionada con la red de drenaje y las zonas de alta acumulación de flujo superficial. Estas zonas de acumulación en algunos sitios coinciden con el trazo de la FAB, y sitios fuera de la zona de estudio persiguen esta tendencia, encontrándose en sitios donde existen fallas o fracturas.

El análisis espacial de la distribución de vegetación anómala en la FAB a través de la orientación de laderas, NDVI y CHM, nos indican que la vegetación anómala por verdor (AV) está mayormente distribuida sobre la ladera Norte al igual que la vegetación anómala por altura (AA), la cual tiene alturas entre 0 y 20 m. Teniendo así, que la vegetación anómala (AV y AA) se encuentra distribuida principalmente por la disponibilidad hídrica en la zona, por lo que la influencia de la falla es primordialmente por la capacidad de retención, conducto o acumulación de agua.

Las zonas de vegetación anómala por su altura (AA) reveladas por el CHM, a lo largo de la FAB son muy evidentes principalmente en el segmento Norte (Punta Banda) de la Falla AB. Así mismo son claramente distinguibles los parches de vegetación de vegetación anómala por AA y AV que ocurren a lo largo de las cañadas y por el efecto de laderas Norte. Además estas

Por otro lado, se generaron modelos digitales de elevación (MDT, MDS y CHM) de alta resolución a partir de una nube de puntos LiDAR y nube de puntos por fotogrametría por dron de la FAB, sin embargo en el caso de la fotogrametría de dron solo se tiene el levantamiento del terreno de un segmento de la falla a partir de drones, teniendo además imágenes a color natural (RGB) y en infrarrojo cercano (NIR) de alta resolución para futuros trabajos sobre la vegetación en la zona.

En general LiDAR presenta mayores ventajas en la calidad y exactitud de los productos, no obstante su mayor desventaja es el costo y su baja disponibilidad en situaciones donde se requiere una respuesta rápida. Por otro lado, el uso de drones además de lograr generar productos de alta resolución, es de mayor

accesibilidad al público, a menor costo y permite atender situaciones donde se requiera una pronta respuesta.

## Literatura citada

---

- Abaurrea-Pereda, M. 2013. Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra. Tesis de Licenciatura. Universidad Pública de Navarra, 40 pp.
- Acevedo, E. 1979. Interacciones suelo-agua-raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. Bol. Téc. Fac. Agron. Univ. Chile, 44, 17-25. Consultado el 10 de Diciembre de 2016, de: <http://listas.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/INTERACCIONES%20SUELO-AGUA-RAIZ%20EN%20EL%20PROCESO%20DE.pdf>
- Albaba, I. 2014. The effects of slope orientations on vegetation characteristics of Wadi Alquf forest reserve (WAFR) West Bank Palestine. *International Journal of Agricultural and Soil Science*, 2(7), 118-125.
- Allen, C., Silver, L., Stehli, F. 1960. Agua Blanca Fault- a major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 71(4), 467-482.
- Andersen, H. E., McGaughey, R. J., Reutebuch, S. E. 2009. Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 441-449.
- Armesto, J. J., Martínez, J. 1978. Relations between vegetation structure and slope aspect in the Mediterranean region of Chile. *J. Ecol*, 881-889.
- ASPRS. 2008. LAS Specification version 1.2 . Consultado el 24 de Octubre de 2016, de: [http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/asprs\\_las\\_format\\_v12.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/asprs_las_format_v12.pdf)
- Auslander, M., Nevo, E., Inbar, M. 2003. The effects of slope orientation on plant growth development instability and susceptibility to herbivores. *Journal of Arid Environments*, 55, 405-416.
- Bennie, J., Huntley, B., Wiltshire, A. O., Hill, M., Baxter, R. 2008. Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 216, 47-59.
- Carter, R. E., Klinka, K. 1990. Relationships between growing season soil water deficit mineralizable soil nitrogen and site index of coastal Douglas fir. *Forest Ecology and Management*, 30(1), 301-311.
- CONABIO.2016. EncicloVida. Consultado el 15 de Noviembre de 2016, de: <http://bios.conabio.gob.mx/>
- Cracknell, A. 2007. *Introduction to Remote Sensing* (2 ed.). CRC Press. 335 pp.
- Cruz-Martínez, M. F. 2008. Caracterización de puntos de control en teledetección: aplicación a la corrección geométrica automática de imágenes. Volumen 11 de tesis doctorales. Universidad Almería. 231 pp.
- Delgadillo, J. 1998. *Florística y ecología del norte de Baja California* (2 ed.). Universidad Autónoma de Baja California (UABC), 421 pp.
- Del Toro-Guerrero, F. J., Hinojosa-Corona A., Kretschmar, T.G. 2016. A Comparative Study of NDVI Values Between North-and South-Facing Slopes in a Semiarid Mountainous Region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remoted Sensing*, 9(12), 5350-5356.

