

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



---

**Programa de Posgrado en  
Ciencias de la Tierra**

---

**Estimación de peligros geológicos en el libramiento  
Ensenada, (Baja California) apoyada con mediciones de  
resistividad eléctrica**

Tesis

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

Presenta:

**Esteban Arturo Tiznado Vázquez**

Ensenada, Baja California, México  
2016

Tesis defendida por

**Esteban Arturo Tiznado Vázquez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Luis Alberto Delgado Argote**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Marco Antonio Pérez Flores**  
Codirector de tesis

**Dra. Olga Sarychikhina**

**M.C. Vicente Ferreira Bartrina**



---

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

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Esteban Arturo Tiznado Vázquez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

**Estimación de peligros geológicos en el libramiento Ensenada, (Baja California) apoyada con mediciones de resistividad eléctrica**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Luis Alberto Delgado Argote  
Codirector de tesis

---

Dr. Marco Antonio Pérez Flores  
Codirector de tesis

Se realizó un análisis geológico estructural de tres cortes de talud a lo largo de 2 km del Libramiento Ensenada, en Ensenada, Baja California y un estudio geoelectrico en cada corte de talud antes y después de temporadas de lluvias para ver variaciones en la resistividad del suelo debida al agua filtrada a través de discontinuidades geológicas. En la zona aflora el basamento formado por rocas graníticas y una secuencia metamorfozada de rocas volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Santiago Peak del Jurásico-Cretácico. El basamento está cubierto discordantemente por depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico tardío. Tanto las rocas volcánicas de naturaleza ignimbrítica como las graníticas son rígidas y su deformación es similar. Hay buena correspondencia entre los lineamientos estructurales interpretados de modelos digitales de elevación e imágenes satelitales con las zonas de falla medidas en el campo, en donde la densidad de fracturas es notablemente mayor. Los sistemas conjugados de fracturas penetrativos son eficientes promotores de los deslizamientos y derrumbes si las pendientes son pronunciadas. Las zonas de cizalla con alta densidad de fracturas son zonas donde la permeabilidad secundaria se incrementa de forma importante, según muestran los rasgos verticales profundos de baja resistividad eléctrica. Se aplicaron los arreglos tetrapolares Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner para medir la resistividad y se modelaron e interpretaron de forma conjunta. La resistividad de la roca disminuye notablemente en zonas donde se incrementa el contenido de arcillas, como en las zonas de cizalla. La resistividad característica en rocas sanas es del orden de los 300 a 800  $\Omega$ -m, mientras que en las zonas de cizalla en temporada seca disminuye a 50-70  $\Omega$ -m. Después de los periodos de lluvia la resistividad en las mismas zonas cizalladas baja hasta 10-20  $\Omega$ -m. Los estudios mencionados sirvieron de referencia para hacer un mapa de peligro geológico que servirá de antecedente para caracterizar los cortes carreteros con tendencia a movimientos de masa rocosa.

**Palabras clave:** Libramiento, Ensenada, cizallas, fracturas, resistividad, pendiente, talud.

Abstract of the thesis presented by Esteban Arturo Tiznado Vázquez as a partial requirement to obtain the Master or Doctor of Science degree in Earth Science with orientation in Geology

**Estimation of geological hazards in Libramiento Ensenada, (Baja California) supported with measurements of electrical resistivity**

Abstract approved by:

---

Dr. Luis Alberto Delgado Argote  
Codirector de tesis

---

Dr. Marco Antonio Pérez Flores  
Codirector de tesis

A structural geological analysis and a geoelectric study were conducted in three cut slopes along 2 km on the Libramiento Ensenada, in Ensenada, Baja California. The studies were done before and after the rain seasons in order to appreciate variations on underground resistivity due to the water that filtered through geological discontinuities. The basement formed by granitoids and metamorphosed volcanic and volcanosedimentary rocks of the Jurassic-Cretaceous Santiago Peak Formation crops up along most part of the highway. It is partially covered by poorly consolidated sedimentary units of the late Cretaceous Rosario Formation. Deformation of the crystalline granitic and ignimbritic rocks is similar. A good correspondence exists between mapped fault zones and interpreted structural lineaments from digital elevation models and satellite imagery. Fracture density is considerably high in the fault zones and it is observed that penetrative conjugated fracture zones are prone for landslides and rock falls. As the geoelectric survey shows, the high density of fractures developed in the shear zones increase permeability. We use dipole-dipole, Schlumberger and Wenner arrays for resistivity measurements which were interpreted together to get a final model. It is observed that resistivity decreases significantly in sheared deformation zones where clay minerals content increases. The characteristic resistivity in bedrock is about 300 to 800  $\Omega$ -m, while the shear zones during the dry season yield 50-70  $\Omega$ -m values. After rain periods resistivity decrease to 10-20  $\Omega$ -m in the same sheared zones. This study is a useful reference to make a hazard map that characterizes highway cuts susceptible to rock mass movements.

**Keywords:** Libramiento, Ensenada, shear, fractures, resistivity, slope.

## **Dedicatoria**

**A mis padres, Hugo Tiznado Valdez y Gloria Vázquez de Tiznado por el apoyo y confianza que me brindaron en esta etapa.**

**A mis hermanos, Hugo y Edgar por estar al cuidado de mi formación profesional.**

## **Agradecimientos**

**Al Dr. Luis A. Delgado Argote por el voto de confianza que me brindó y a su contribución a mi formación tanto académica como de integridad profesional.**

**Al Dr. Marco Antonio Pérez Flores por todo el apoyo brindado en la tesis para la complementación geofísica de este proyecto.**

**A los miembros del comité: Dra. Olga Sarychikhina, M.C. Vicente Ferreira Bartrina y, en su momento, al M.C. Francisco Suárez Vidal (Q.E.P.D.) por todos los comentarios e interés mostrados en la realización de esta tesis.**

**Al personal técnico: Fernando Herrera, Jaime Calderón, Ricardo Carpio, Favio Cruz por su apoyo tanto en campo como en gabinete para el procesado de datos geoelectrónicos y a Ramón Mendoza por sus asesorías en geología estructural. También, un agradecimiento a Jessica Salas por su paciencia en la aportación de conocimientos en ArcGis.**

**A mis amigos de la vida y música: Emmanuel, Jonathan, Arturo, Jorge, Jesús, Casco, Bobby y Bárbara. A los amigos de CICESE: Jaime Cavazos, Rogelio Arce, José L. Barillas, Omar Marquez, Olaf Arroyo, Javier Avendaño, Valdemar Belmonte, Luis Tinajero, Gretel Nava, Claudia Garcia. A los hermanitos cósmicos; Xóchitl Torres, Karina Gomez, Diego Tamayo, Ángel Ojeda, Manuel Contreras. Estoy agradecido por su ayuda académica y por los gratos momentos que pasamos.**

**Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la**

**oportunidad de realizar esta maestría y el apoyo económico otorgado.**

# Tabla de contenido

	Página
<b>Resumen español</b> .....	ii
<b>Resumen inglés</b> .....	iii
<b>Dedicatorias</b> .....	iv
<b>Agradecimientos</b> .....	v
<b>Lista de figuras</b> .....	viii
<b>Lista de tablas</b> .....	xiv
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Localización y descripción de la zona de estudio.....	4
1.3 Marco teórico de referencia.....	4
1.3.1 Clasificación de los movimientos de ladera.....	7
1.3.2 Condiciones de ocurrencia.....	7
1.4 Marco geológico.....	12
1.5 Objetivos.....	17
<b>Capítulo 2. Metodología.</b>	18
2.1 Descripción de metodología.....	18
<b>Capítulo 3. Resultados</b>	25
3.1 Litología del área de estudio.....	25
3.2 Características de los cortes de talud analizados.....	28
3.3 Lineamientos.....	28
3.4 Cizallas en la zona de estudio de detalle.....	31
3.5 Fracturas en la zona de estudio de detalle.....	33
3.6 Interpretación de los perfiles de resistividad eléctrica.....	37
3.6.1 Modelo de resistividad de la Línea 1.....	37
3.6.2 Modelo de resistividad de la Línea 2.....	41
3.6.3 Modelo de resistividad de la Línea 3.....	45
3.7 Ejemplos de accidentes ocasionados por las lluvias de 2015-2016.....	50
<b>Capítulo 4. Discusión</b> .....	54
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	60
<b>Lista de referencias bibliográficas</b> .....	62

## Lista de figuras

Figura	Página	
1	Modelo digital de elevación de la zona comprendida entre Salsipuedes (S) y Ensenada (E). De la textura del mapa se puede interpretar la litología de la siguiente forma: Kgr es material granítico caracterizado por una textura suave al compararla con rocas volcánicas ignimbríticas (Kv), cuya textura es más áspera. Las rocas sedimentarias de la Formación Rosario $K_{RS}$ son rocas sedimentarias que se erosionan fácilmente y forman arroyos de corte profundo, mientras que las lavas (Tv) que le sobreyacen forman planicies suaves. La ciudad de Ensenada se asienta principalmente sobre sedimentos que también tienen una textura suave en la imagen. En amarillo está indicado el trazo del Libramiento Ensenada. Este libramiento principia de manera perpendicular a la carretera rumbo a San Antonio de las Minas (SAM).....	3
2	Libramiento Ensenada que aún está en construcción. Zona de estudio principia en Puente Petra y termina a 2 km SW por el mismo libramiento (Modificado de Google Earth, 2015).....	5
3	Puente Petra. (a) Vista hacia oeste del puente. (b) Vista hacia este del puente.....	5
4	Mapa geológico modificado de Gastil et al. (1975; versión digital de San Diego State University en Google Earth). Kgr son rocas graníticas y Kv son ignimbríticas, ambas unidades pertenecen a la Fm. Santiago Peak del Jurásico-Cretácico, $K_{RS}$ son rocas clásticas de la Fm. Rosario del Cretácico tardío, sobreyacidas por lavas miocénicas (Tv) y Qal y Qf representados los sedimentos del Cuaternario. Línea gruesa de color rojo es la zona de trabajo en el Libramiento Ensenada.....	6
5	Fotografía del corte de talud en rocas ignimbríticas de aproximadamente 20 m de altura y pendiente casi vertical. Presenta fracturamiento vertical intenso.....	6
6	Clasificación de los movimientos de ladera según el tipo de movimiento y la naturaleza del material desplazado (Varnes, 1978)...	8
7	Diagrama de los agentes externos e internos con respecto a la superficie terrestre que inducen y/o disparan el movimiento de masa (Modificado de Jaboyedoff y Derron, 2005).....	8
8	Representación esquemática de la caída y vuelco de bloques que son característicos de rocas rígidas fracturadas como las que predominan en el área de estudio (tomada de Costa y Baker,	

	1981).....	11
9	Diagrama de fuerzas que actúan sobre un bloque en reposo sobre un plano horizontal según Ragan (2009), donde $W$ es el peso del cuerpo, $N$ es fuerza normal que actúa en la dirección opuesta a la del peso del cuerpo, $F$ es la fuerza de empuje y $f$ es la fuerza opuesta resistiva.....	11
10	Diagrama de fuerzas que actúan sobre un bloque en reposo sobre un plano inclinado, donde $\alpha$ es el ángulo de inclinación del plano.....	11
11	Mapa geológico del NW de Baja California mostrando las principales unidades litológicas y rasgos estructurales (Gastil et al., 1975). Las fallas con orientación NW (San Miguel Vallecitos; SMV) son regionales de desplazamiento lateral derecho y las orientadas NNW cercanas al mar son, en buena medida, producidas por levantamiento regional. (Tomado de Delgado-Argote et al., 2012).....	14
12	Mapa de sismos registrados de 2000 al 2015 por la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM) del CICESE. Las magnitudes están en la escala de Richter. El tamaño y el color de los círculos dependen de la magnitud del sismo. En algunas fallas activas se observa alineamiento de epicentros en dirección NW-SE. Todas las fallas están influenciadas por el sistema San Andrés-Golfo de California: San Miguel (SM) y Vallecitos (V). Otras fallas importantes son: San Diego (SD), San Clemente (SC), Tres Hermanos (TH) y Agua Blanca (AB). La nomenclatura se tomó de Cruz-Castillo (2002).	16
13	Arreglo de electrodos con geometría dipolo-dipolo, donde los electrodos de inducción de corriente A y B están separados una distancia $a$ en pares, equivalente a 10 m en los experimentos de este estudio. Una distancia $na$ separa A-B de los electrodos de medición de potencial M-N, los cuales también tienen una separación $a$ . .....	21
14	Arreglo tetraelectrónico Schlumberger en donde la separación de los electrodos de corriente A y B se ubican a una distancia $2L$ de M y N que representan los electrodos de medición de potencial M y N, los cuales tienen una separación $a$ . El valor de $a$ es de 10 m y el de $L$ de 20 para este estudio. ....	21
15	En el arreglo tetraelectrónico Wenner, los cuatro electrodos tienen una separación uniforme de 10 m para nuestro estudio. Las letras A, B, M y N tienen el mismo significado que en la Figura 14.....	21
16	(a) Resistivímetro Supersting R1/IP marca AGI. (b) cable con sensor inteligente activos.....	24

- 17 Mapa litológico de la zona donde se desarrolla el Libramiento Ensenada elaborado a partir de los mapas geológicos de Gastil et al. (1975) e INEGI (CETENAL, 1976), y el Modelo Digital de Elevación LiDAR. El trazo del libramiento se indica con una línea discontinua roja, salvo el tramo estudiado que se indica con doble franja amarilla. Las abreviaturas de periodo geológico son: Q= Cuaternario, K= Cretácico. Las abreviaturas de las unidades litológicas son: Qal= Aluvión, Qm= sedimentos marinos, Qf= sedimentos fluviales, KR<sub>S</sub>= sedimentos clásticos de la Formación Rosario, Kgr= rocas graníticas de finales del Cretácico temprano, Kv= Rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Santiago Peak del Jurásico-Cretácico temprano..... 26
- 18 Estratificación de depósitos ignimbríticos en la parte suroeste de la zona de estudio. Estas unidades buzcan hacia el SW en esta vista con orientación hacia el NE..... 27
- 19 Lineamientos estructurales asociados a la deformación sobrepuestos en un modelo digital de elevación LiDAR. Los diagramas de rosa A, B, C y D corresponden a los cuadrantes con la misma denominación. Es notable la tendencia dominante NW sobre los rasgos NE. En el diagrama E están incluidos todos los lineamientos de la zona. Los pétalos tienen una abertura de 5°, y el número de datos se indica en las curvas paralelas al semicírculo, cuyo valor máximo es de 14 en los diagramas B y C, y 7 en A y D. La línea amarilla indica el tramo de carretera estudiado con detalle y n debajo de los diagramas significa el número de datos..... 27
- 20 Mapa de ubicación de los sitios donde se midieron cizallas en los cortes de talud del Libramiento Ensenada. Cada uno está indicado con una letra que va de la a-i. El sitio contiene un estereograma que en línea negra representan el rumbo y echado de las cizallas medidas y con un punto rojo, la orientación de la estría; el punto negro es el polo del plano de cizalla. Con una línea roja se indica el promedio geométrico general de cizallas del sitio. En la descripción de cada sitio se indica con la letra n el número de datos. Además, se muestra el tipo de movimiento general de las cizallas, el valor de rumbo y echado promedio y la litología a la que pertenece el sitio. El estereograma k contiene los polos de todos los planos de cizalla de la zona de estudio..... 30
- 21 Mapa de ubicación de los sitios donde se midieron fracturas en los cortes de talud del Libramiento Ensenada. Cada uno está indicado con una letra que va de la l a u. El sitio contiene un estereograma donde punto negro representa el polo del plano de fractura. Con una línea roja se indica el promedio geométrico de fracturas general del sitio. En la descripción de cada sitio se indica con la letra n el número de datos, además, el valor de rumbo y echado promedio y la litología a la que pertenece el sitio. El estereograma v contiene los polos de todos los planos de fractura de la zona de estudio..... 35

- 22 Ubicación de las tres líneas de levantamiento geoelectrico. La línea amarilla representa los 2 km de carretera del Libramiento Ensenada estudiados en este trabajo de tesis. En color azul se ubican las líneas en cortes de talud de composición ignimbrítica y en rojo las de composición granítica..... 36
- 23 Modelo de resistividad de la Línea 1 efectuada en un corte de talud en ignimbritas. Estas mediciones se hicieron antes de las lluvias, en septiembre de 2014. El perfil tiene 450 m con traslape en  $x= 180$ , para cubrir los 500 m de longitud del corte y no perder información en la parte media. Se utilizó un factor de suavizamiento (Beta) de los datos graficados de 0.001. En la escala de colores el rojo corresponde a baja resistividad y el morado valores altos. Los polígonos blancos muestran zonas donde no hubo registro de datos porque un sensor de los veintiocho electrodos no funcionó con propiedad y es zona de información espuria. (a) Modelo sin exageración vertical. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Beta es un coeficiente numérico usado en las ecuaciones de ajuste de las isolíneas de resistividad que sirve para aumentar o disminuir la resolución de la estructura geoelectrica del modelo resultante..... 39
- 24 Modelo de resistividad de la Línea 1 efectuada después de la temporada de lluvias, en junio 2015. (a) Modelo sin exageración vertical. La línea negra representa un lineamiento estructural que puede estar asociado con falla o fractura y corta el corte de talud con orientación NW-SE, interpretado en el MDE. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. La línea negra representa lo mismo que en (a). Nótese que ya no existen los polígonos blancos de la figura anterior en vista de que todos los sensores trabajaron correctamente. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23..... 40
- 25 Modelo de resistividad de la Línea 2 efectuada en la porción de rocas graníticas en septiembre de 2014 antes de las lluvias. En la parte central del perfil se encuentra una zona de relleno en un arroyo en donde se construyó una alcantarilla. Dicha zona coincide con el alto resistivo. Hacia la izquierda, en  $x=185$  el bajo resistivo vertical de  $1 \Omega\text{-m}$  coincide con la proyección de un lineamiento estructural, indicada con línea negra en (a) y (b), por lo que se infiere que corresponde a una zona de cizalla. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23..... 43