- Dubayah, R. O., Drake, J. B. 2000. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 98(6), 44-46.
- Flores, V., Campanero, A., Escudero, R. 2001. El sistema de vigilancia y alerta temprana de situaciones de sequía agrícola del MAPA: a partir del análisis de datos diarios NOAA-AVHRR. *Jl Rosell y J.A. Martínez-Casanovas (Coords)*, 86-90.
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Danson, F. M. 2010. Estimating biomass carbon stock for a mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 816-830.
- Gastil, R. G., Phillips R.P. Allison E.C. 1973. Reconnaissance Geologic Map of the State of Baja California: Geological Society of America; accompanies Reconnaissance Geology of the State of Baja California by the same authors, 1975: Geol Soc. America Memoir 140, 170 pp.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. 1997. Acerca de índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10). 1-10.
- Gold, P. 2016. A Review of Geologic Evidence for Late Quaternary Slip Along the Agua Blanca Fault, Northern Baja California, Mexico. In R. Adams (ed). *Field trip Guide: Geology and Geologic Hazards of Northwestern Baja's Gold Coast and the Agua Blanca Fault*. San Diego Association of Geologists, 165-176 pp.
- González-García, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Agnew, D. 2003. Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical research letters*, 30(16). Doi:10.1029/2003GL017732
- Gutiérrez-jurado, H., Vivoni, E., Cikoski, C., Harrison, J., Bras, R., Istanbuloglu, E. 2013. On the observed ecohydrologic dynamics of a semiarid basin with aspect-delimited ecosystems. *Water Resources Research*, 49(12), 8263-8284.
- Hooper, E. D. 1991. Fluid migration along growth faults in compacting sediments. *Journal of Petroleum Geology*, 14(2), 161-180.
- INIFAP, CONABIO. 1995. Carta Edafología 1:1000000. Consultado el 25 de Noviembre de 2015, de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/edafo/tsuelo/eda251mgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/tsuelo/eda251mgw)
- Jensen, J. R. 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall. 592 pp.
- Keller, E. A., Pinter, N. 1996. *Active Tectonics: Earth, Uplift and Landscape*. Prentice Hall. 338 pp.
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Isenburg, M., Wang, T., Hussin, Y. A. 2014. Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(9), 863-872.
- López, F. 2000. *Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera*. Univ. Nacional de Colombia. 88 pp.
- Naesset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 88-99.
- Nasreen, M. 2003. *The Effect of Faults upon Groundwater Flow in the Baton Rouge Fault System*. University of New Orleans. 108 pp.

- Pérez-Flores, M., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Delgado, L., González-Fernández, A., Vázquez-González, R. 2004. Structural pattern of the Todos Santos Coastal Plain based upon geophysical data. *Ciencias Marinas*, 30(2), 349-364.
- Popescu, S. C. 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, 31(9), 646-655.
- Ramírez-Serrato, N. 2014. Índices de vegetación: una herramienta para el monitoreo de esfuerzos de conservación. El caso del Bosque de Ciprés de la Isla Guadalupe. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Rockwell, T. K., Muhs, D.L., Kennedy, G.L., Wilson, S., Hatch, M.E., Klinger, R. 1989. Uranium-series ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, Mexico: in P.L. Abbott (ed.), *Geologic Studies in Baja California*, Soc. Econ. Paleon. and Min. Book 63, 1-16 pp.
- Rockwell, T.K., Schug, D.L., Hatch, M.E. 1993. Late Quaternary slip Rates along the Agua Blanca fault, Baja California, Mexico: in (P.L. Abbott, ed.) *Geological Investigations of Baja California: South Coast Geological Society, Annual Field Trip Guidebook No. 21*. 53-92 pp.
- Singhal, B. S., Gupta, R. P. 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks* (2 ed.). Springer. 408 pp.
- Snavely, N., Seitz, S., & Szeliski, R. 2008. Modelling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210.
- Sternberg, M., Shoshany, M. 2001. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research*, 16, 335-345.
- Tarbutck, E. J., Lutgens, F. K. 2005. *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8 ed.). Pearson Educación .
- USGS. 2015. Consultado el 11 de Junio de 2016, de: [http://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](http://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php)
- USGS. 2013. Landsat Missions. Consultado el 02 de Septiembre de 2016, de: <http://landsat.usgs.gov>
- Vogl, R., McHargue, L. 1966. Vegetation of California Fan Palm Oases on the San Andreas Fault. *Ecology*, 47(4), 532-540.
- Wang, L., Wei, S., Horton, R., Shao, M. 2011. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *Catena*, 87, 90-100.
- Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning and introduction and overview. *ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(2), 68-82.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J. 2012. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wong O., V. 1980. Implicaciones tectónicas de la Falla de Agua Blanca en la Bahía de Todos Santos. Ensenada. Tesis de maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

## Anexos

---

### Anexo A

#### A.1 Calculo del Modelo Digital del Terreno a partir de fotogrametría por dron.

```
>> lastile -i *.laz --tile_size 200 -buffer 50 -flag_as_withheld -odix t -olaz
```

En este paso se crean cuadrantes de la nube de puntos de tamaño 200 metros por 200 metros con un buffer de 50 metros, la opción “flag\_as\_withheld” marcar todos los puntos “buffer”, por si en algún momento se quieren extraer.

```
>> lasnoise -i *.laz -step_xy 2 -step_z 1 -isolated 15 -odix n -olaz -cores 4
```

En este paso se clasifican los puntos aislados (ruido) que pudieran obstaculizar la posterior clasificación. Las condiciones que se aplican en esta sección son las siguientes: “isolated 15”, significa que todos los puntos rodeados por menos de 15 puntos en celdas vecinas en una cuadrícula 3D se consideran puntos aislados. Para especificar el tamaño de cada celda de la cuadrícula 3D se incorpora los comandos “-step\_xy 2” y “-step\_z 1”, lo que significa que la cuadrícula será de 2 m x 2 m x 1 m.

```
>> lasground -i *.laz -ignore_class 7 -bulge 1.0 -odix g -olaz -cores 4
```

Bajo estas instrucciones se realizó una clasificación de los puntos considerados como tierra y lo que no lo fuera, ignorando aquellos puntos aislados o también llamados ruido (clase 7), conservando y añadiendo solo los puntos de  $\leq 1$  m (“bulge 1.0”) por encima de la estimación inicial de los puntos tierra y no.

```
>> las2dem -i *.ng.laz -keep_class 2 -step 0.5 -kill 200 -use_tile_bb -odix dtm -obil -cores
```

Se realiza un ráster de aquellos puntos clasificados como tierra (clase 2) con una resolución de 0.5 m (“-step 0.5”) interpolando en todos los huecos hasta 200 m (-kill 200) se utiliza “use\_tile\_bb” para crear un ráster solo de los tiles originales sin tomar los tiles con buffer esto nos permite tener un ráster se alineen sin objetos a través de los límites.

```
>> lasgrid -i *.dtm.bil -merged -step 1.0 -average -o dtm.bil
```

Una vez creados los archivos del paso anterior se unen con las siguientes condiciones “-step 1.0” para evitar el “Anti-aliasing” se hace un promedio de cada 4 píxeles de 0.5 metros de resolución en un píxel con una resolución de 1 m.

```
>> blast2dem -i dtm.bil -hillshade -utm 11N -o dtm.png
```

El último paso es hacer un sombreado del MDT.