- 26 Modelo de resistividad de la Línea 2 efectuada en la porción de rocas graníticas después de las lluvias, en enero de 2015. Como en la Figura 25, se observa la zona de relleno en la parte central del perfil que corresponde a un alto resistivo y hacia la izquierda, el bajo resistivo vertical de  $1 \Omega\text{-m}$  que posiblemente se asocia a una zona de cizalla presenta hacia sus costados rasgos que pueden corresponder a fracturas menos penetrativas. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23..... 44
- 27 Modelo de resistividad de la Línea 3 efectuado en septiembre de 2014 antes de la temporada de lluvias. (a) Modelo sin exageración vertical. Líneas negras muestran fracturas penetrativas importantes en esa área del perfil y la línea amarilla representa pseudoestratificación. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Los polígonos blancos muestran zonas donde no hubo registro de datos porque un sensor de los veintiocho electrodos no funcionó con propiedad y es una zona de información espuria. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23..... 46
- 28 Corte carretero en derrames ignimbríticos pseudoestratificados con buzamiento hacia el SW, en la porción NE de la Línea 3. Las fracturas verticales son abundantes y penetrativas, así como algunos planos de cizalla casi verticales marcados con líneas en negro (a) y de bajo ángulo, debido a deformación por compresión marcado con línea roja. Otro ángulo del afloramiento se presenta en (b), indicando con línea discontinua la estratificación aparente de los derrames ignimbríticos..... 46
- 29 Perfil de resistividad de la Línea 3 después de la temporada de lluvias, junio 2015, en un talud de composición ignimbrítica. La longitud del perfil es de 270 m. (a) Modelo sin exageración vertical. Las líneas negras y amarillo representan lo mismo que en Figura III.12. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Nótese que ya no existen los polígonos blancos de la figura anterior en vista de que todos los sensores trabajaron correctamente. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23..... 47
- 30 Mosaico de 24 fotografías del corte carretero de 500 m correspondiente a la línea geoelectrica 1 en cuerpos de rocas ignimbríticas. En la parte inferior se presenta el modelo de resistividad correspondiente, después de las lluvias. Las letras indican zonas con anomalías que se interpretan en términos estructurales y que correlacionan con los rasgos de los afloramientos (ver texto)..... 48
- 31 Derrumbes de fragmentos en ignimbritas en dos cortes del km 13 durante las lluvias del 9 de enero de 2016. Se observa un flujo de

- detritos más fino en a), el cual está controlado por fracturas dominantes verticales indicadas con las flechas y a la densidad muy alta de fracturas entre las estructuras principales. Además, los planos de estratificación se dirigen hacia la izquierda y hacia el corte del talud. En b) el flujo de detritos es más grueso y los fragmentos están menos intemperizados que en a). La flecha amarilla en la fotografía b) indica el puente sobre el arroyo Doña Petra..... 51
- 32 Derrumbe ocurrido en el corte carretero del km 15, a 400 m del puente del arroyo Doña Petra, este evento ocurrió a 140 m al NE de la línea 2 de resistividad. a) Caída de bloques en talud granítico antes de las lluvias, en enero de 2015. b) El mismo corte el 9 de enero de 2016 después de las lluvias. La flecha amarilla muestra el mismo punto en el afloramiento..... 51
- 33 a) Ubicación del deslizamiento ocurrido el 2 de marzo de 2015, indicado por el punto rojo, a aproximadamente 3 km de la zona de estudio. b) El bloque más grande mide 7x3x2 m, pesa aproximadamente 100 ton que al impactar en la carpeta asfáltica produjo un plano de desplazamiento con lateral derecho y pliegues en el costado de la carpeta. c) El plano inclinado de deslizamiento se indica con la flecha roja y una de las paredes verticales del bloque con la flecha amarilla. d) Modelo de deslizamiento de bloque por corte de fracturas conjugadas, indicando con flechas rojas el vector de deslizamiento..... 53
- 34 Síntesis litológica, estructural y geoelectrica. (a) Análisis de fracturas mostrando la correlación observada con los sectores correspondientes a la líneas geoelectricas 1, 2 y 3 (b, c y d, respectivamente). Se observa que dicha correlación es buena entre las zonas de fractura y las zonas donde los valores de resistividad disminuyen, lo que facilita la visualización del peligro a lo largo de este sector de la carretera. El concepto de peligro está íntimamente ligado con el esquema de evolución de sistemas cizallados de Faulkner et al. (2003) mostrado en e) en el que se muestran cizallas verticales relacionadas con una zona de falla lateral izquierda y fracturas en arreglo ortogonal indicadas en líneas más suaves..... 55
- 35 Mapa de peligro geológico de movimiento de masa a lo largo de 2 km en el Libramiento Ensenada (línea azul). La línea negra punteada indica los sectores a lo largo de la carretera donde se realizaron los estudios de la resistividad geoelectrica. Dichos sectores representan el 54% del tramo estudiado. Kv1 y Kv2 se encuentran en ignimbritas mientras que Kgr está en granitoides..... 58

## Lista de tablas

Tabla	Página
1 Matriz multicriterio para determinar la peligrosidad en el mapa de peligro de la Figura 35. Se nombró a cada corte de talud analizado de la siguiente forma: Kv1 y Kv2 son de composición ignimbrítica; Kgr es de composición granítica. La descripción de los criterios utilizados para asignar valores está en el texto. El 0 representa el valor más bajo de peligro y el 3 el más alto que posteriormente se utilizan en ArcMap de ArcGis 10.3 de ESRI.....	56

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Descripción del problema.

Los fenómenos naturales modifican el relieve terrestre tendiendo a suavizarlo para estabilizarlo lentamente. Un relieve pronunciado o abrupto normalmente sugiere que la zona es inestable o ha sido modificada por un accidente repentino, como el producido por una falla. El hombre, durante el desarrollo de ciudades y vías de comunicación también altera el paisaje de forma repentina, alterando de diferentes formas la estabilidad natural. La ocupación humana de terrenos desestabilizados ha de definir la vulnerabilidad de una zona dada.

En el caso de las carreteras, la afectación del movimiento de masa ocasiona daños materiales y, eventualmente, puede involucrar vidas humanas.

Los movimientos de masa ocurren principalmente donde los cortes carreteros tienen pendientes abruptas y la estabilidad de un talud dependerá, tanto del tipo de litología en donde se efectúa el corte, como de sus estructuras primarias o de deformación. Las estructuras primarias como la estratificación o las fracturas de enfriamiento en rocas ígneas, así como los rasgos estructurales por deformación, como las fallas y fracturas asociadas, o los pliegues, entre otros, juegan un papel importante en la definición de estabilidad de una ladera o talud. Por ejemplo, la probabilidad de que ocurra un deslizamiento de masa en una secuencia litológica estratificada será mayor si las capas buzcan hacia la zona de corte. Por el contrario, si las capas buzcan en sentido contrario, el talud normalmente se considera estable. Otras condiciones que pueden promover la inestabilidad de un talud pueden asociarse a un ambiente intensamente fracturado que promovería la caída de bloques y detritos. Dichos ambientes fracturados con frecuencia se asocian con zonas de cizalla. Es importante recordar que la energía potencial de la masa rocosa dependerá de la profundidad del corte de la carretera.

La morfología que limita al oriente de Ensenada es irregular. Basando en el modelo digital de elevación de la región que se muestra en la Figura 1 y el conocimiento de la

geología de la zona (Gastil, 1975) se puede afirmar que la composición litológica se asocia, tanto con relieves, como con la textura del terreno. El Libramiento Ensenada que se muestra en la Figura 1 corresponde al sector con terminado de carpeta asfáltica. Se observa que ese sector se desarrolla casi en su totalidad en un bloque levantado que corresponde casi completamente a rocas volcánicas ignimbríticas y, en su extremo oriental, se desarrolla sobre rocas graníticas.

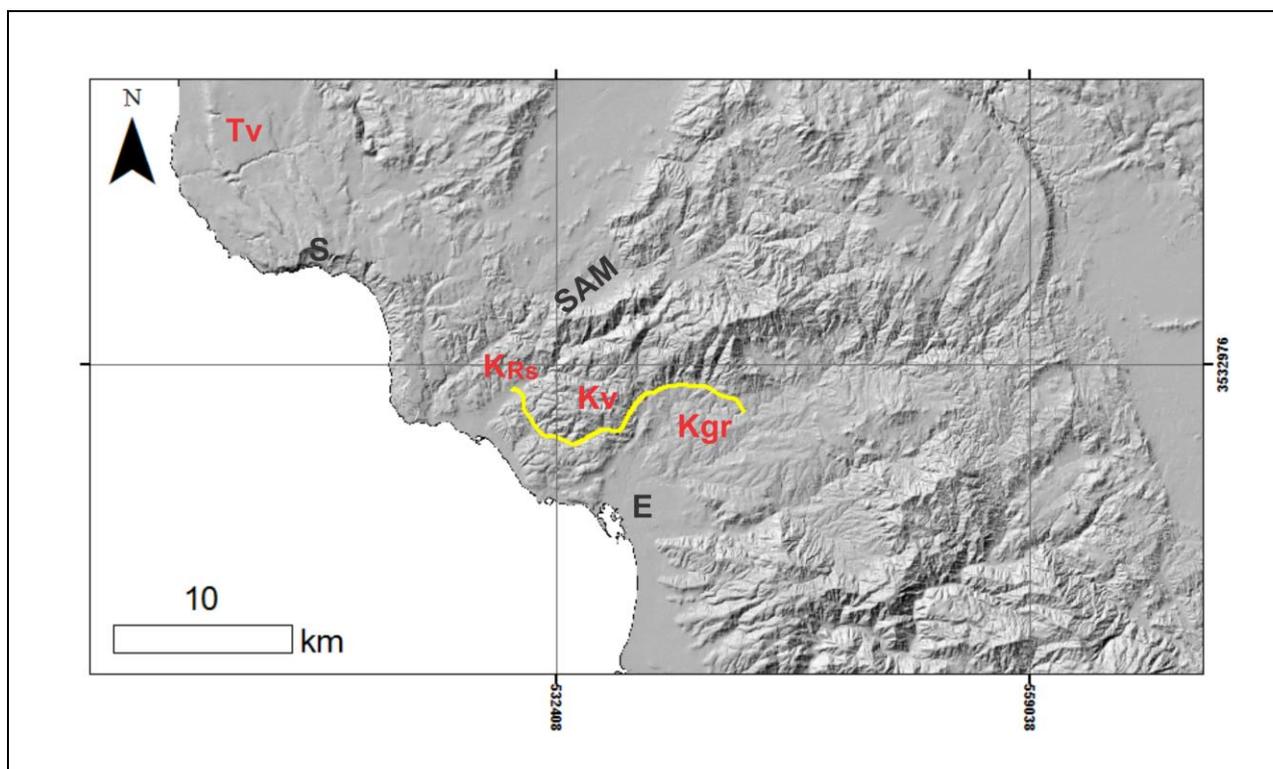


Figura 1. Modelo digital de elevación de la zona comprendida entre Salsipuedes (S) y Ensenada (E). De la textura del mapa se puede interpretar la litología de la siguiente forma: Kgr es material granítico caracterizado por una textura suave al compararla con rocas volcánicas ignimbríticas (Kv), cuya textura es más áspera. Las rocas sedimentarias de la Formación Rosario  $K_{Rs}$  son rocas sedimentarias que se erosionan fácilmente y forman arroyos de corte profundo, mientras que las lavas (Tv) que le sobreyacen forman planicies suaves. La ciudad de Ensenada se asienta principalmente sobre sedimentos que también tienen una textura suave en la imagen. En amarillo está indicado el trazo del Libramiento Ensenada. Este libramiento principia de manera perpendicular a la carretera rumbo a San Antonio de las Minas (SAM).

## 1.2 Localización y descripción de la zona de estudio.

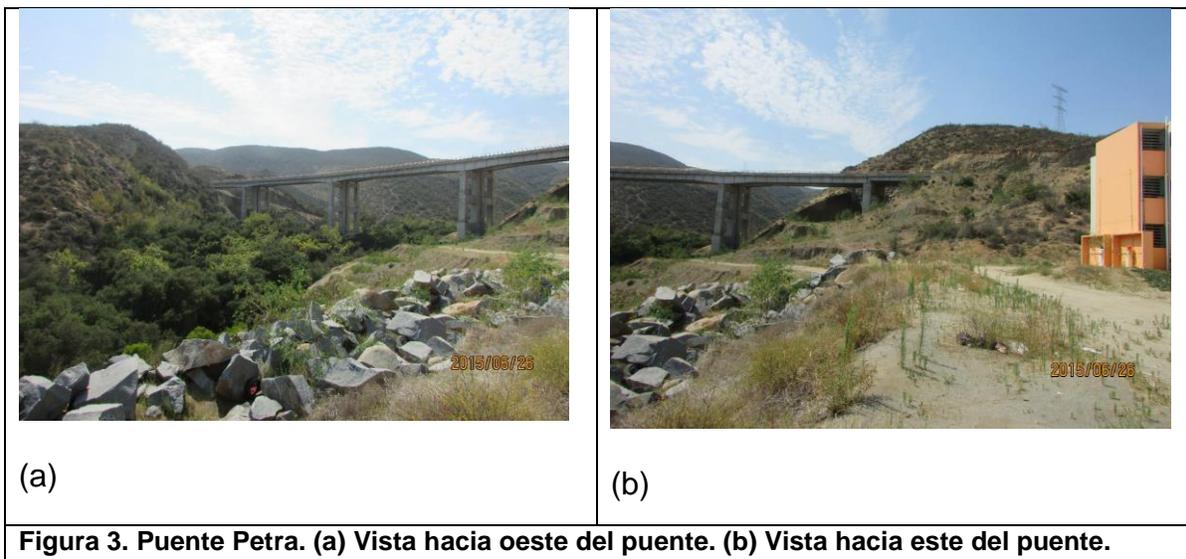
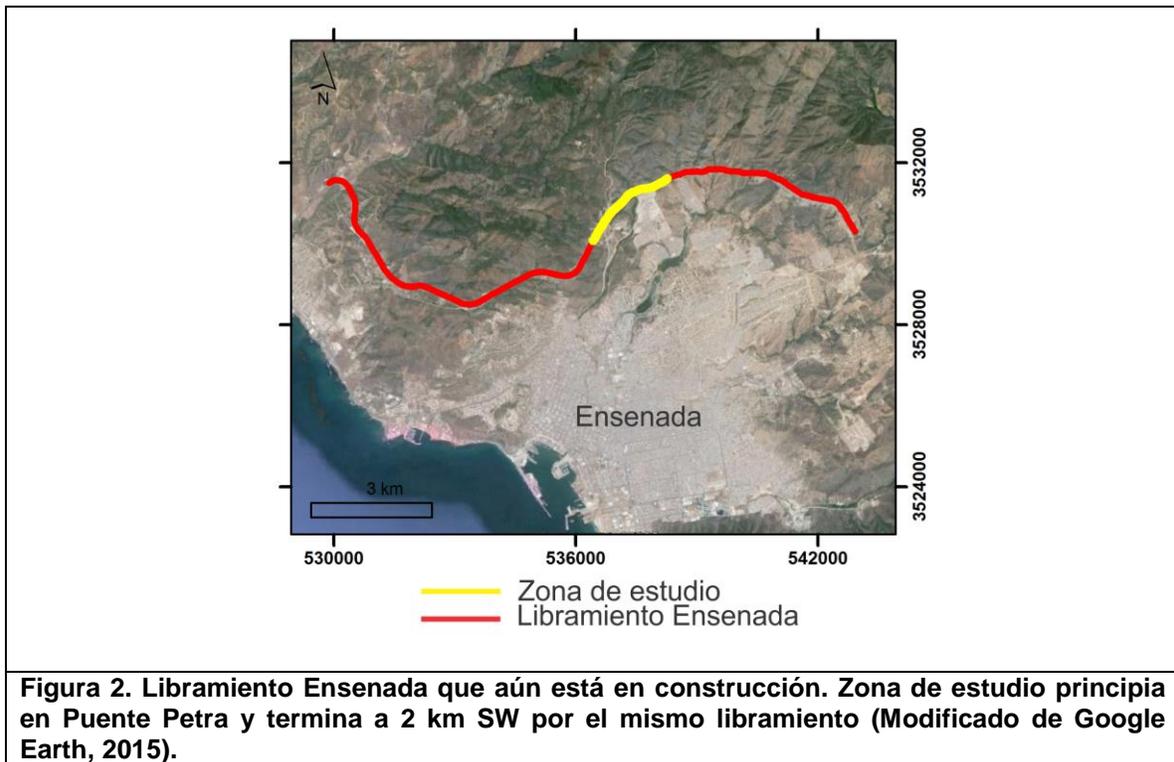
En la imagen satelital de Google Earth de la Figura 2 se presenta el trazo del Libramiento Ensenada en donde se han efectuado cortes de talud hasta finales de 2015. El libramiento principia en la carretera hacia San Antonio de las Minas (SAM). El entronque se encuentra en el km 9 y tiene un avance aproximado de 24 km. Las coordenadas de inicio y terminación del trazo del Libramiento Ensenada son  $X = 530151.22/ Y = 3531818.20$  y  $X = 536800.96/ Y = 3530658.68$ , respectivamente. El propósito de esta vialidad es facilitar el transporte y comunicación, evitando cruzar por la ciudad de Ensenada cuando se viaja hacia el norte o sur del Estado.

El tramo que se estudió inicia a 280 m al este del puente del arroyo Doña Petra (Figura 3) y se extiende 2 km al SW (Figura 2).

Se tomó un fragmento del mapa geológico de Gastil et al. (1975) como base para este estudio (Figura 4). Entre los rasgos geológicos más importantes, destaca una falla lateral izquierda orientada hacia el NNE que se encuentra cerca del puente del arroyo Doña Petra. En el mismo mapa de la Figura 4 las rocas volcánicas ignimbríticas indicadas en verde como Kv corresponden a unidades equivalentes a la Formación Santiago Peak de edad Jurásico tardío-Cretácico temprano, la cual está basculada hacia el SW. En el mismo mapa, al NE de la zona de tesis, afloran granitoides de edad Jurásico-Cretácico. Las pendientes naturales en algunos sitios supera los  $30^\circ$  y los cortes carreteros pueden ser casi verticales (Figura 5).

## 1.3 Marco teórico de referencia

Los accidentes que pueden ocurrir a lo largo del Libramiento Ensenada en el sector estudiado quedan comprendidos en los llamados movimientos de ladera. Estos se definen como desplazamientos de masas de roca y/o suelo en los cuales el centro de gravedad del material removido avanza hacia abajo y hacia fuera con respecto al talud (Terzagui, 1960; Lundgren, 1986; en Aragón Arreola, 1994). Los materiales desplazados son superficiales o se ubican cerca de la superficie, incluso bajo la superficie del mar.