## **A.2 Calculo del Modelo Digital de la superficie a partir de fotogrametría por dron.**

**>> lastile -i \*.laz -flies\_are\_flightlines -tile\_size 200 -buffer 50 -flag\_as\_withheld -odix t -olaz**

En este paso se crean cuadrantes de la nube de puntos de tamaño 200 metros por 200 metros con un buffer de 50 metros, la opción “flag\_as\_withheld” marcar todos los puntos “buffer”, con el fin de si en algún momento se quieren extraer.

**>> lasnoise -i \*.laz -step\_xy 2 -step\_z 1 -isolated 15 -odix n -olaz -cores 4**

En este paso se clasifican los puntos aislados (ruido) que pudieran obstaculizar la posterior clasificación. Las condiciones que se aplican en esta sección son las siguientes: “isolated 15”, significa que todos los puntos rodeados por menos de 15 puntos en celdas vecinas en una cuadrícula 3D se consideran puntos aislados. Para especificar el tamaño de cada celda de la cuadrícula 3D se incorpora los comandos “-step\_xy 2” y “-step\_z 1”, lo que significa que la cuadrícula será de 2 m x 2 m x 1 m.

**>> lasground -i \*.laz -ignore\_class 7 -bulge 1.0 -odix g -olaz -cores 4**

Bajo estas instrucciones se realizó una clasificación de los puntos considerados como tierra y lo que no, ignorando aquellos puntos aislados o también llamados ruido (clase 7), conservando y añadiendo solo los puntos de  $\leq 1$  m (“bulge 1.0”) por encima de la estimación inicial de los puntos tierra y no.

**>> las2dem -i \*.ng.laz -step 0.5 -kill 200 -use\_tile\_bb -odix dsm -obil -cores 4**

En este punto a diferencia de un MDT se toman en cuenta todos los puntos; con una resolución de 0.5 m (“-step 0.5”) se hace una interpolación en todos los huecos hasta 200 m (-kill 200), se utiliza “use\_tile\_bb” para crear un ráster solo de los tiles originales sin tomar los tiles con buffer esto nos permite tener un ráster se alineen sin objetos a través de los límites.

**>> lasgrid -i \*.dsm.bil -merged -step 1.0 -average -o dsm.bil**

Una vez creados los archivos del paso anterior se unen con las siguientes condiciones “-step 1.0” para evitar el “Anti-aliasing” se hace un promedio de cada 4 píxeles de 0.5 metros de resolución en un píxel con una resolución de 1 m.

**>> blast2dem -i dsm.bil -hillshade -utm 11N -o dsm.png**

En el último paso hacer sombreado del MDS.

## Anexo B

### Calculo CHM (*Canopy Height Model*) *pit free*

**>> lastile -i \*.las size 100 -buffer 50 -odix t -olaz**

De la nube de puntos que se tiene se hacen “Tiles” (cuadrantes) de tamaño 100 con un buffer de 50, el tamaño del buffer nos indica las unidades a las cuales a partir del cuadrante tomara hacia cada dirección.

**>> lasground -i \*.laz -extra\_fine -odix g -olaz -cores 4**

En esta sección los “tiles” creados se clasifican los puntos entre puntos de tierra (clase 2) y puntos no tierra (clase 1), se le añade la condición “-extra\_fine” ya que la zona de estudio no es en su totalidad plana, por lo que existen diversas pendientes a lo largo del segmento.

**>> lasheight -i \*.laz -replace\_z -odix n -olaz -cores 4**

Posterior a la clasificación de los puntos se hace una “normalización” de las elevaciones, en donde se reemplaza cada punto de la altura calculada, es decir, que los puntos clasificados como puntos de tierra (clase 2) tendrán una elevación igual a cero y los otros puntos tendrán una elevación que es igual a su altura relativa, en cuanto a su realidad del terreno circundante.