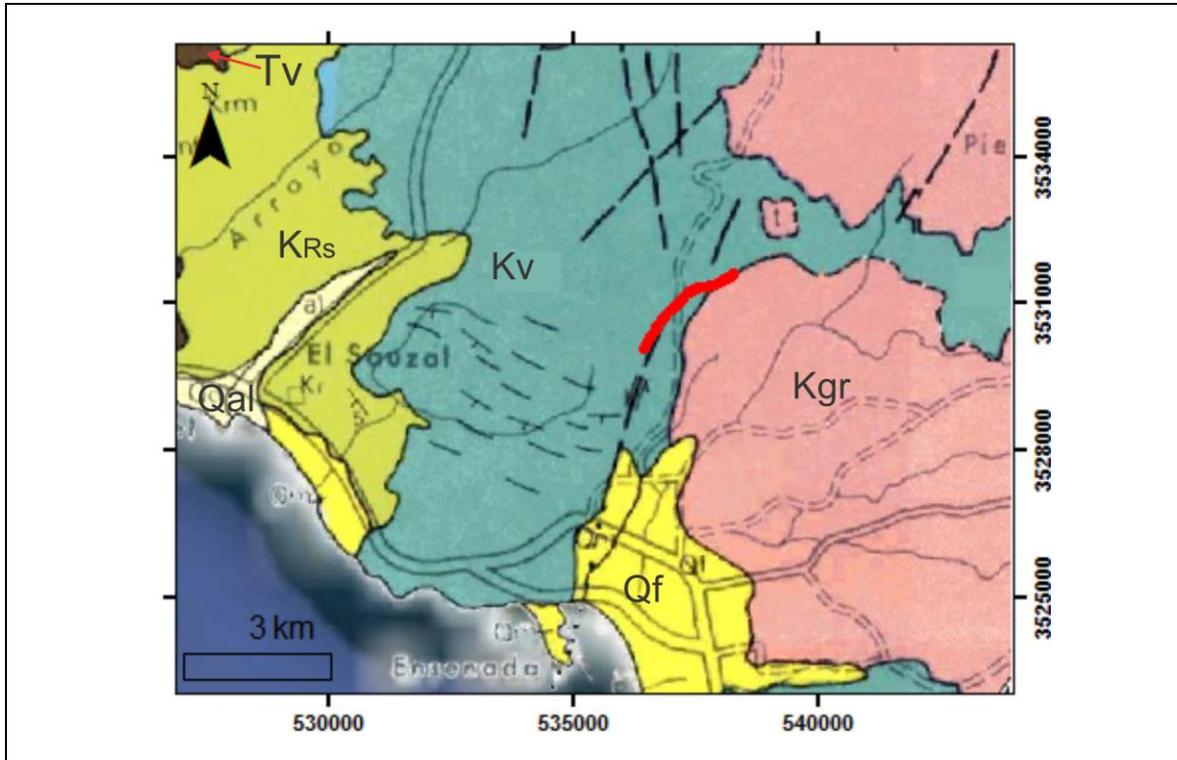


Figura 4. Mapa geológico modificado de Gastil et al. (1975; versión digital de San Diego State University en Google Earth). Kgr son rocas graníticas y Kv son ignimbríticas, ambas unidades pertenecen a la Fm. Santiago Peak del Jurásico-Cretácico, KR<sub>s</sub> son rocas clásticas de la Fm. Rosario del Cretácico tardío, sobreyacidas por lavas miocénicas (Tv) y Qal y Qf representados los sedimentos del Cuaternario. Línea gruesa de color rojo es la zona de trabajo en el Libramiento Ensenada.



Figura 5. Fotografía del corte de talud en rocas ignimbríticas de aproximadamente 20 m de altura y pendiente casi vertical. Presenta fracturamiento vertical intenso.

### **1.3.1 Clasificación de los movimientos de ladera**

En la compilación efectuada por Aragón-Arreola (1994), se cita que de acuerdo con Lundgren (1986), los movimientos de ladera se pueden clasificar siguiendo las siguientes descripciones: a) material que los constituye; b) forma y localización de la ruptura o la superficie de corrimiento; c) desplazamiento o distancia de viaje. Varnes (1978) propone la clasificación de movimientos ordenándolos de acuerdo al tipo de movimiento y la naturaleza del material desplazado (Figura 6). En el presente trabajo se adopta esta clasificación descriptiva.

En la zona de estudio, el movimiento de ladera que se ha observado con mayor frecuencia es el de caída de rocas y, las estructuras principales a las que se asocian los movimientos, que son fracturas y fallas. Además, se han tomado en cuenta las pendientes abruptas del corte de talud, así como el buzamiento de la estratificación de las rocas que están a favor de dichos cortes en algunas áreas de la zona de tesis.

### **1.3.2 Condiciones de ocurrencia.**

Considerando condiciones estáticas, la ocurrencia de movimientos de ladera requiere la conjunción de una serie de factores tales como pendientes del terreno diferentes de cero (p. ej, en Tijuana, en rocas sedimentarias con presencia de fracturas verticales, es típicamente superior a  $15^\circ$ ; (Delgado-Argote et al., 1996)), la componente gravitacional que genera una fuerza tangencial o de cizalla que permite que se realice trabajo durante el deslizamiento y, en ocasiones, una fuerza lateral, como la aceleración producida por un sismo (Bolt et al. (1977), en Aragón Arreola, 1994). En la Figura 7, de manera esquemática, se muestran los principales agentes promotores de movimientos de masa, los cuales se pueden dividir entre los que provienen arriba y debajo de la superficie del terreno. El agente principal externo es el agua que influye, tanto en la lubricación de estructuras primarias o secundarias, como en

TIPO DE MOVIMIENTO			TIPO DE MATERIAL		
			EN ROCA	EN EL SUELO INGENIERIL	
			Predominan materiales gruesos	Predominan materiales gruesos	
CAÍDAS			Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de suelos
DESCALCE (TOPPLES)			Descalce de rocas	Descalce de detritos	Descalce de suelos
DESPLAZAMIENTOS	Rotacional	Pocas unidades	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional en suelo
	Traslacional		Deslizamiento traslacional de bloques de roca	Deslizamiento traslacional de bloques de detritos	Deslizamiento traslacional de bloques de suelos
		Muchas unidades	Deslizamiento traslacional en roca	Deslizamiento traslacional en detritos	Deslizamiento traslacional en suelo
APERTURA LATERAL			Separación de rocas	Separación de detritos	Separación de suelos
FLUENCIAS			Fluencia en roca (creep profundo)	Flujo de detritos	Fluencia de suelos (creep en suelos)

Figura 6. Clasificación de los movimientos de ladera según el tipo de movimiento y la naturaleza del material desplazado (Varnes, 1978).

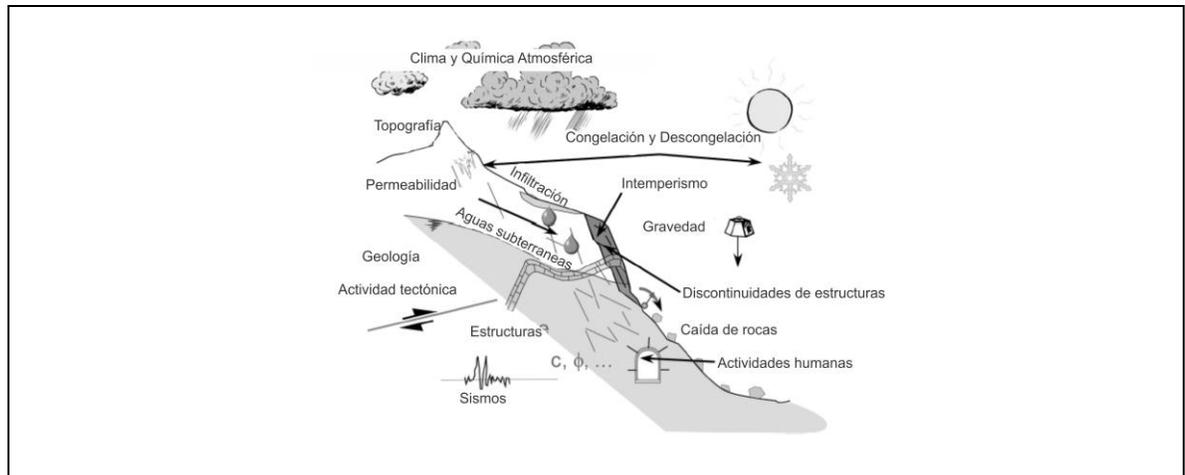


Figura 7. Diagrama de los agentes externos e internos con respecto a la superficie terrestre que inducen y/o disparan el movimiento de masa (Modificado de Jaboyedoff y Derron, 2005).

la alteración y destrucción de minerales por intemperismo. El intemperismo promueve la alteración química de feldespatos y otros silicatos ricos en aluminio, incluyendo la matriz de rocas volcánicas (Deer et al., 1993) dando lugar a la formación de arcillas. Por sus dimensiones pequeñas (límite superior de 4 micras), las arcillas migran y se precipitan en discontinuidades estructurales. Las arcillas, en un plano inclinado, como puede ser el echado de una fractura, actúan como lubricante para que un cuerpo rocoso comience a deslizarse. Estos agentes pueden inducir o disparar los movimientos de masa sólo en condiciones de presencia de rasgos como lo son los propios del tipo de roca (estratos en las rocas sedimentarias y volcánicas) y fracturas, tanto primarias como asociadas con deformación. En la misma Figura 7 se incluye la modificación del medio por actividades humanas, así como elementos dinámicos como las fallas activas y los sismos.

En consecuencia, en condiciones de ocurrencia tenemos caídas de cuerpos y movimientos que involucran material rocoso consolidado. Los vectores de desplazamiento en distintas partes de la masa son iguales o siguen un arreglo geométrico sencillo determinado por los planos de fractura (Figura 8) o de estratificación. En el caso de deslizamientos constituidos por fragmentos de roca con una proporción alta de matriz, los cuales se comportan como avalanchas de detritos, el material rocoso se moviliza debido a un proceso de fluidización (Melosh, 1987).

Resumiendo, entre algunos elementos que de forma combinada o independiente influyen en la inestabilidad de un terreno, debemos considerar:

- a. Tipo de roca y tipo de estructuras dominantes.
- b. Incremento en el contenido de agua en la masa rocosa que pueda incrementar la presión de poro. Las modificaciones en los niveles freáticos pueden influenciar en el comportamiento mecánico de las rocas.
- c. Sismicidad.
- d. Modificación de la resistencia al esfuerzo cortante en posibles planos de corrimiento por modificaciones de la topografía y aumentar las pendientes en laderas y por lo tanto el gradiente.
- e. Excavaciones para edificaciones y otras obras civiles que produzcan exceso de carga en el talud o remoción de material en la base del talud.
- f. Vibraciones producidas por el tráfico de vehículos pesados.
- g. Cambios en la vegetación que acelere la erosión.

Los elementos a-c son naturales y requieren de estudios geológicos y geofísicos, mientras que los elementos d-g son antrópicos y deben apoyarse en los estudios mencionados.

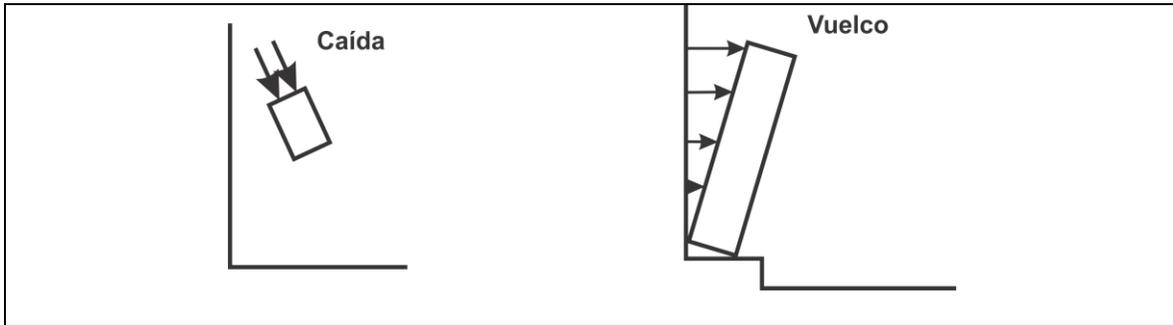


Figura 8. Representación esquemática de la caída y vuelco de bloques que son característicos de rocas rígidas fracturadas como las que predominan en el área de estudio (tomada de Costa y Baker, 1981).

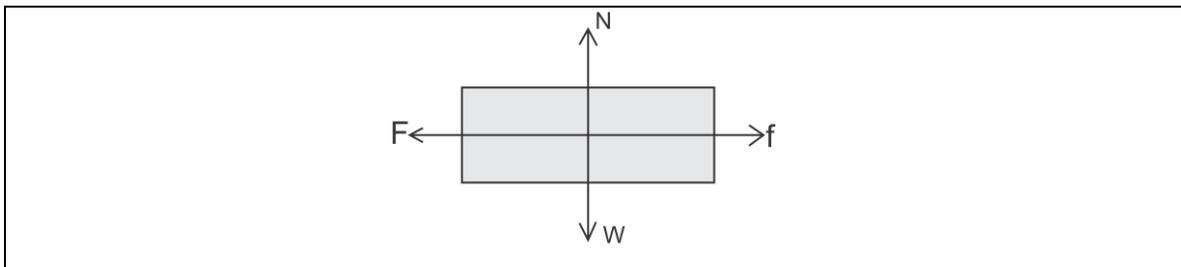


Figura 9. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un bloque en reposo sobre un plano horizontal según Ragan (2009), donde  $W$  es el peso del cuerpo,  $N$  es fuerza normal que actúa en la dirección opuesta a la del peso del cuerpo,  $F$  es la fuerza de empuje y  $f$  es la fuerza opuesta resistiva.

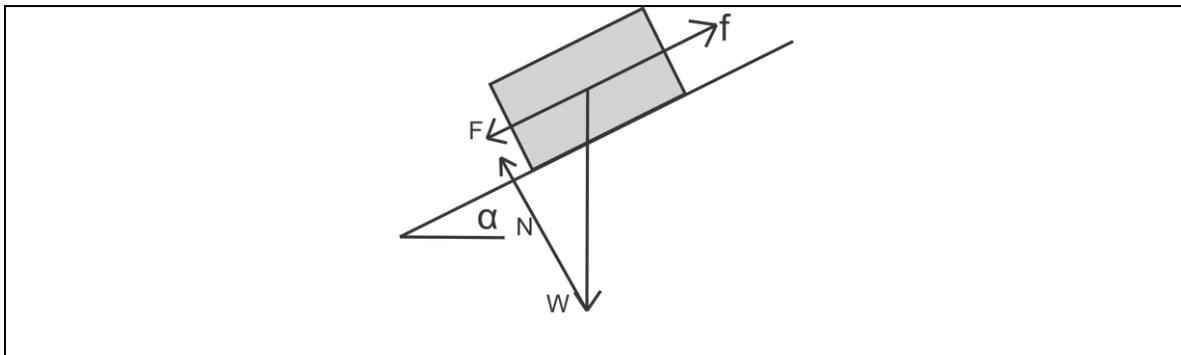


Figura 10. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un bloque en reposo sobre un plano inclinado, donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del plano.

Debido a que los fenómenos más comunes que se observan en los cortes carreteros del Libramiento Ensenada son los movimientos de bloques de diferentes dimensiones, es importante partir de las consideraciones básicas presentadas por Ragan (2009). Se establece que en un modelo simple, un bloque de roca cristalina reposa sobre un plano horizontal, según se muestra en la Figura 9. En reposo, actúan el peso ( $W$ ) del cuerpo que, por la tercera Ley de Newton, está equilibrada por una la fuerza opuesta re ( $N$ ) en sentido opuesto. Al someter al cuerpo a una fuerza de empuje ( $F$ ), una fuerza opuesta resistiva ( $f$ ) debida a la fricción se opone al desplazamiento. Al alcanzar  $F$  una cierta magnitud el bloque rompe su contacto con la superficie y se inicia el movimiento. En ese momento  $f$  tiene una magnitud máxima equivalente al producto de  $N$  por el coeficiente de fricción ( $\mu$ ):

$$f = \mu \cdot N \quad (1)$$

En una situación más realista y cercana a lo observado, el plano de reposo no es horizontal, sino inclinado con un ángulo  $\alpha$  (Figura 10). Bajo esas condiciones el bloque empezará a deslizarse cuando la fuerza de fricción resistiva alcance un valor máximo dado por:

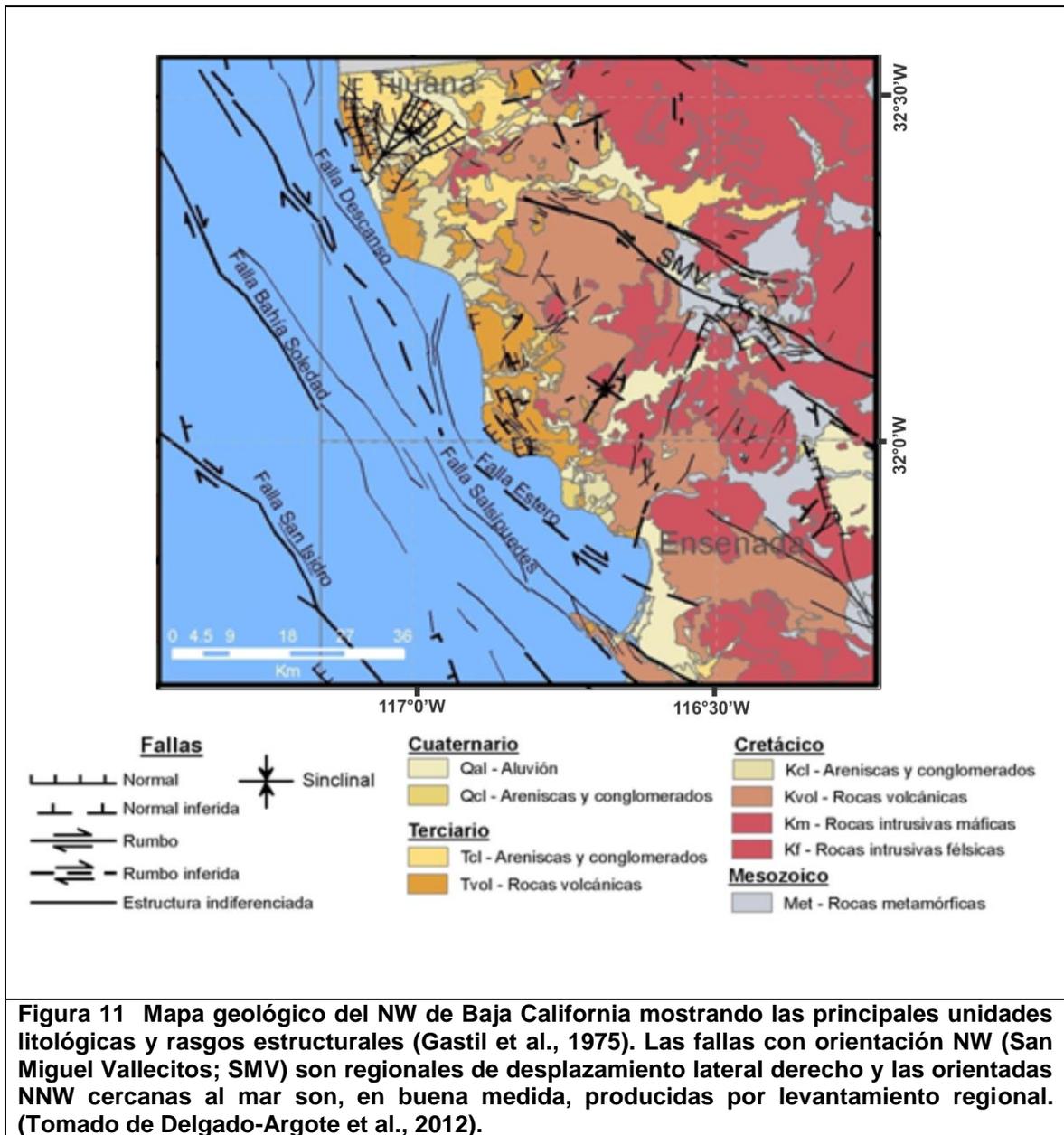
$$\mu = \tan \alpha \quad (2)$$

lo que significa que el bloque empezará a deslizarse cuando el ángulo del plano sea igual al ángulo de la fricción estática. .

## 1.4 Marco geológico

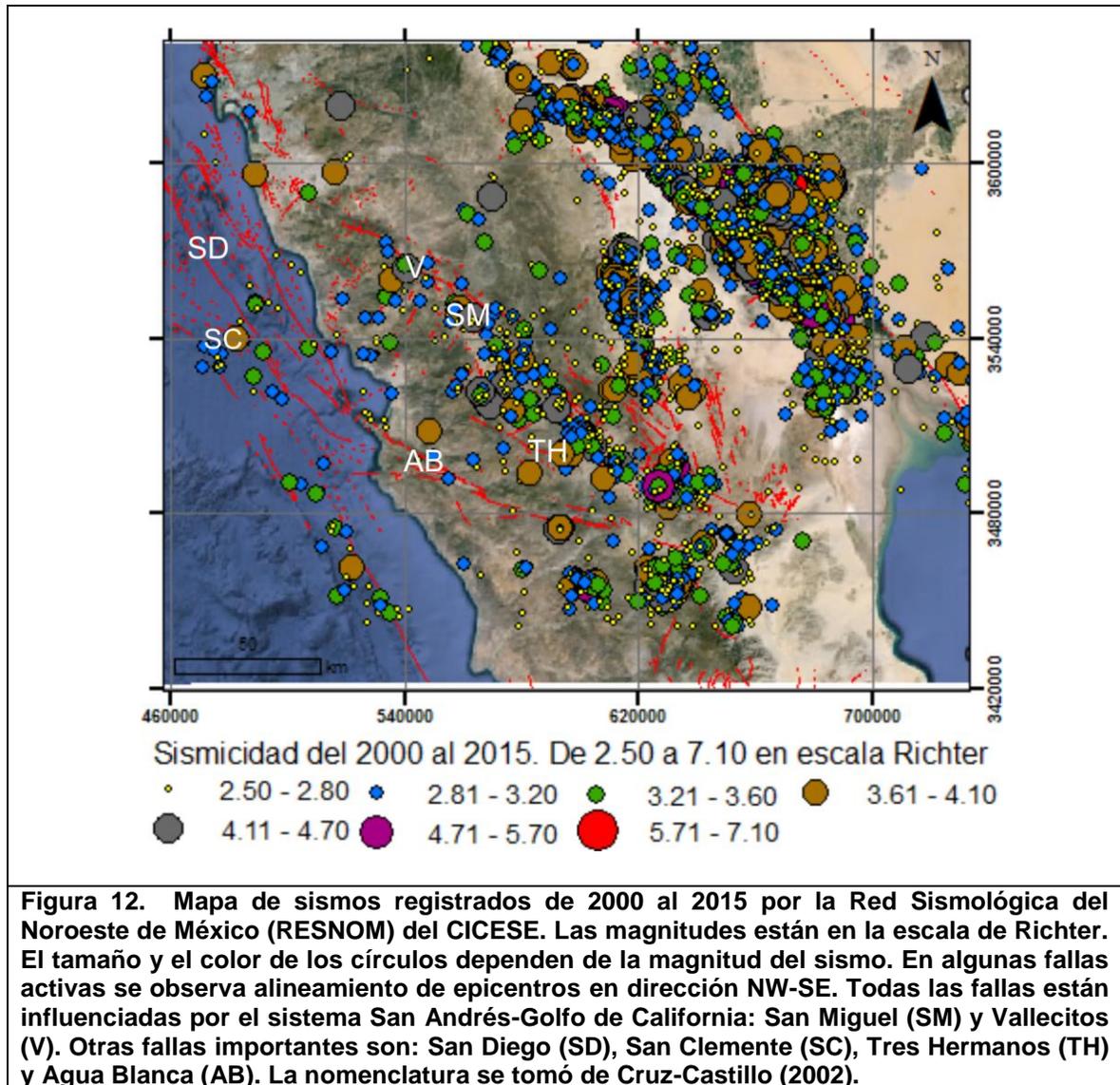
El basamento de la parte noroccidental de la península está formado por las rocas graníticas y una secuencia metamorfozada de rocas volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Santiago Peak (Wetmore, 2002), la cual aflora ampliamente en el extremo oriental. El basamento está cubierto discordantemente por los depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico tardío, expuesta en la zona de Salsipuedes al NW de Ensenada (Figura 11). En esa misma región se observa que a las unidades cretácicas del basamento les sobreyace la Formación Rosarito Beach del Mioceno, la cual está bien expuesta desde Tijuana hasta Ensenada. La Formación Rosarito Beach está constituida por derrames basálticos,

brechas y arenas con matriz de lodo, tobas, arenas tobáceas, calizas y conglomerados característicos de ambientes fluviales, lacustres y de plataforma marina somera (Ashby, 1989).



La deformación general del NW de Baja California está gobernada por el Sistema San Andrés-Golfo de California. En el Borde Continental, los sismos son escasos pero los epicentros se alinean con las fallas (Legg *et al.*, 1991). La mayoría de las fallas en esta región<sup>1</sup> son de tipo lateral derecho (Figura 11), donde se estiman velocidades de desplazamiento desde 1 mm (Rockwell *et al.*, 1987; Legg *et al.*, 1991; Legg, 1991; Suárez *et al.*, 1991; Suárez, 1993). En Baja California la mayor velocidad de movimiento se observan en tienen la falla Cerro Prieto (4.2 cm/año) y la falla Imperial 3.5 cm/año (Bennett *et al.*, 1996) en el Valle de Mexicali. La presencia de estas fallas hace que el peligro por sismicidad sea alto.

Los mecanismos focales son consistentes con el sentido de desplazamiento inferido y los epicentros son paralelos a las trazas de las fallas (Legg *et al.*, 1991). Desde el punto de vista sísmico, mapas de distribución de energía sísmica en la región indican notables alineamientos de epicentros en dirección NE (Frez y Frías-Camacho, 1998) que pueden correlacionarse con las fallas cartografiadas por Gastil *et al.* (1975) en el NW de Baja California. En la Figura 12 se muestran los epicentros de los sismos de magnitud mayor a 2.5 reportados por la Red Sismológica del Noroeste de México del CICESE (RESNOM) para el periodo 2000-2015. Debe destacarse: a) la correlación entre el alineamiento de los epicentros con respecto a la traza de algunas fallas del mapa geológico de la Figura 11, principalmente en el sistema San Miguel-Vallecitos; b) la alineación de epicentros en segmentos más pequeños, aunque menos evidentes, con orientación NE-SW; y c) la cercanía a la zona de estudio de sismos de magnitud 2.5 y 3.2 del 2000 al 2015 (Figura 12).



## 1.5 Objetivos

El objetivo general es elaborar un mapa de las zonas de peligro de movimientos de masa considerando las pendientes y las características físicas del terreno obtenidas de los análisis geológico y geofísico en un sector del Libramiento Ensenada. Para lo anterior se cumplieron los objetivos particulares siguientes:

- Identificar las unidades litológicas,
- Caracterizar las relaciones de contacto entre las unidades litológicas
- Cartografiar las estructuras geológicas, principalmente fracturas y cizallas,
- Obtener perfiles de resistividad del subsuelo para correlacionar con la litología y las estructuras geológicas y movimiento de aguas subterráneas.
- Establecer un criterio para asignar el nivel de peligro de presentar el movimiento de masa a los taludes de la zona estudiada basando en integración de datos obtenidos en este trabajo.

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1 Descripción de metodología

La selección del área de estudio se llevó a cabo después de un recorrido a lo largo del Libramiento de Ensenada, en la que se identificaron posibles zonas de peligro de movimiento de masa según la litología, el rango de modificación del terreno natural y la densidad de estructuras geológicas, principalmente fracturas.

Una vez seleccionada la extensión del área de estudio, la etapa inicial de este proyecto de tesis consistió en el análisis visual de las imágenes satelitales de alta resolución disponibles para el área de estudio en el programa Google Earth, donde se identificaron rasgos lineales que podrían cortar las dos litologías que afloran. Adicionalmente, se efectuó el análisis del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona con el mismo propósito pero con más detalle. El MDE utilizado en este trabajo se creó a partir de la unión de seis modelos digitales de elevación de terreno (MDT) generados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a partir de la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) con resolución de 5 metros en formatos cartográficos escala 1:10,000. Con el fin de realzar la morfología del terreno y de mejorar la calidad de su análisis visual se generaron a partir de MDE los modelos de relieve sombreado (hillshading) con distintas orientaciones y elevaciones de iluminación. Esta tarea se realizó con el software ER Mapper 7.1 (Earth Resource Mapping, por sus siglas en inglés).

Los lineamientos identificados e interpretados usando las herramientas mencionadas anteriormente se analizaron estadísticamente en diagramas de rosa con la paquetería GeoRose 0.5.1 (Yong Technology Inc., 2015). Los resultados de la identificación e interpretación de los lineamientos en gabinete fueron utilizados para orientar el trabajo geológico de campo.

El procedimiento de medición de estructuras geológicas, donde se midieron rumbo, echado y estrías para cizallas, y rumbos y echados de fracturas se llevó a cabo con brújula brunton y un GPS portátil marca Garmin de la serie 12X. El procesado de datos se hizo a cabo con la paquetería Stereonet v. 9.2.0 (Almendinger et al., 2013) y FaultKin 6 (Almendinger, 2013). Los mapas geológicos se elaboraron en ArcMap, paquetería

ArcGis 10.3 (Esri Inc., 2014) apoyados por la carta geológica del INEGI (CETENAL; Carta Ensenada HIIB12, 1976).

El estudio geoelectrico consistió en la inyección de corriente continua al subsuelo con una fuente artificial para medir la resistividad, que consiste en el grado de dificultad que encuentran las corrientes eléctricas para desplazarse, por lo que es una propiedad intrínseca de las rocas y se mide en ohms-metro (Telford, 1990). Las rocas ígneas se caracterizan por tener resistividades altas.

La inyección de corriente se hizo a través de 28 electrodos espaciados cada 10 m y se midió el diferencial de potencial en otros dos electrodos (M, N), lo que significa que es un arreglo tetrapolar. Las mediciones se hicieron dos veces durante el año de estudio. La primera medición se llevó a cabo en septiembre de 2014, antes de iniciar la temporada de lluvias, cuando el subsuelo estaba seco. La segunda medición se llevó a cabo en enero de 2015, en la temporada regular de lluvia, con lo que se pudieron comparar las respuestas del subsuelo seco y húmedo. Durante la medición de enero se perdieron datos debido a que uno de los 28 sensores inteligentes dejó de registrar, por lo que se repitió la medición a principios de junio de 2015 con el equipo funcionando correctamente. Es importante tomar en cuenta que en marzo de 2015 se registró una precipitación de 50 mm que mantuvo húmedo el subsuelo hasta junio.

Se aplicaron los arreglos tetrapolares Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner para medir la resistividad y se modelaron e interpretaron de forma conjunta. Una breve descripción de los arreglos es la siguiente:

- a) **Dipolo-Dipolo.** El dipolo de potencial (electrodos M, N) se aleja del dipolo de corriente (electrodos A, B; Figura 13). Al alejar los dipolos se penetra más en profundidad y al mover lateralmente los dipolos, se observan variaciones laterales de la resistividad (Telford, 1990).
- b) **Schlumberger.** En este método los cuatro electrodos se ubican sobre una línea recta (Figura 14). Los electrodos de corriente son los que se encuentran más distantes y los de potencial, se encuentran en medio. En los equipos automáticos, como el Supersting, los electrodos se clavan en el suelo a una distancia constante. Los electrodos de corriente se alejan y se mueven lateralmente respetando que los de potencial queden en el centro. A medida que los de corriente se alejan entre sí, la penetración es mayor (Reynolds, 1997).

c) **Wenner.** Con este método los electrodos se ubican con un espaciado uniforme a lo largo de la línea de prospección (Figura 15). El arreglo Wenner es un caso particular del Schlumberger, manteniendo los electrodos equidistantes, como se observa en la Figura 15. De igual manera al incrementar la distancia "a" la penetración es mayor (Telford, 1990).

Se utilizaron los tres métodos porque el comportamiento de las corrientes en cada uno de los arreglos es distinto, aunque Wenner y Schlumberger son similares. Cada arreglo ve el subsuelo de acuerdo a su patrón de corrientes, por lo que cada arreglo nos dará una versión distinta de medio. Ninguno de los tres arreglos tiene una visión completa del modelo real pero, al reunirlos, las fortalezas de cada arreglo ofrecen una versión más cercana a la realidad.

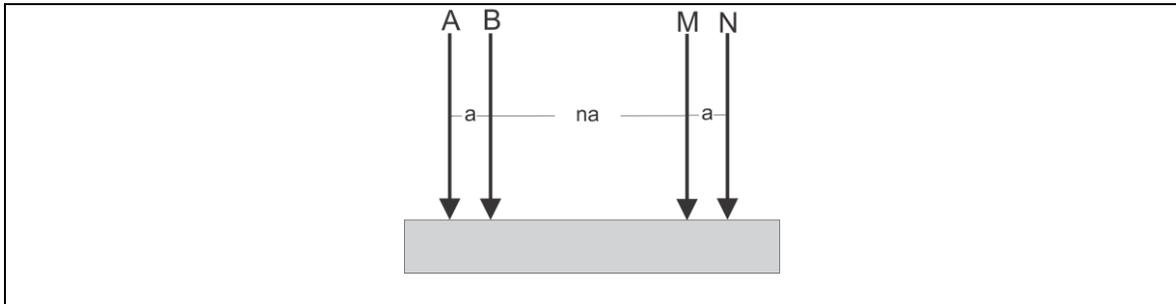


Figura 13. Arreglo de electrodos con geometría dipolo-dipolo, donde los electrodos de inducción de corriente A y B están separados una distancia  $a$  en pares, equivalente a 10 m en los experimentos de este estudio. Una distancia  $na$  separa A-B de los electrodos de medición de potencial M-N, los cuales también tienen una separación  $a$ .

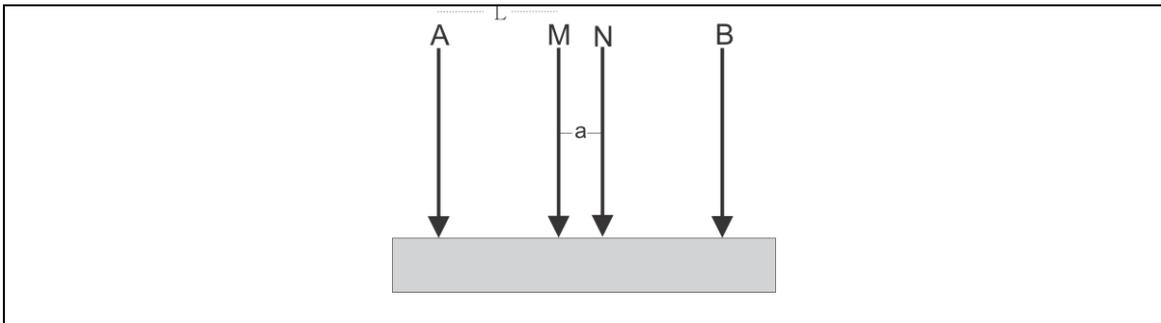


Figura 14. Arreglo tetraelectrónico Schlumberger en donde la separación de los electrodos de corriente A y B se ubican a una distancia  $2L$  de M y N que representan los electrodos de medición de potencial M y N, los cuales tienen una separación  $a$ . El valor de  $a$  es de 10 m y el de  $L$  de 20 para este estudio.