Una vez que se hayan creado los 3 primeros pasos (cuadrantes, clasificación y normalizado) se debe realizar lo siguiente:

- 1) Se mantienen solo los puntos más altos por cada celda de la cuadrícula.
- 2) Se interpolan todos los retornos o eco retornos altos.

**>> lasthin -i \*.gn.laz -subcircle 0.1 -step 0.25 -highest -odix Thin ^-olaz -cores 4**

En este paso se realiza un adelgazamiento con un espaciado de 0.25 “-step 0.25” y manteniendo el punto más alto “-highest” por cada celda de la cuadrícula, además se le incorpora la opción “-subcircle 0.1” replicara cada punto 8 veces en un círculo con un radio de 0.1.

En la siguiente sección se crean los CHMs con algunas condiciones, las características que comparten los distintos CHM que se generaran en los siguientes pasos son los siguientes: al archivo de entrada será aquel que se le hizo un adelgazamiento (lasthin); se define un espaciado de 0.5 (este espaciado se puede consultar de la siguiente manera en lastools: lasinfo -i \*.las -nh -nv -nmm -cd ya que cada nube de puntos cuanta con su espaciado específico), además se le indica el hacer triángulos no raster con bordes más largos de 1.5 metros.

```
>>las2dem -i *gnt.laz -drop_z_above 0.1 -step 0.5 -odix _chmgp ^-obil -cores 4
```

Se crea un CHM en el cual se contemple todos los primeros retornos por encima de 0.1 m con una resolución de 0.5 m (-step 0.5)

```
>>las2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -kill 1.5 -odix _chm00 -obil -cores 4
```

En este paso se crea el primer CHM contemplando todos los puntos de retorno, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 2 -kill 1.5 -odix _chm02 -obil -cores 4
```

Una vez creado el primer CHM se crea uno nuevo en el cual se contemplan los primeros retornos a una altura  $\leq 2$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 5 -kill 1.5 -odix _chm05 -obil -cores 4
```

En este CHM se contemplan los primeros retornos a una altura  $\leq 5$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 8 -kill 1.5 -odix _chm08 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 8$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 10 -kill 1.5 -odix _chm010 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 10$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 13 -kill 1.5 -odix _chm014 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 13$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 15 -kill 1.5 -odix _chm014 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 15$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 18 -kill 1.5 -odix _chm018 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 18$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>Blast2dem -i *gnt.laz -step 0.5 -drop_z_below 20 -kill 1.5 -odix _chm020 -obil -cores 4
```

Aquí se realiza un CHM con todos los primeros retornos a una altura  $\leq 14$  m, con una interpolación en todos los huecos hasta 1.5 m (-kill 1.5), y con una resolución de 0.5 m (-step 0.5).

```
>>lasgrid -i 568000_3486000gnt_chm*.bil -merged -step 0.5 -highest -false -elevation -set_min_max 0 20 -  
odix pitfree -opng -utm 11N
```

En este paso se realizó la unión “-merged” de cada uno de los CHM generados con las siguientes especificaciones, con una resolución de 0.5 (-step 0.5), manteniendo el punto más alto “-highest” y manteniendo valores de elevación “-elevation”, el archivo de salida puede ser de formato “.png, .xyz, .jpg, .tif” utilizando un falso color “-false” y creando un archivo KML asignando la zona UTM 11N.

## Anexo C

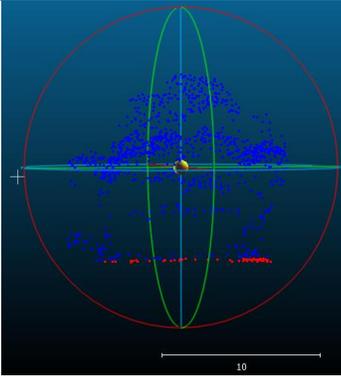
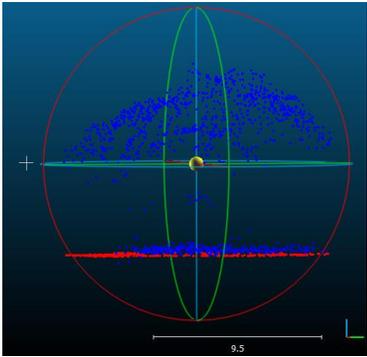
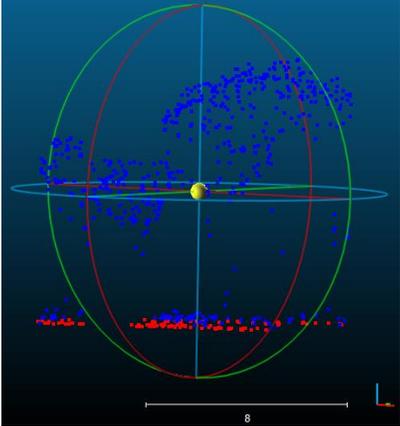
Extracción de métricas forestales a partir de la herramienta *Lascanopy* de *LASTools*:

```
>>lascanopy -i gnun.laz -max -lop arboles.shp
```

La herramienta puede calcular simultáneamente diversas métricas, en este caso se quiere conocer solo las alturas máximas para validarlas con lo que se midió en campo. Por ello en *lascanopy* se utilizó la herramienta a “-max”, para conocer las alturas máximas de individuos delimitados “-lop arboles.shp” en ArcGis a partir de los CHM previamente calculados.

En una de las visitas exploratorias al parche de vegetación más cercano al poblado (Zona A) se midieron con el hipsómetro la altura de un total de 12 árboles, los cuales se muestran a continuación junto a la nube de puntos correspondiente.

Tabla 5. Nube de puntos de árboles medidos en campo.

ID	Foto del árbol	Nube de Puntos
0		
1		
2		

**Tabla 6.** Nube de puntos de árboles medidos en campo.

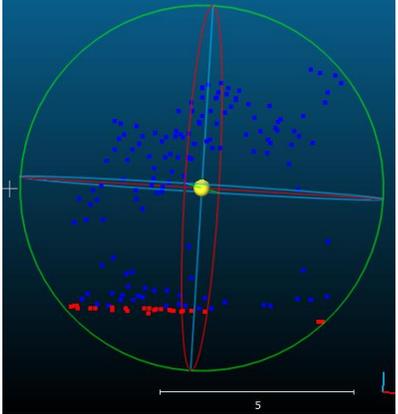
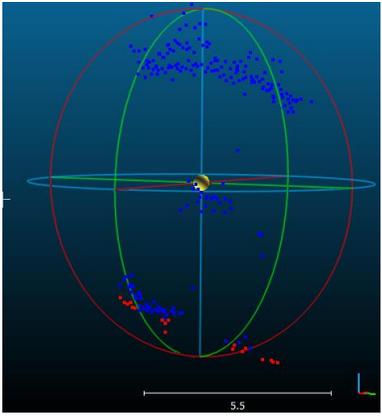
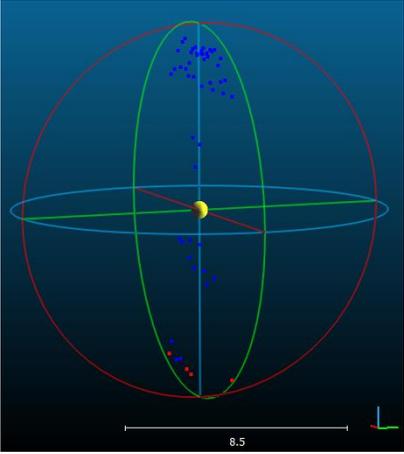
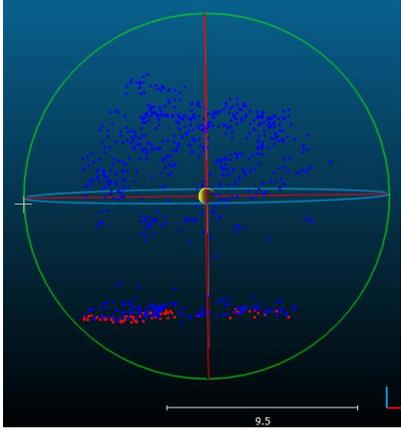
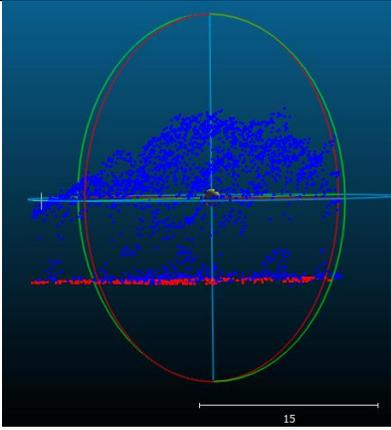
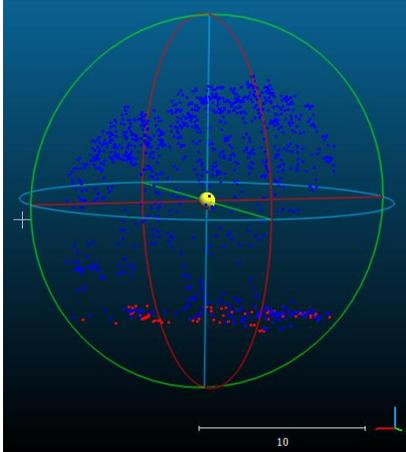
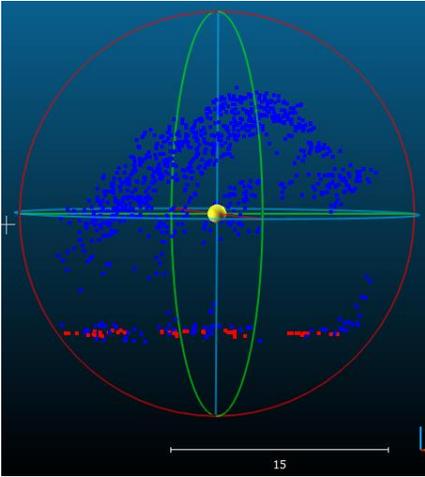