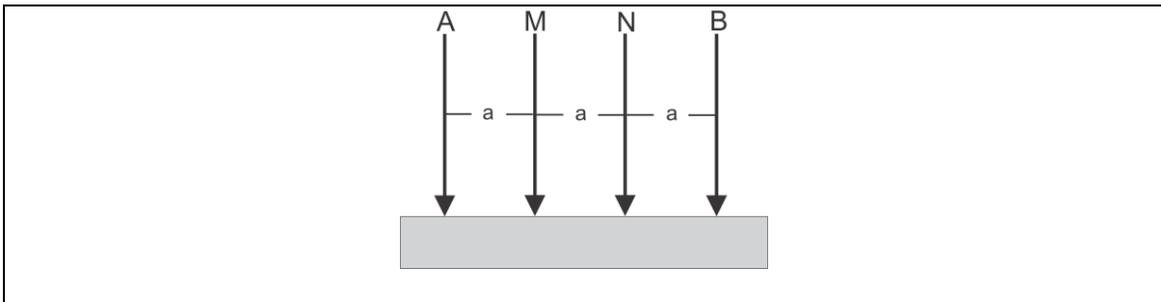


Figura 15. En el arreglo tetraelectrónico Wenner, los cuatro electrodos tienen una separación uniforme de 10 m para nuestro estudio. Las letras A, B, M y N tienen el mismo significado que en la Figura 14.

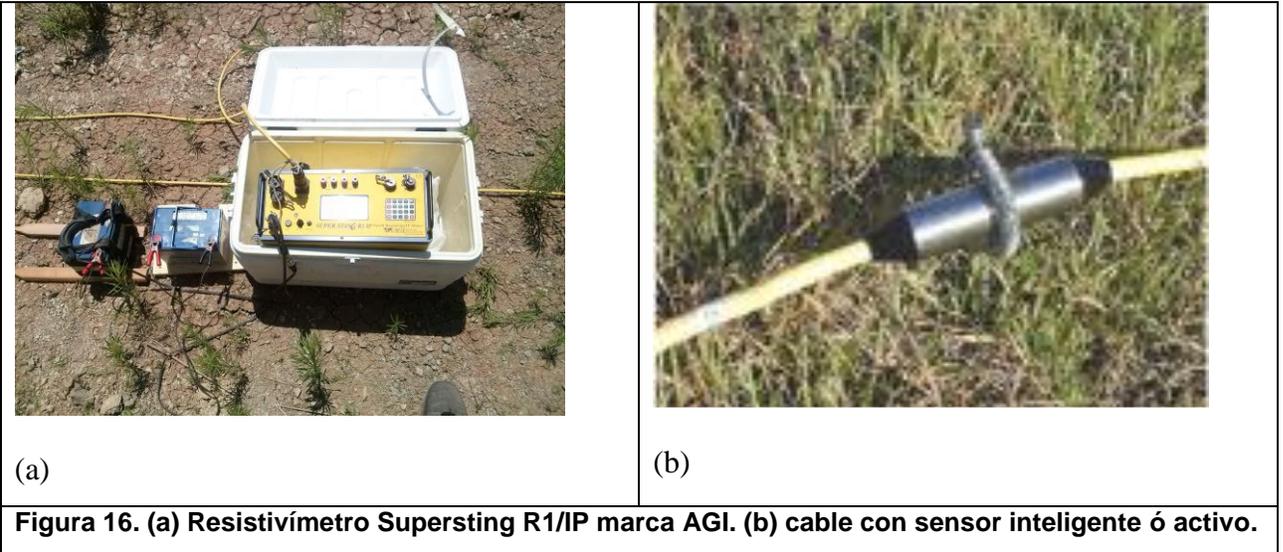
Se utilizó un resistivímetro Supersting R1/IP de la empresa AGI y cables con sensores inteligentes ó activos (Figuras 16), cuyas especificaciones son las siguientes:

Rango de medición	+/- 10 V
Resolución de la medida	Máximo 30 nV dependiendo del nivel de voltaje
Intensidad de corriente de salida	1mA-2000mA
Voltaje de salida	800 Vp-p dependiendo de la transmisión de la corriente y resistividad del suelo
Potencia de salida	200 W
Ciclos de medida de resistividad	0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 3.6, 7.2 o 14.4
Supresión de ruido	Mejor a 100 dB en $f > 20$ Hz
Configuraciones disponibles	Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo, Polo-dipolo, Polo-polo, SP, IP
Rango de temperatura para operar	(-5, +50) °C

La interpretación de los datos de resistividad aparente obtenidos en el campo se realizó por medio de *imaging*, que es un método que utiliza aproximación de bajos contrastes en la resistividad, el cual aplica un método de inversión que convierte las resistividades aparentes en reales (Pérez-Flores et al., 2001). Bajo esta forma de aproximación se puede ver que las resistividades aparentes obtenidas en el campo, representan el promedio ponderado de las resistividades verdaderas que hay debajo del suelo en un volumen que encierra al conjunto de los cuatro electrodos (Pérez-Flores et al., 2001).

Como resultado, obtenemos el modelo de resistividad que mejor ajusta a los tres arreglos de datos (Dipolo-dipolo, Schlumberger y Wenner), a lo que llamamos inversión conjunta. Esta técnica de inversión o de *imaging* produce buenos resultados para contrastes bajos y moderados de resistividad (Pérez-Flores et al., 2001).

El mapa de peligro geológico integra la información geológica y geoeléctrica. Se elaboró una matriz comparando cada talud con una estimación del grado de intemperismo de las unidades litológicas, la pendiente, la altura de corte, la densidad aparente de cizallas y de fracturas, así como la humedad del subsuelo interpretado de los valores de resistividad. Los valores obtenidos de la matriz se utilizan como índices de peligrosidad, asignando un valor de cero a tres a las zonas cuya probabilidad de que ocurra un movimiento de masa sea nula o alta, respectivamente. Este criterio propio se apoyó en los datos obtenidos en el campo. La información anterior se procesó en ArcMap, paquetería ArcGis 10.3 (Esri Inc., 2014) para obtener un mapa empírico de valores de peligrosidad en los 2 km estudiados en la carretera.



## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Litología del área de estudio

En términos generales, la litología de la zona de estudio es cristalina, formada por rocas volcánicas y volcanoclásticas que pertenecen a un arco de islas que fue activo, en esta región desde finales del Jurásico hasta finales del Cretácico temprano (Figura 17). En la zona, en el arroyo Doña Petra, por la prolongación de la Calle Ruiz, se observan xenolitos de rocas volcánicas atribuidas a la Formación Santiago Peak (FSP) en las rocas graníticas. Se interpreta que dichas rocas volcánicas son unidades volcánicas antiguas posiblemente de la FSP que están intrusionadas por granitoides equivalentes a las últimas manifestaciones volcánicas del arco de islas en esta zona. En la intersección del Libramiento Ensenada (Libramiento) con la prolongación de la Calle Ruiz, afloran lavas afaníticas de composición aparentemente andesítica-dacítica por contener fenocristales de andesina-oligoclasa en matriz de vidrio desvitrificado identificados petrográficamente. Estas unidades lávicas están aparentemente sobreyacidas por ignimbritas verdosas por la abundancia de clorita y epidota principalmente, de donde se deduce que son predominantemente andesíticas. Dichas unidades ignimbriticas dominan la secuencia volcánica expuesta en el Libramiento y en algunos sectores del SW de la zona de estudio muestran un claro arreglo estratificado (Figura 18).

La zona de contacto entre las rocas graníticas (Kgr) y las volcánicas (Kv) sigue aproximadamente el cauce del arroyo Doña Petra. Los granitoides no se observaron al microscopio pero, por su contenido de cuarzo y aparente ausencia de feldespato potásico, se consideran de composición tonalítica.

Las rocas volcánicas tienden a ser más resistentes a la erosión, mientras que las graníticas forman relieves suaves que se asocian a la alteración de las plagioclasas principalmente y posterior disgregación de los cristales no alterados.

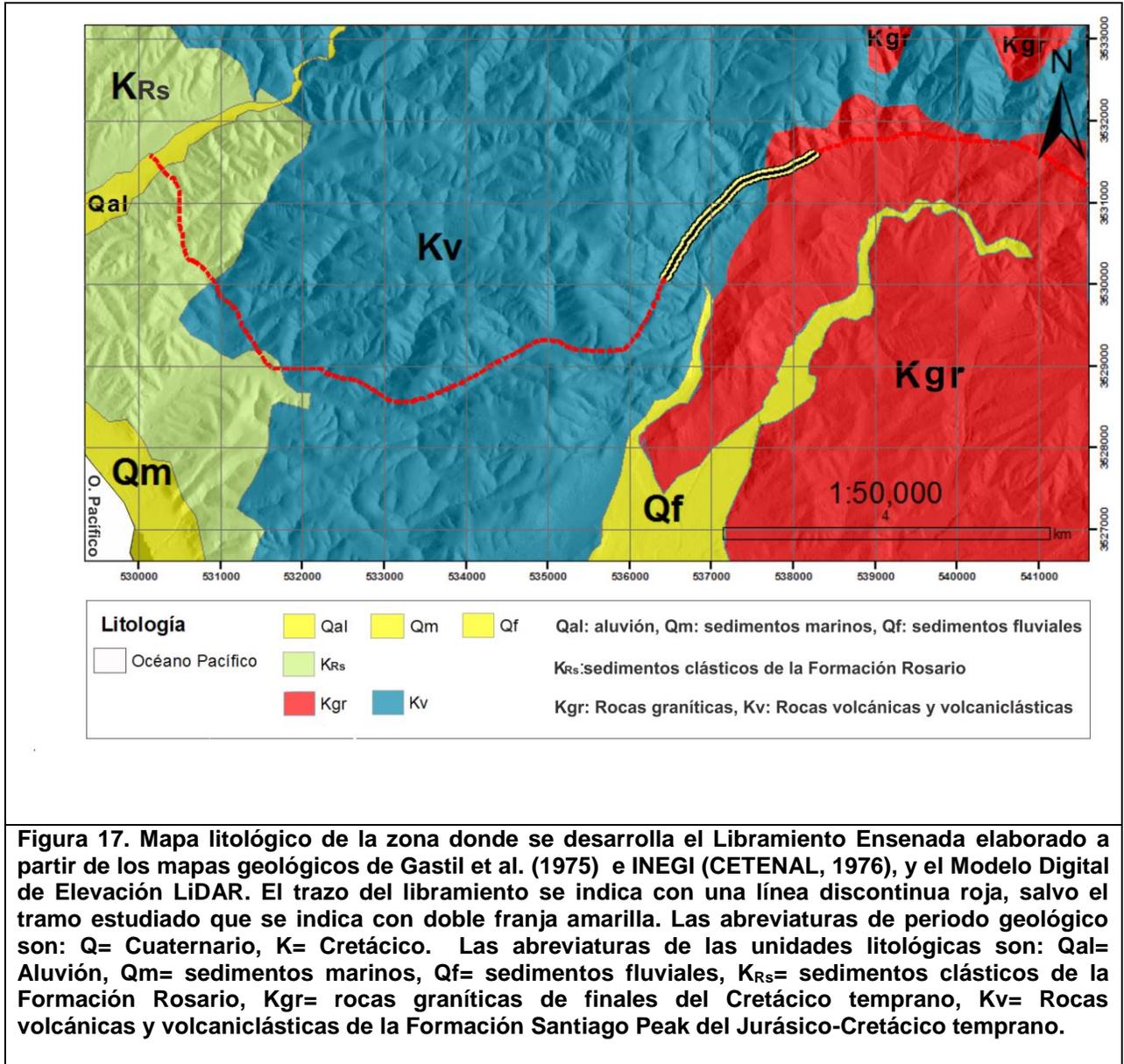




Figura 18. Estratificación de depósitos ignimbríticos en la parte suroeste de la zona de estudio. Estas unidades buzcan hacia el SW en esta vista con orientación hacia el NE.

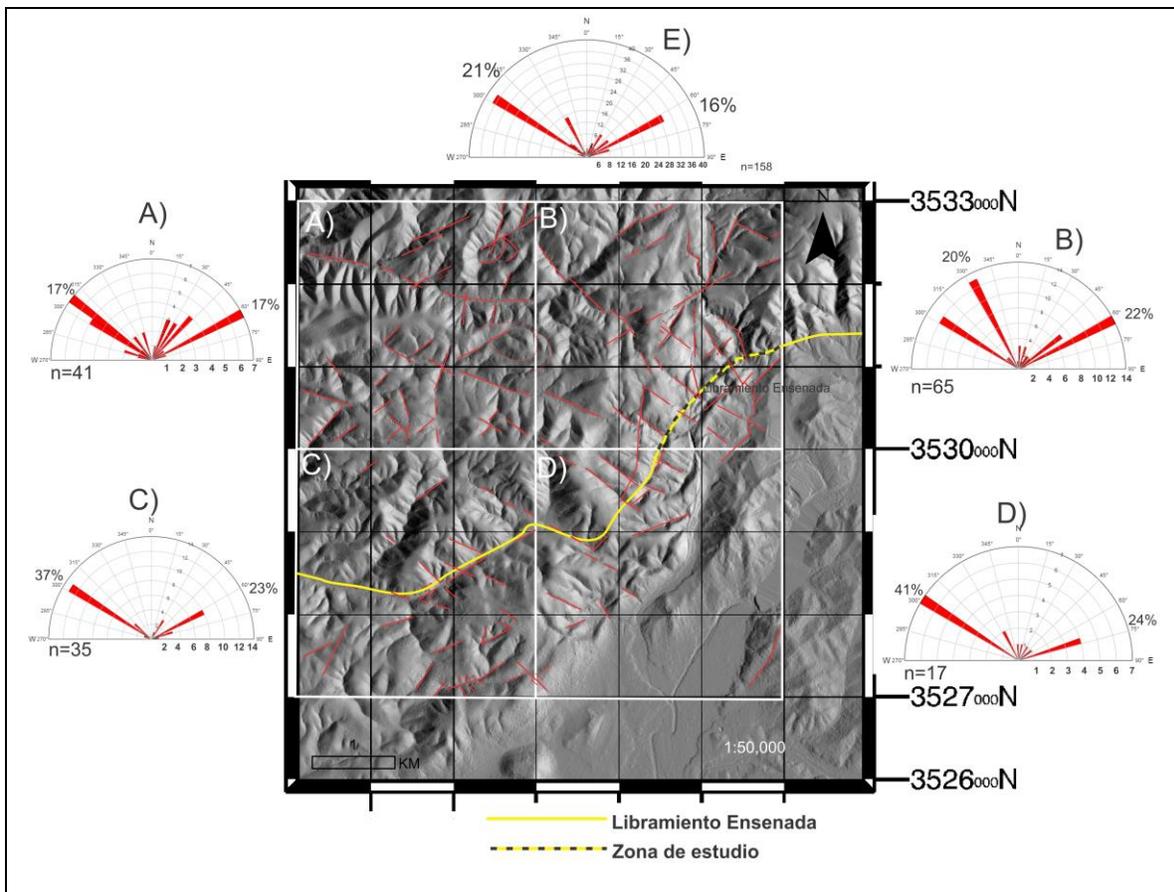


Figura 19. Lineamientos estructurales asociados a la deformación sobrepuestos en un modelo digital de elevación LiDAR. Los diagramas de rosa A, B, C y D corresponden a los cuadrantes con la misma denominación. Es notable la tendencia dominante NW sobre los rasgos NE. En el diagrama E están incluidos todos los lineamientos de la zona. Los pétalos tienen una abertura de  $5^\circ$ , y el número de datos se indica en las curvas paralelas al semicírculo, cuyo valor máximo es de 14 en los diagramas B y C, y 7 en A y D. La línea amarilla indica el tramo de carretera estudiado con detalle y n debajo de los diagramas significa el número de datos.

### 3.2 Características de los cortes de talud analizados.

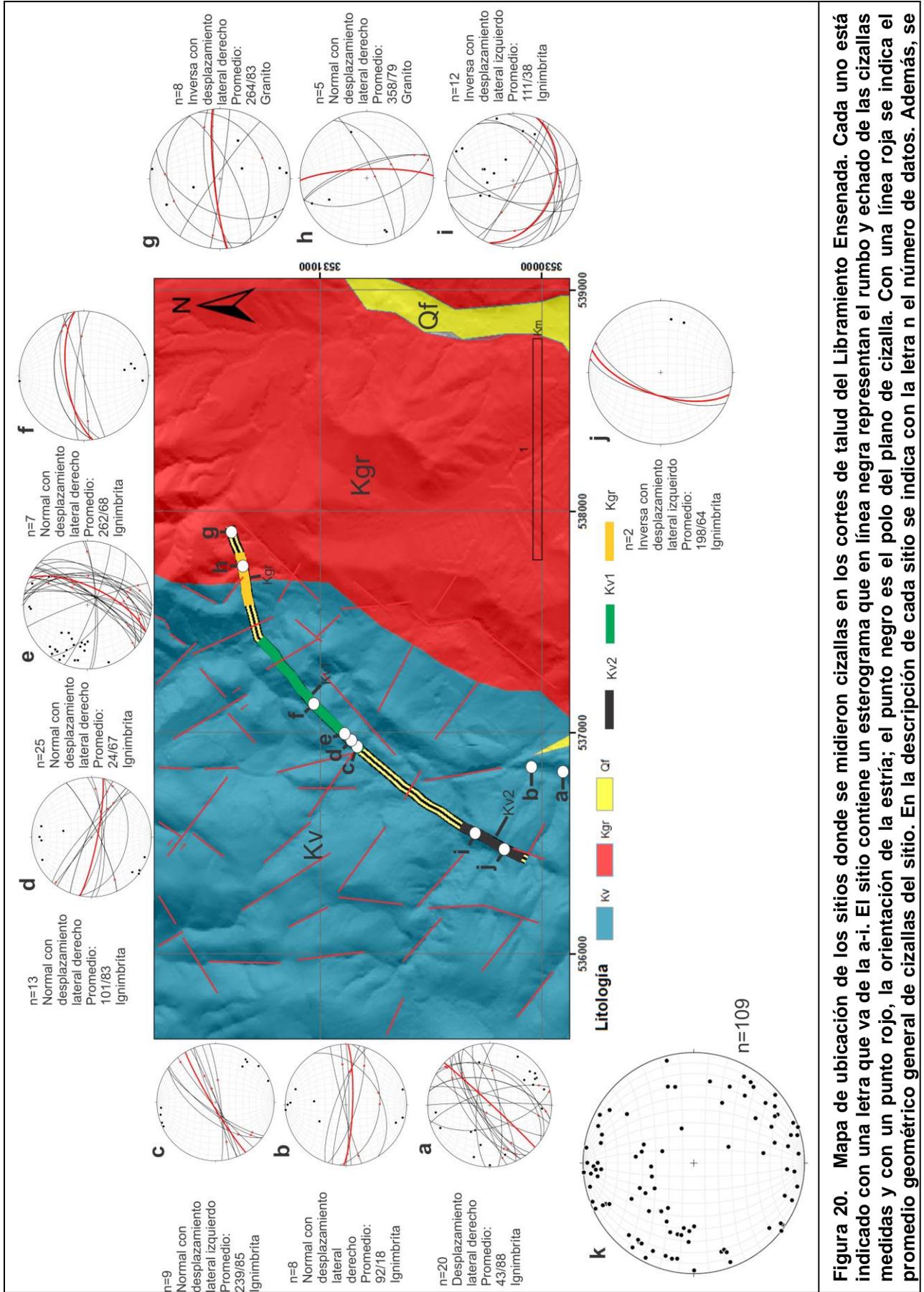
En el corte carretero de la zona de tesis se encuentran cuatro cortes de talud de los cuales solo se estudiaron tres. La elección de estos tres taludes dependió del ángulo abrupto del corte que, en general, son de casi  $90^{\circ}$ , profundidad de corte y de la densidad de fracturas. El primer corte de talud que se analizó, que es de composición ignimbrítica, se le llamó Kv1 se ubica al SW del puente de arroyo Doña Petra, con coordenadas UTM de inicio  $x= 537332$ ,  $y= 3531207$ , y final  $x= 536942$ ,  $y=3530861$ . El segundo corte de talud se nombró Kgr y corresponde en su mayoría a rocas graníticas. Se ubica al NE del puente arroyo Doña Petra, con coordenadas de inicio  $x= 537594$ ,  $y= 3531322$  y final  $x= 537857$ ,  $y= 3531379$ . Y por último, el tercer corte de talud se nombró como Kv2 que se ubica en rocas ignimbríticas, ubicado a 650 m al SW de Kv1, con coordenadas de inicio  $x= 536567$ ,  $y= 3530357$  y finaliza en  $x= 536472$ ,  $y= 3530100$ .

### 3.3 Lineamientos

El análisis estructural de la zona de estudio inició con la identificación de lineamientos cuya naturaleza se asocia con deformación, de manera que ninguno de los analizados se asocia con contactos litológicos. Bajo dicha consideración se interpretaron rasgos rectilíneos, primero en imágenes de Google Earth para observar rasgos importantes que cortan más de dos litologías y, después, en los modelos de relieve sombreado generados a partir de un Modelo Digital de Elevación LiDAR (Figura 19). Por la naturaleza rígida de las rocas volcánicas, los rasgos estructurales asociados a la deformación de grandes dimensiones son más abundantes en éstas que en las rocas graníticas, que afloran en la parte oriental de la Figura 19.

Para el análisis cuantitativo de los lineamientos estructurales asociados a la deformación identificados usando el MDE, éste se dividió en los cuadrantes A, B, C y D (Figura 19) para medir sistemáticamente la orientación de los lineamientos en cada cuadrante. Cabe mencionar que la zona de estudio está incluida en su mayoría en el cuadrante B y una pequeña parte en D. Después, cada cuadrante se subdividió en nueve para ponderar el valor del lineamiento dependiendo de su longitud, ya que, su valor se incrementa cada vez que cruza un rectángulo. Las estructuras interpretadas se

representan en diagramas de rosa que muestran la repetición de los lineamientos de acuerdo con su orientación en cuatro zonas del área de estudio (Figura 19). Es notable la persistencia de estructuras orientadas principalmente hacia el NW en los cuatro cuadrantes, los cuales representan el 21% de todos los lineamientos de la zona, mientras que la otra tendencia dominante, hacia el NE contiene el 16% de la población (Figura 19.E). Es importante observar la baja densidad de lineamientos en el cuadrante D, debido principalmente a que la litología dominante en esa zona es granítica y sedimentaria del Cuaternario.



**Figura 20.** Mapa de ubicación de los sitios donde se midieron cizallas en los cortes de talud del Libramiento Ensenada. Cada uno está indicado con una letra que va de la a-i. El sitio contiene un estereograma que en línea negra representan el rumbo y echado de las cizallas medidas y con un punto rojo, la orientación de la estría; el punto negro es el polo del plano de cizalla. Con una línea roja se indica el promedio geométrico general de cizallas del sitio. En la descripción de cada sitio se indica con la letra n el número de datos. Además, se

### 3.4 Cizallas en la zona de estudio en detalle

El área de estudio se encuentra en una región deformada caracterizada por fallas y pliegues amplios. La historia tectónica de la región registra deformación desde el periodo mismo de la formación de las unidades volcánicas que, por definición, son orogénicas. Al finalizar la actividad magmática que cubre el periodo desde el desarrollo de la Formación Santiago Peak y el emplazamiento de los plutones, la zona estuvo sujeta a levantamientos regionales que desarrollaron, incluso, fallas intraformacionales en la Formación Rosario del Cretácico tardío, las cuales se observan claramente en la carretera Escénica Tijuana-Ensenada. Para los fines de análisis de estabilidad, es importante identificar que las zonas de falla están asociadas con las cizallas, pues a través de ellas, también se pueden identificar sistemas de fracturas que se desarrollan durante la deformación. Las zonas de falla desarrollan cizallas, las cuales representan planos de deslizamiento, por lo que en ellas se observan líneas o estrías que indican la dirección de movimiento. En cada sitio donde se observaron zonas de falla, se midieron planos de cizalla. Estos planos de ruptura son complejos y toman distintas direcciones, por lo que es necesario obtener un plano promedio que en general, coincide con el plano principal de deslizamiento. El procesado se efectuó por medio de FaulKin 6 (Almendinger, 2013). En la Figura 20 se graficaron tanto el plano como el polo de cada cizalla. Se midieron cizallas en 28 sitios. Se hizo una agrupación de datos dependiendo de la proximidad (50 m), la similitud en la orientación y sentido de deslizamiento de las cizallas, además de la similitud en la litología. De las agrupaciones resultaron 10 sitios a las que se le asignó una letra a cada uno que va de la a-j. Del sitio a-e, i y j se encuentran en rocas ignimbríticas, y los sitios g) y h) en rocas graníticas. En la Figura 20, se indica cada sitio con un estereograma que contiene las cizallas medidas donde el número de datos está representado por la letra n, y debajo al número de datos, se indica la clasificación de movimiento de cizalla, al igual que la litología de donde los datos fueron recolectados.

Se observa en el estereograma a) ubicado en la calle prolongación Ruiz que prácticamente todas las cizallas son de ángulo de buzamiento alto. El promedio de sus orientaciones es de  $43^\circ$  buzando hacia el NW y SE. El ángulo de la estría con respecto

a la horizontal (rph) que caracteriza a la mayoría de las cizallas (85%) es menor de  $20^\circ$ , lo que indica que su origen debe estar asociado con fallas de rumbo. En el estereograma b) también se grafican las cizallas localizadas en la unidad de rocas volcánicas. Incluye dos sitios caracterizados por cizallas oblicuas, con ángulos de estría menores a  $20^\circ$  con respecto al plano horizontal (rph) y casi horizontales asociadas con movimiento normal. Se interpreta que el movimiento dominante es de desplazamiento lateral con componente de movimientos relacionados con las fallas de gravedad. El estereograma c) se encuentra en el Libramiento Ensenada, en un talud de ignimbritas cuya longitud es de 500 m. Las cizallas medidas en este punto son muy consistentes en su orientación promediando  $239^\circ$ . Casi todos los echados de las cizallas son mayores de  $75^\circ$  y los planos de cizalla presentan estrías con ángulos rph menores a  $10^\circ$ . En d) se agrupan cuatro sitios de observación de cizallas con orientación consistente que promedia 101/83 ( $101^\circ$  promedio de rumbo de cizalla y  $83^\circ$  promedio de rumbo de echado). Prácticamente todos los buzamientos son mayores de  $75^\circ$  y las estrías en su mayoría son de aproximadamente  $45^\circ$  rph u oblicuas. La gráfica e) reúne la orientación de 25 datos de cinco estaciones de observación y la mayoría, excepto cinco, se orienta alrededor del valor promedio de 24/67 y su valor de estría rph es de cerca de  $45^\circ$ . Al igual que los puntos anteriores, se desarrollan en ignimbritas de composición andesítica. Es importante mencionar que entre el conjunto de sitios de d) y e) la distancia es menor a 50 m, lo que muestra, por su cercanía, que las cizallas tienen un arreglo casi ortogonal. En la gráfica f) se reúnen dos sitios en ignimbritas, separados unos 100 m del conjunto e), que tienen una orientación consistente que promedia 262/68. Tres de las estrías se asocian a movimiento por gravedad y las cuatro restantes son oblicuas. Esta tendencia de orientación, como en caso del conjunto d), también es casi perpendicular al sitio e). Las observaciones en el extremo oriental del área de estudio, después del puente del arroyo Doña Petra se desarrollan en rocas graníticas de grano grueso. Tanto la gráfica g) como la h) contienen dos sitios de observación que, en conjunto representan 13 cizallas en arreglo casi perpendicular; 264/83 en g) y 358/79 en h), no muy diferente a los arreglos observados en las ignimbritas de los conjuntos d)-f). Es importante resaltar que en g) se midió una falla inversa con rumbo 245/28 que indica esfuerzos compresivos en un plano NNW-SSE.

En el extremo sur de la zona estudiada se midieron tres sitios en un talud de ignimbritas. En i) las cizallas se asocian con empuje posiblemente relacionadas con una

falla inversa representada por el promedio en 111/38. Perpendicularmente, se desarrollan cizallas orientadas 198/64, con estrías cuyo valor  $r_{ph}$  es menor de  $24^\circ$ . Es importante resaltar que la orientación de las estructuras en i)-j) coincide con las tendencia observada en a) y la orientación de una falla regional de desplazamiento lateral izquierda cartografiada por Gastil et al. (1975) y mostrada en la Figura I.4. En el diagrama k) se resume la orientación de todos los planos de cizalla de la zona estudiada. Por inspección, se observa que la mayoría de los planos de cizalla se orienta en un abanico orientado NNE a ENE o bien, es más notable la ausencia de planos de cizalla orientados hacia el NW.

### **3.5 Fracturas en la zona de estudio en detalle**

Prácticamente, en todos los sitios donde se midieron cizallas también se midieron fracturas pues, en su mayoría, se considera que su formación es consecuencia del movimiento en zonas de cizalla (Figura 21). El criterio para agrupar las fracturas fue el mismo que en la cizallas. De los sitios que resultaron después de la agrupación se nombraron con una letra que va de la l-u. Es importante hacer notar que el número de datos es bajo debido a que sólo se midieron rasgos penetrativos. Dicho rasgos se repiten en diferentes sitios, de manera que un número mayor de mediciones sería redundante. Los sitios de mediciones se nombraron m, n, o y p que pertenecen a Kv1, para Kv2 los sitios de medición se llamaron t y u, y para Kgr, q,r y s. Las fracturas medidas en el sitio l) ubicado en la prolongación calle Ruiz, en cercanía al sitio de medición de cizallas a), presentan la orientación promedio de  $236^\circ$  y el echado promedio de  $75^\circ$ . Dichas fracturas son subparalelas a las cizallas observadas en el sitio a) (Figura III.4). Las fracturas medidas en los sitios m) y n) son casi paralelas entre sí con rumbo promedio de  $333^\circ$  y  $327^\circ$ , respectivamente y notablemente perpendiculares al promedio de las fracturas medidas en el sitio l). El echado de las fracturas de los sitios m) y n) es de  $80^\circ$  y  $61^\circ$ , respectivamente. El conjunto o) y q muestran una tendencia perpendicular a p), r) y s). Esta observación es importante pues sugiere que las fracturas dominantes en las rocas graníticas, como en las volcánicas, se asocian con el régimen de deformación más que con fracturas primarias debidas al enfriamiento del plutón.

En el extremo SW de la zona de estudio, las fracturas desarrolladas en t) y u) son notablemente paralelas a la cizallas en i) y j), de donde se infiere su relación genética. En Kv2, el peligro que representan las fracturas, se debe a que los echados de las fracturas en los sitios m), n) y p) están a favor de la pendiente del corte de talud y que m) y n) son subortogonales a o). La casi ortogonalidad entre fracturas tienden a cortar bloques rocosos en la cual, la gravedad, entre otros factores, ayuda a promover la caída de rocas. En Kgr las fracturas son conjugadas en r) y s). Además, de que los echados están a favor de la pendiente del corte de talud, en dicho sitios, son ortogonales a q). En Kv2, los sitios t) y u) muestran una relación ortogonal. Cabe mencionar que los echados en el sitio t) están a favor del corte de talud.

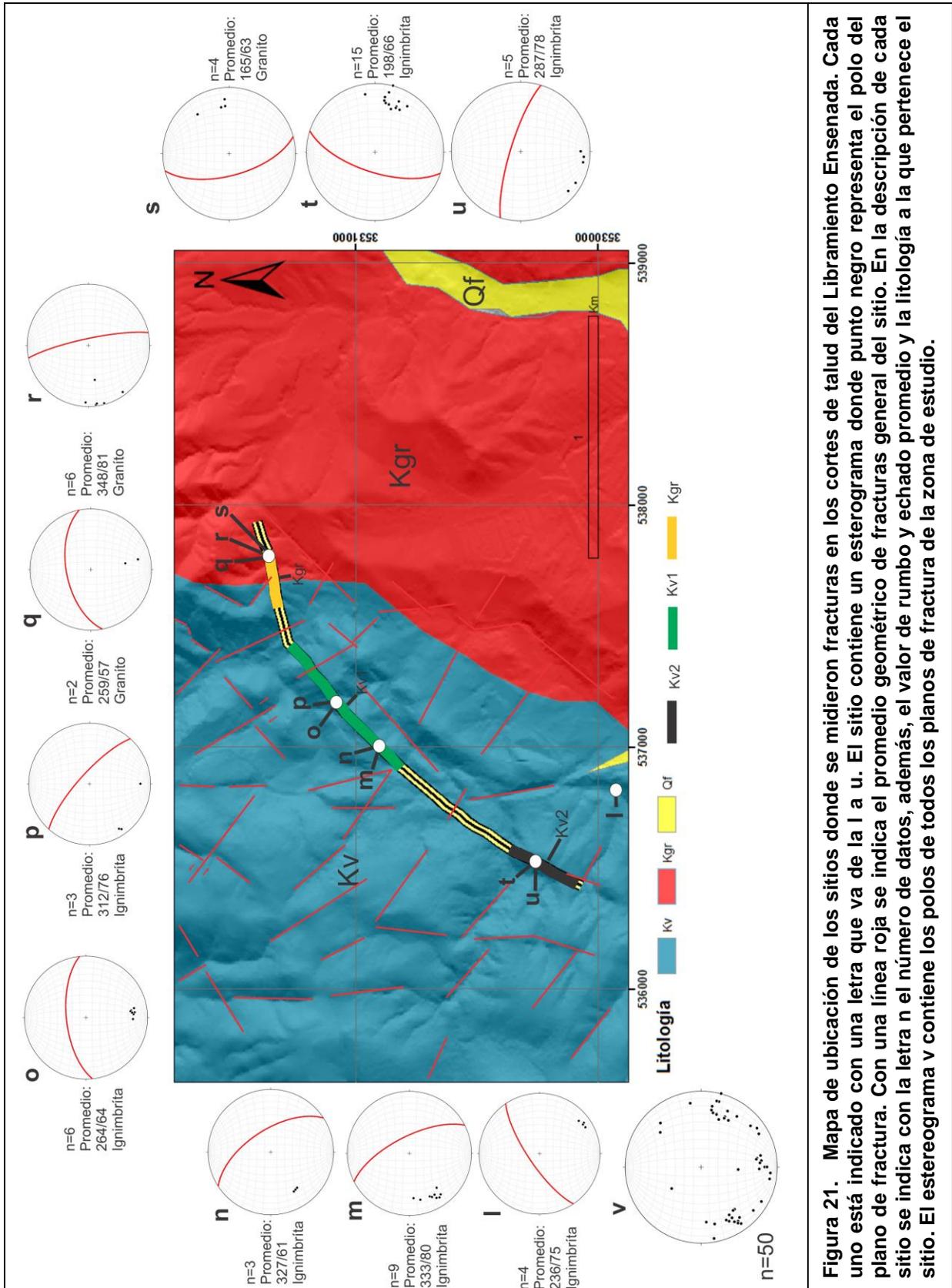
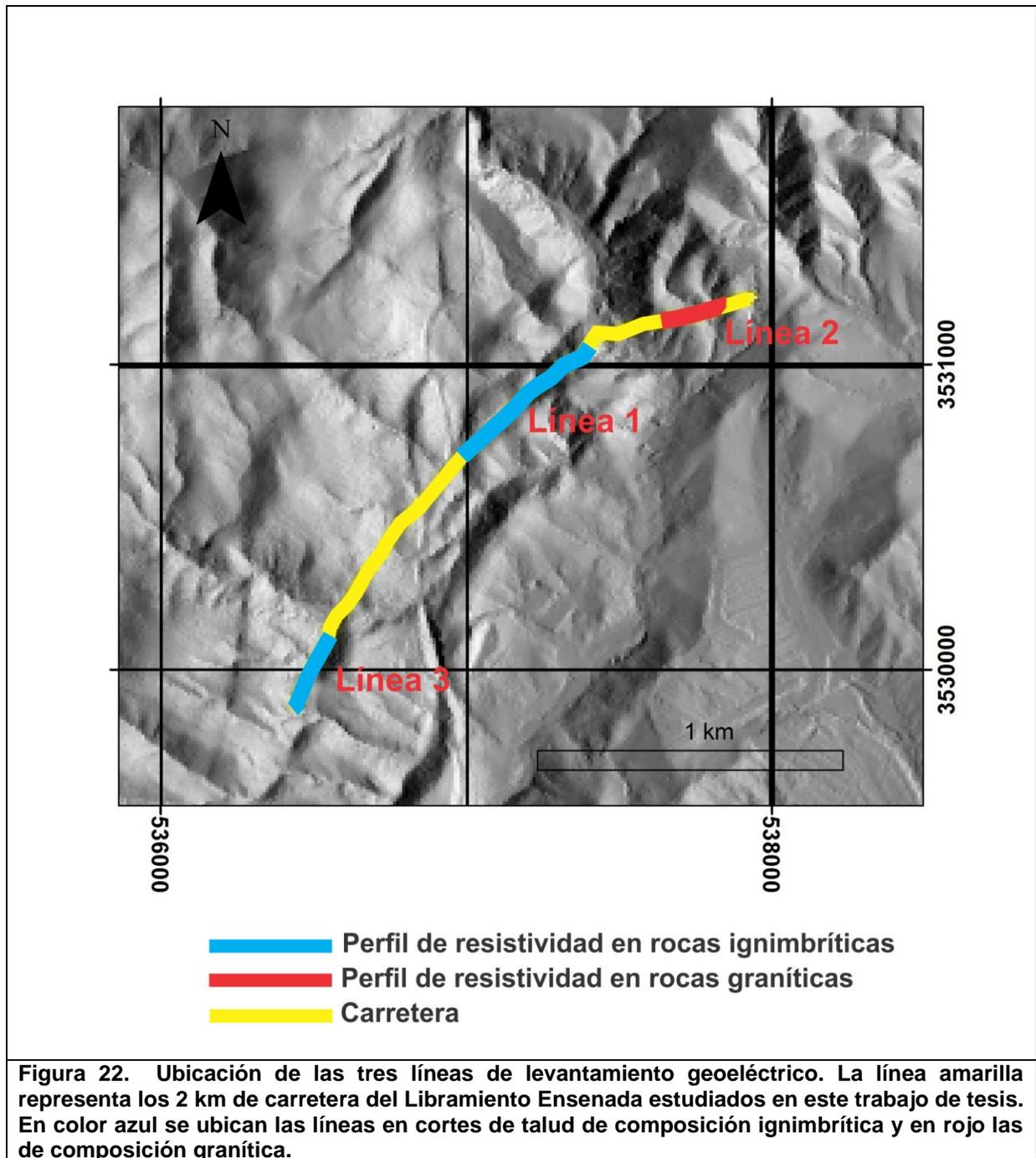


Figura 21. Mapa de ubicación de los sitios donde se midieron fracturas en los cortes de talud del Libramiento Ensenada. Cada uno está indicado con una letra que va de la l a u. El sitio contiene un estereograma donde punto negro representa el polo del plano de fractura. Con una línea roja se indica el promedio geométrico de fracturas general del sitio. En la descripción de cada sitio se indica con la letra n el número de datos, además, el valor de rumbo y echado promedio y la litología a la que pertenece el sitio. El estereograma v contiene los polos de todos los planos de fractura de la zona de estudio.