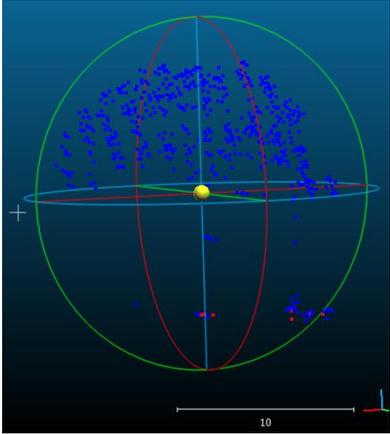
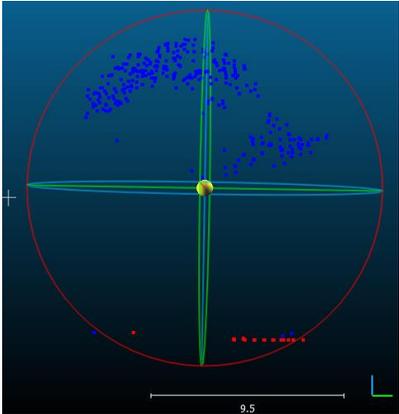
ID	Foto del árbol	Nube de Puntos
3		
4		
5		

Tabla 7. Nube de puntos de árboles medidos en campo.

ID	Foto del árbol	Nube de Puntos
6		
7		
8		

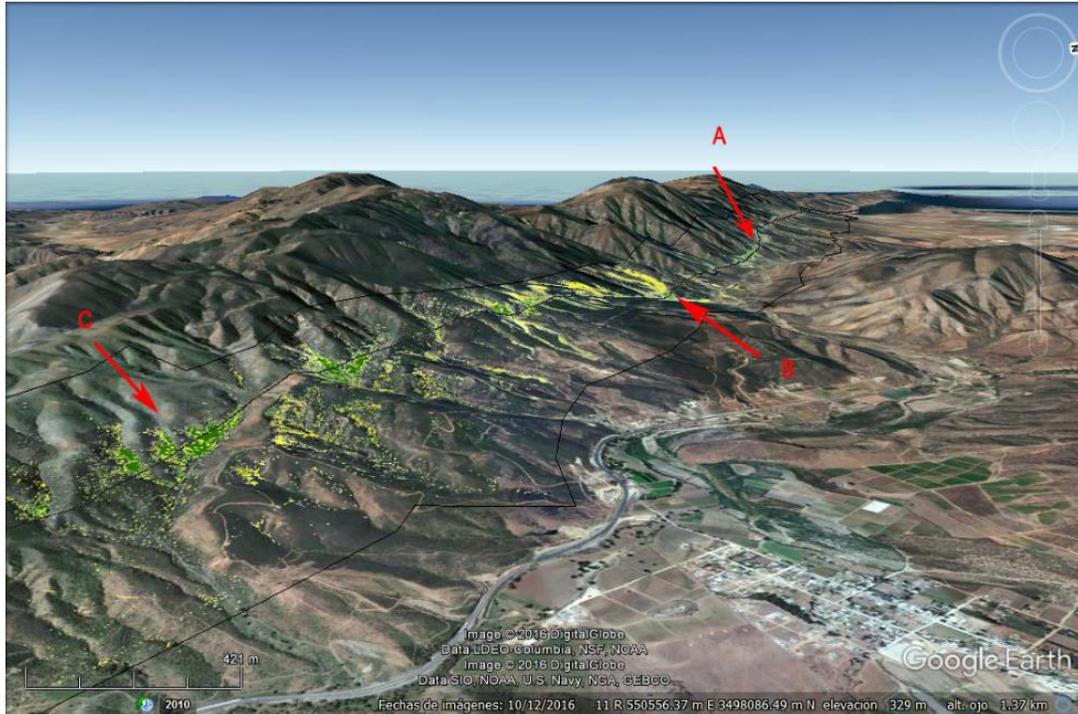
**Tabla 8.** Nube de puntos de árboles medidos en campo

ID	Foto del árbol	Nube de Puntos
9		
10		
11		

## Anexo D

En esta sección se presentan algunas imágenes de los parches de vegetación nativa anómala para cada uno de los segmentos establecidos.

### D.1 Segmento Norte



**Figura 26.** Vegetación con altura mayor a los 2 metros filtrada de los CHM generados a partir de LiDAR para la Península de Punta Banda, donde se observa claramente el alineamiento de la vegetación con la traza de la Falla donde se identificaron 2 parches de vegetación anómala (A y B).



**Figura 27.** Parche de vegetación anómala identificado a partir de los productos derivados por LiDAR y fotogrametría por dron, ubicado en Las Ánimas (Península de Punta Banda) donde se observa como la vegetación anómala se caracteriza por la altura sobresaliente y el tipo de vegetación encontrado en campo.

## D.2 Segmento Centro

Esta sección está ubicada a lo largo del Valle Santo Tomás donde de acuerdo al Modelo CHM hay pocas zonas con altura anómala ya que, como se puede observar en la imagen inferior, es zona agrícola en la mayoría del área.



**Figura 28.** Zonas de vegetación identificadas con una altura mayor a los 2 metros a partir de los modelos CHM, en esta sección la ladera que domina es la exposición hacia el Sur, donde se puede observar la escasez de vegetación de la altura establecida, y la que existe esta sobre o paralela a la falla.

### D.3 Segmento Sur

Esta sección corresponde al Valle de Agua Blanca donde se tiene identificadas 4 zonas (L3, L4, D y E) presentadas a continuación.



**Figura 29.** Visualización de la sección Sur ubicada a lo largo del Valle Agua Blanca, en la cual se puede observar que escasea la presencia de vegetación y la existente es de poca altura, es decir, no mayor al umbral establecido en el filtrado del CHM por lo que solo se puede observar claramente 2 zonas ubicadas sobre la traza de la falla.