### **3.6 Interpretación de los perfiles de resistividad eléctrica**

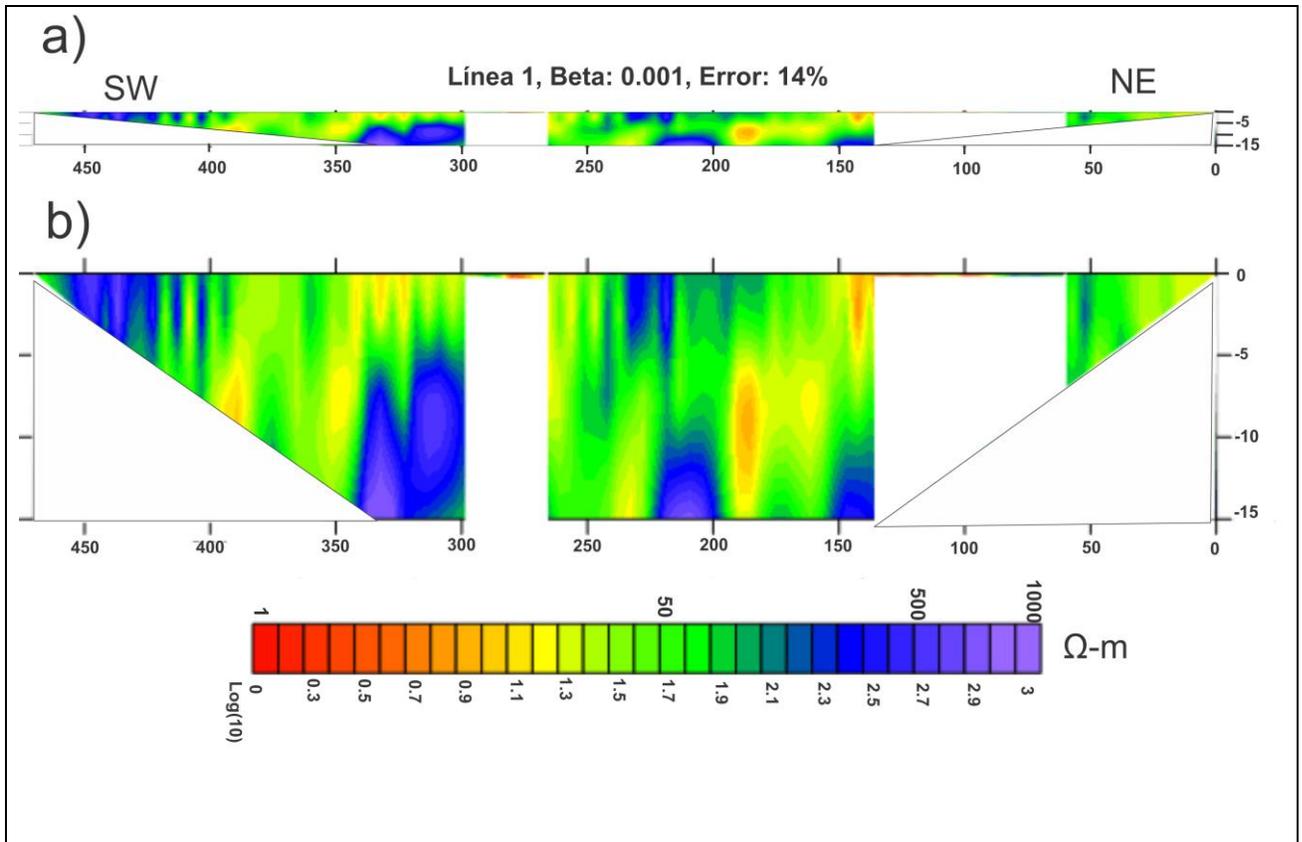
Para conocer el alcance de la penetración de las estructuras en el subsuelo, tales como fracturas y zonas de cizalla, se hicieron perfiles de tomografía eléctrica en donde se observaron las variaciones de la resistividad eléctrica debidas a las discontinuidades geológicas, así como las arcillas depositadas y el contenido de humedad. Se hicieron dos mediciones en los tres taludes analizados, uno antes y otro después de la temporada de lluvias para poder estimar la penetración del agua a través de las discontinuidades geológicas. En la Figura 22 se presenta la localización de los perfiles de resistividad eléctrica, los cuales se ubicaron en dos cortes de taludes en rocas ignimbríticas y uno en graníticas, al noreste del puente del arroyo de Doña Petra. Cabe mencionar que los modelos de resistividad se graficaron a 40 m de profundidad pero, al ver que los cuerpos en su mayoría eran muy resistivos (mayores a 300  $\Omega$ -m) después de los 15m, se decidió graficarlos hasta una profundidad de 15 m donde se consideraba que el peligro es más inminente por sus sus cuerpos verticales de bajos resistivos (hasta 10  $\Omega$ -m).

#### **3.6.1 Modelo de resistividad de la Línea 1**

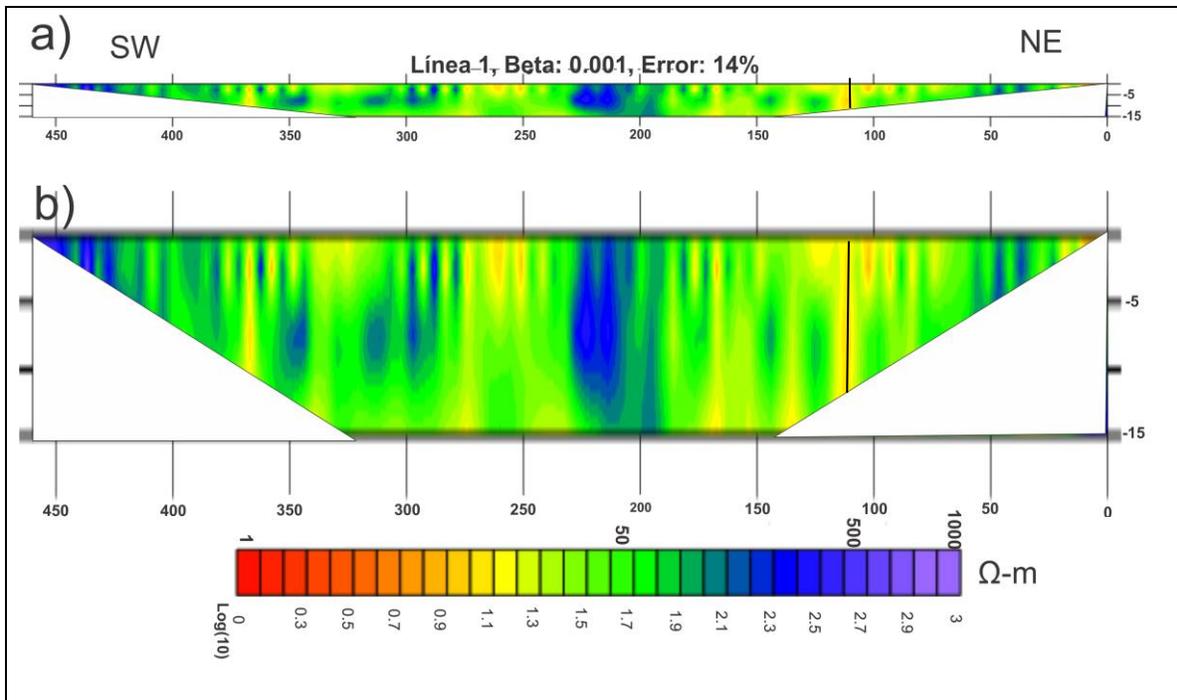
El perfil de resistividad de la Línea 1 es de 450 m, es el más largo y se hizo en un corte de talud de aproximadamente 500 m en rocas de composición ignimbrítica en septiembre de 2014, antes del periodo de lluvias (Figura 23). En el corte carretero las ignimbritas están densamente fracturadas y cizalladas. En algunos lugares las fracturas alcanzan hasta 1 cm de anchura y la alteración argílica es común. Las mediciones se hicieron en el acotamiento de la carretera, iniciando cerca del puente del arroyo Doña Petra, con dirección SW. La separación entre los 28 electrodos fue de 10 m (270 m) por lo que se hicieron dos líneas, haciendo un traslape de 90 m a partir del electrodo 19, para un total de 450 m.

Debido a que los rasgos de conductividad (bajos resistivos) son continuos hasta aproximadamente 15 m de profundidad, los modelos que se presentan en este trabajo tienen ese alcance. La tomografía geoléctrica es trapezoidal y se forma un ángulo de

45° aproximadamente en los bordes de la sección. Como se muestra en la escala de valores de resistividad de la Figura 23, las tonalidades en rojo corresponden a los cuerpos menos resistivos y, en morado, los más resistivos. Se graficaron en escala logarítmica de base 10 para resaltar las resistividades con valores desde 0 a 1000  $\Omega$ -m. En la Figura 23 se presenta en a) el perfil sin exageración vertical y en b) la exageración es 6:1 para resaltar los accidentes geológicos.



**Figura 23. Modelo de resistividad de la Línea 1 efectuada en un corte de talud en ignimbritas. Estas mediciones se hicieron antes de las lluvias, en septiembre de 2014. El perfil tiene 450 m con traslape en  $x=180$ , para cubrir los 500 m de longitud del corte y no perder información en la parte media. Se utilizó un factor de suavizamiento (Beta) de los datos graficados de 0.001. En la escala de colores el rojo corresponde a baja resistividad y el morado valores altos. Los polígonos blancos muestran zonas donde no hubo registro de datos porque un sensor de los veintiocho electrodos no funcionó con propiedad y es zona de información espuria. (a) Modelo sin exageración vertical. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Beta es un coeficiente numérico usado en las ecuaciones de ajuste de las isolíneas de resistividad que sirve para aumentar o disminuir la resolución de la estructura geoelectrica del modelo resultante.**



**Figura. 24. Modelo de resistividad de la Línea 1 efectuada después de la temporada de las lluvias, en junio 2015. (a) Modelo sin exageración vertical. La línea negra representa un lineamiento estructural que puede estar asociado con falla o fractura y corta el corte de talud con orientación NW-SE, interpretado en el MDE. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. La línea negra representa lo mismo que en (a). Nótese que ya no existen los polígonos blancos de la figura anterior en vista de que todos los sensores trabajaron correctamente. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23.**

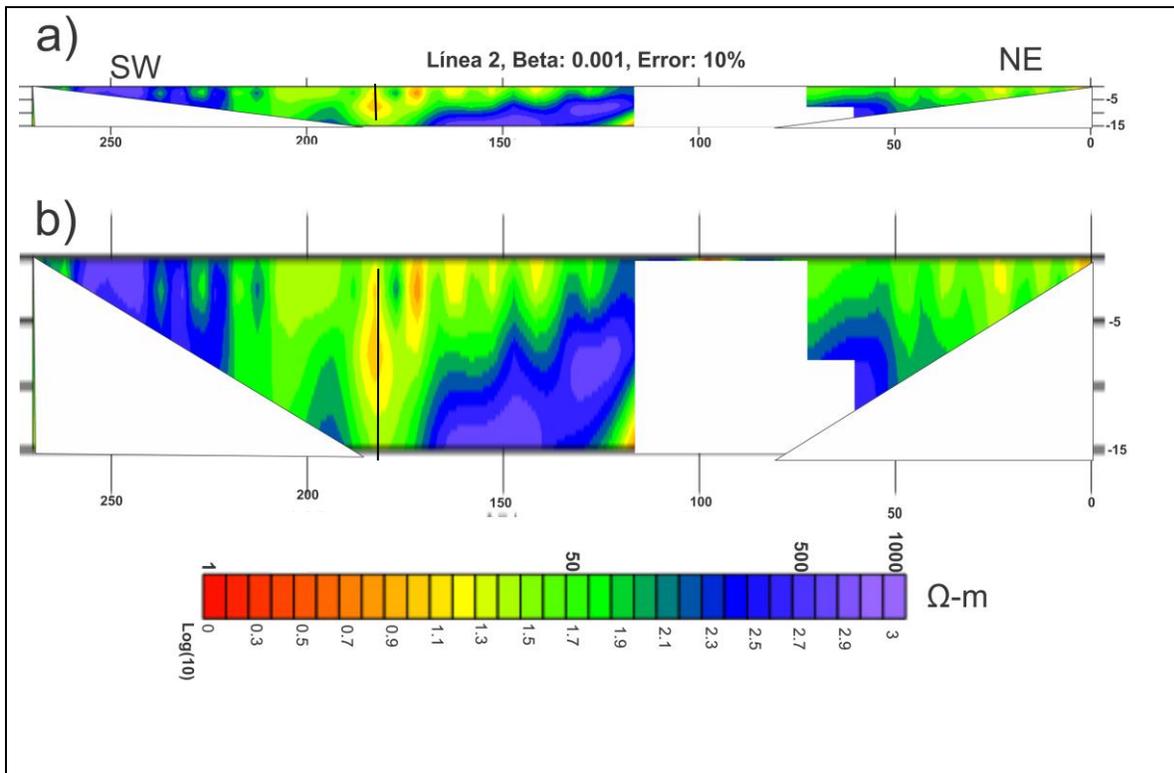
Los sectores en blanco se deben a una falla en uno de los sensores de los cables inteligentes que produjo la pérdida de datos al tener que desactivar dicho sensor. En esas zonas en blanco se oculta información espuria. Se observa que en esta sección que los cuerpos más resistivos con valores mayores de 300  $\Omega$ -m (alrededor de 2.7 en la barra de colores) deben ser ignimbritas sanas. Estas unidades de roca, cuando sus fracturas están rellenas de arcillas posiblemente húmedas, pueden arrojar valores de resistividad del orden de los 30-50  $\Omega$ -m (1.7, en verde). Los rasgos verticales con resistividades menores de 15  $\Omega$ -m (1.3-0; amarillo a rojo) corresponden a fracturas o zonas de cizalla donde el contenido de arcillas es notablemente mayor. Estos minerales, además, deben guardar mayor humedad adsorbida que baja drásticamente la resistividad del medio.

Después de la temporada de lluvias que terminó en marzo de 2015, se repitió en junio el perfil geoelectrico (Figura 24) para observar cambios en la resistividad en las discontinuidades estructurales y poder estimar su permeabilidad y profundidad. En este modelo los sensores funcionaron correctamente, por lo que no hubo pérdida de datos. Se puede observar que los cuerpos menos resistivos (menos de 15  $\Omega$ -m) del perfil de septiembre permanecen y que aparecen algunos nuevos. Cerca de  $x=360$ , 275, 160, 140, 120 y 75 m, se forman cuerpos casi verticales continuos con resistividades menores de 5-15  $\Omega$ -m (color amarillo) que corresponden a arcillas hidratadas. Estos cuerpos verticales se extienden más de 15 m de profundidad, lo que sugiere que la existencia de fracturas o zonas de cizalla de gran penetración. Es importante notar que la masa con resistividad alta entre  $x=300-350$  a 10 m de profundidad de la Figura III.7 desaparece en la sección después de las lluvias de la Figura 24, indicando que se trata de una roca fracturada.

### **3.6.2 Modelo de resistividad de la Línea 2**

El segundo perfil de resistividad se hizo en un talud de composición granítica ubicado en el noreste del puente del arroyo Doña Petra (Figuras 22 y 25). La Figura 25 corresponde a las mediciones de septiembre de 2014. La longitud del tendido eléctrico

es de 270 m y la separación entre electrodos de 10 m. El granito es una roca con poca permeabilidad salvo los lugares donde se encuentra deformada y fracturada. En la mitad del perfil se localiza un arroyo relleno que tiene una alcantarilla que consiste en un colector vertical rectangular de concreto armado de 6 m de longitud desde la superficie hasta el nivel del drenaje en el arroyo. La zona de relleno coincide con un alto resistivo. Hacia el cañón de Doña Petra, en  $x=185$ , resalta un cuerpo conductor o bajo resistivo ( $10 \Omega\text{-m}$ ) de forma vertical que coincide con un lineamiento estructural orientado  $300^\circ$ , por lo que se interpreta que puede corresponder con una zona de cizalla. En la Figura 26, correspondiente al levantamiento después de las lluvias de enero de 2015, dicho bajo resistivo vertical presenta hacia sus costados algunos rasgos que pueden corresponder a fracturas menos penetrativas.



**Figura 25. Modelo de resistividad de la Línea 2 efectuada en la porción de rocas graníticas en septiembre de 2014 antes de las lluvias. En la parte central del perfil se encuentra una zona de relleno en un arroyo en donde se construyó una alcantarilla. Dicha zona coincide con el alto resistivo. Hacia la izquierda, en  $x=185$  el bajo resistivo vertical de  $1 \Omega$ -m coincide con la proyección de un lineamiento estructural, indicada con línea negra en (a) y (b), por lo que se infiere que corresponde a una zona de cizalla. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23.**

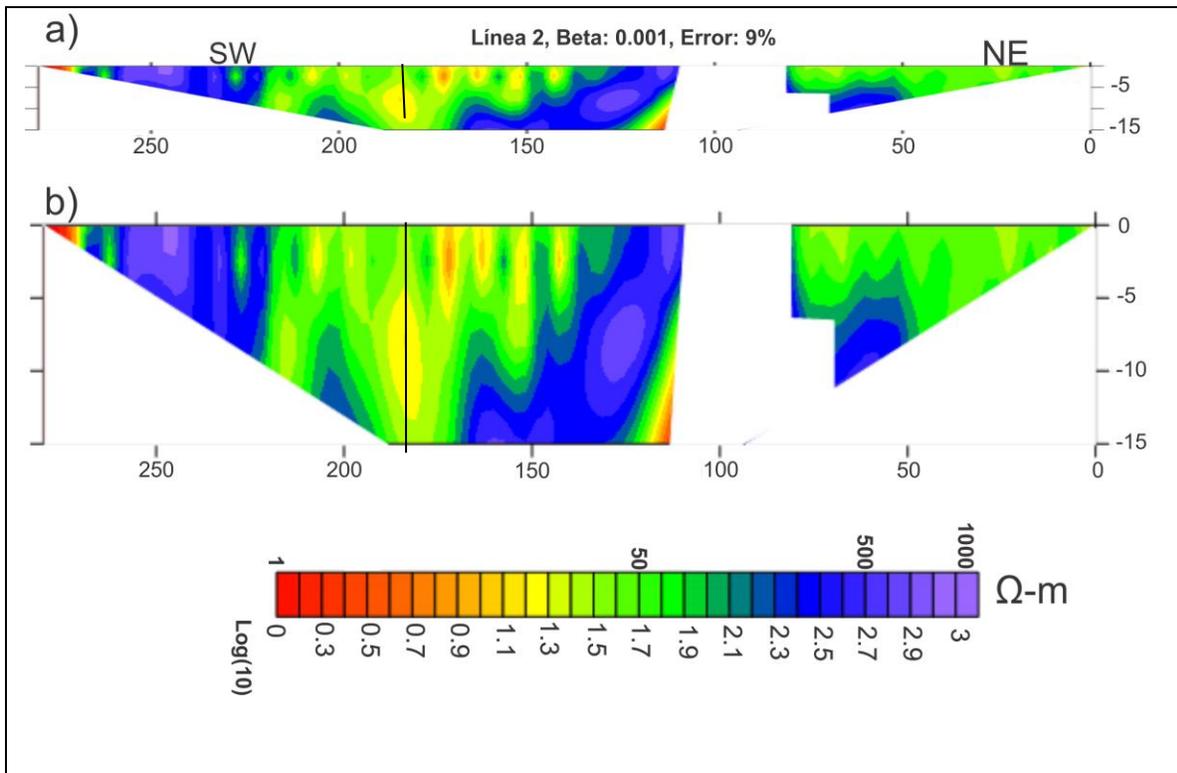
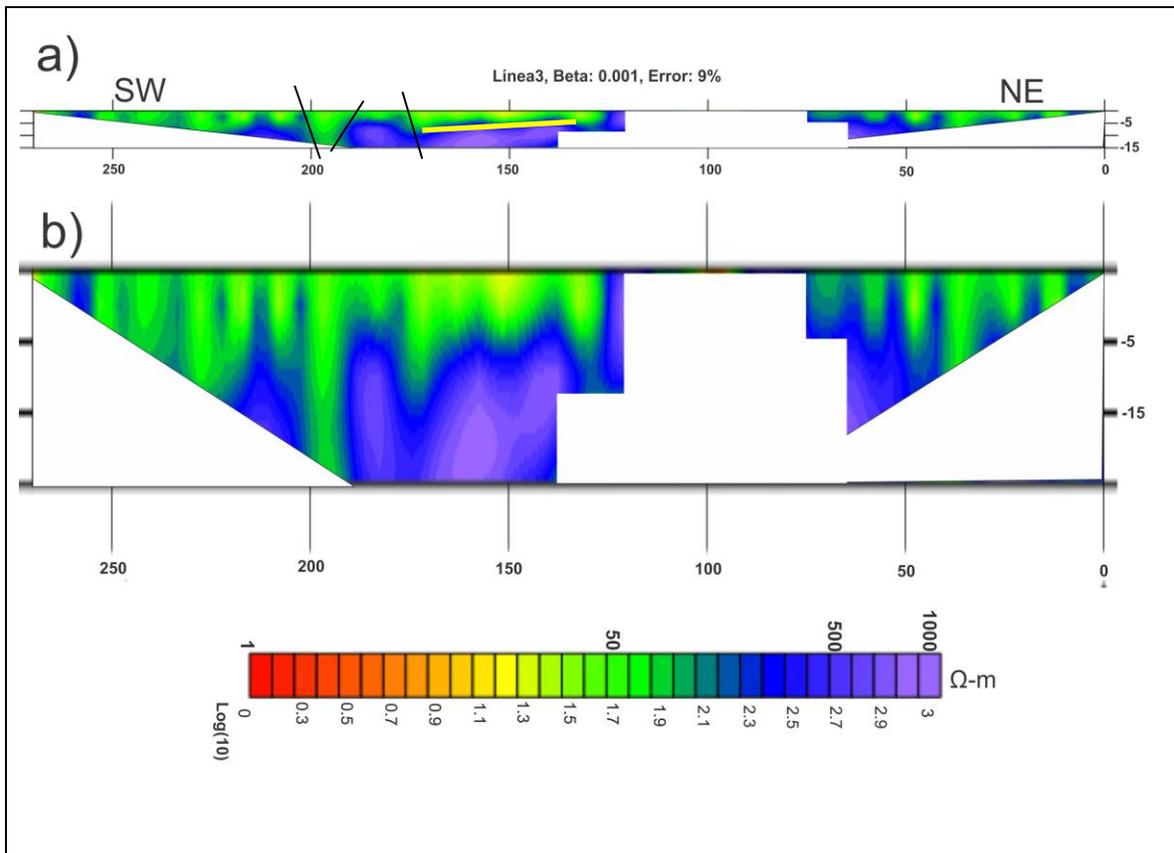


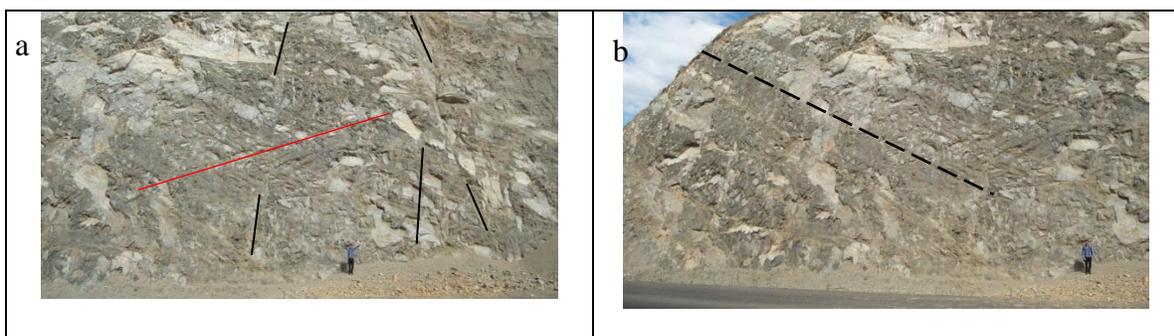
Figura 26. Modelo de resistividad de la Línea 2 efectuada en la porción de rocas graníticas después de las lluvias, en enero de 2015. Como en la Figura 25, se observa la zona de relleno en la parte central del perfil que corresponde a un alto resistivo y hacia la izquierda, el bajo resistivo vertical de  $1 \Omega$ -m que posiblemente se asocia a una zona de cizalla presenta hacia sus costados rasgos que pueden corresponder a fracturas menos penetrativas. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23.

### 3.6.3 Modelo de resistividad de la Línea 3

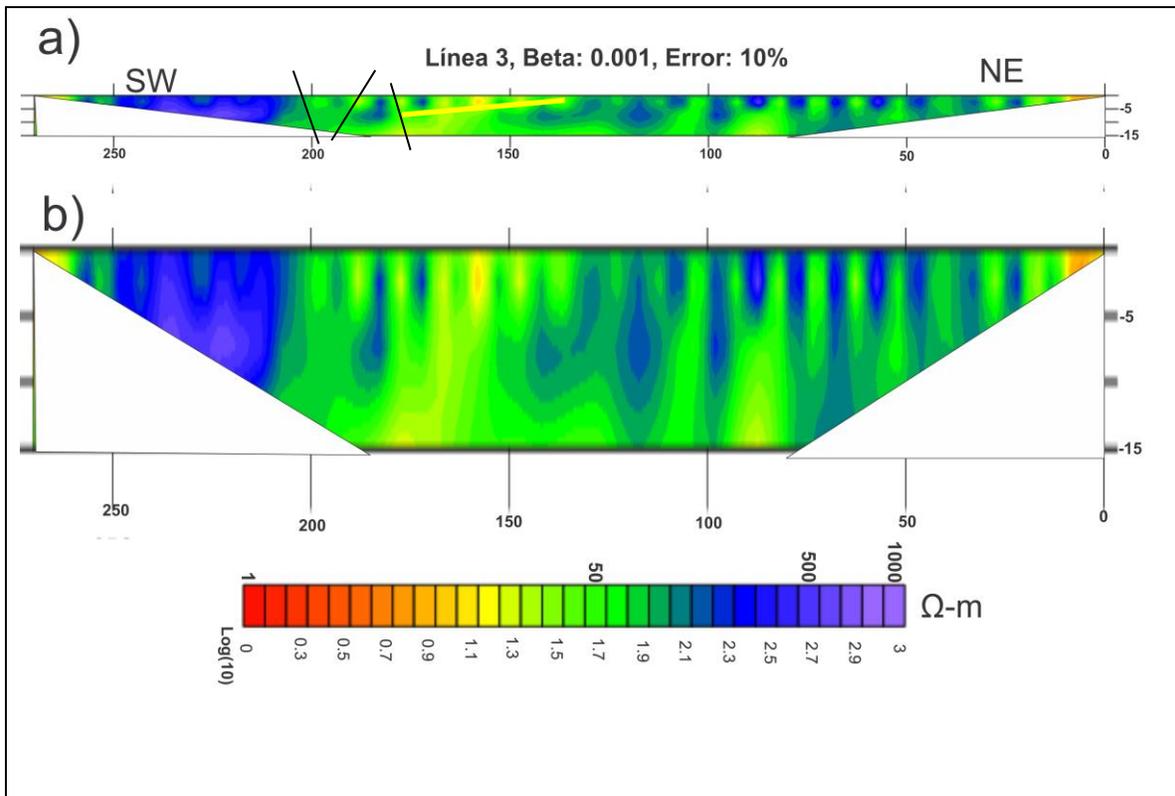
El primer perfil de resistividad de la Línea 3 se levantó en septiembre de 2014 en el acotamiento de un corte de talud en rocas de composición ignimbrítica (Figura 27), antes de la temporada de lluvias. Esta línea tiene 270 m de longitud y el modelo se graficó a 15 m de profundidad. En las paredes expuestas de este corte carretero las ignimbritas muestran una densidad de fracturas menor en comparación con el corte de talud de la Línea 1. La parte inferior del modelo se caracteriza por una litología cuya resistividad es del orden de 300 a 800  $\Omega$ -m. La resistividad disminuye hacia la superficie hasta alrededor de 50  $\Omega$ -m al incrementarse la humedad, pudiéndose definir una frontera subhorizontal buzando hacia el SW que coincide con rasgos de pseudoestratificación de las unidades de ignimbrita. Dicha frontera se interrumpe al “desplazarse” la humedad hacia la parte inferior, con lo que se puede definir la presencia de una falla normal con bloque de techo caído hacia el NE en  $x=175$ . En  $x=190$  los costados de un cuerpo de resistividad del orden de 50  $\Omega$ -m se acuñan hacia el fondo, sugiriendo una zona de cizalla o de alta densidad de fracturas donde el contenido de material arcilloso se incrementa, ya sea por cizallamiento, o por relleno en las fracturas. El lado NE del modelo muestra rasgos verticales notables que coinciden con zonas de fracturas penetrativas, que a su vez coinciden con las aflorantes en los cortes mostrados en la Figura 28. Como en los perfiles anteriores, en éste se hicieron mediciones después de las lluvias y se obtuvo el modelo de resistividad presentado en la Figura 29. Se observa que la humedad penetra por debajo de los 15 m en arreglos de aspecto vertical y, además, se conserva el echado aparente de la pseudoestratificación hacia el SW, así como las zonas de cizalla y de fracturas. Es notable la presencia de un amplio cuerpo resistivo entre  $x= 215$  y  $240$ , el cual debe interpretarse como un cuerpo donde las fracturas inferidas en el perfil de la Figura 27 debieron “sellarse”.



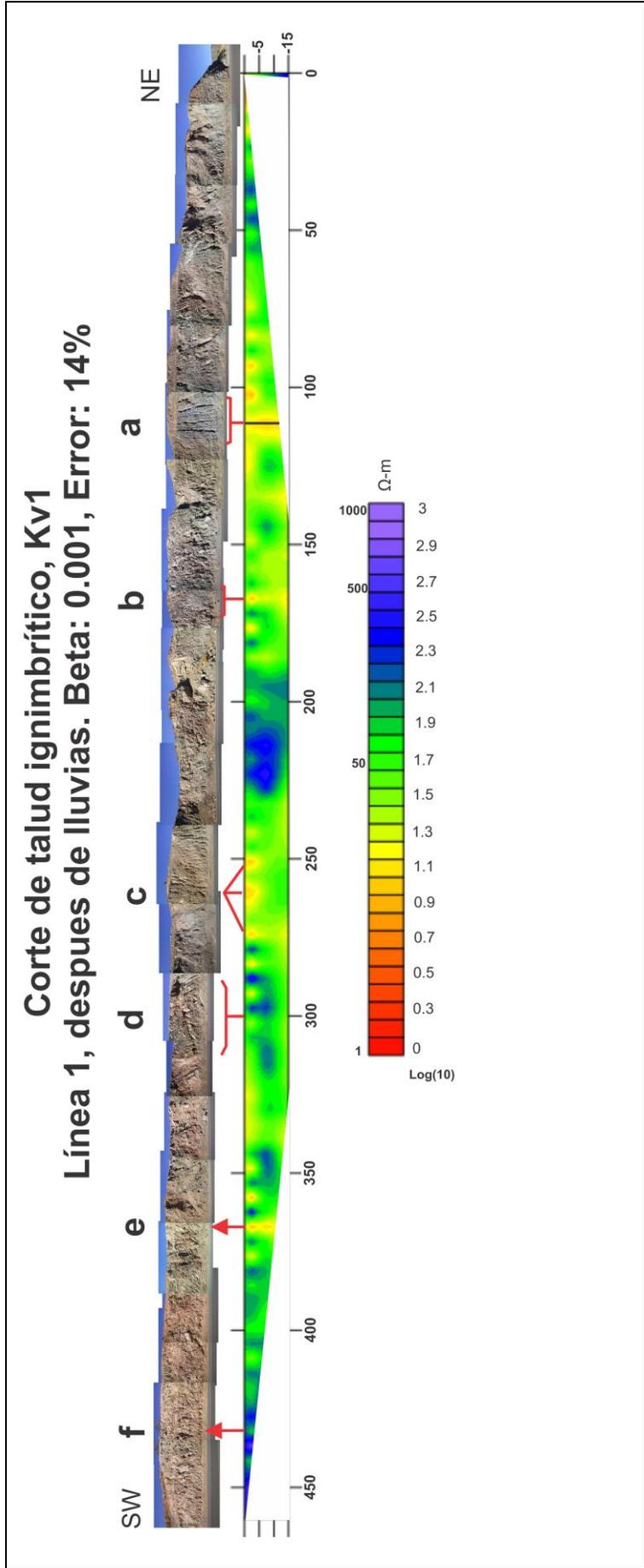
**Figura. 27** Modelo de resistividad de la Línea 3 efectuado en septiembre de 2014 antes de la temporada de lluvias. (a) Modelo sin exageración vertical. Líneas negras muestran fracturas penetrativas importantes en esa área del perfil y la línea amarilla representa seudoestratificación. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Los polígonos blancos muestran zonas donde no hubo registro de datos porque un sensor de los veintiocho electrodos no funcionó con propiedad y es una zona de información espuria. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23.



**Figura 28.** Corte carretero en derrames ignimbríticos seudoestratificados con buzamiento hacia el SW, en la porción NE de la Línea 3. Las fracturas verticales son abundantes y penetrativas, así como algunos planos de cizalla casi verticales marcados con líneas en negro (a) y de bajo ángulo, debido a deformación por compresión marcado con línea roja. Otro ángulo del afloramiento se presenta en (b), indicando con línea discontinua la estratificación aparente de los derrames ignimbríticos.



**Figura 29. Perfil de resistividad de la Línea 3 después de la temporada de lluvias, junio 2015, en un talud de composición ignimbrítica. La longitud del perfil es de 270 m. (a) Modelo sin exageración vertical. Las líneas negras y amarilla representan lo mismo que en Figura 27. (b) Modelo con exageración 1:6 (longitud: profundidad) para resaltar las estructuras o discontinuidades. Nótese que ya no existen los polígonos blancos de la figura anterior en vista de que todos los sensores trabajaron correctamente. Las escalas, dimensiones y factor Beta son como en la Figura 23.**



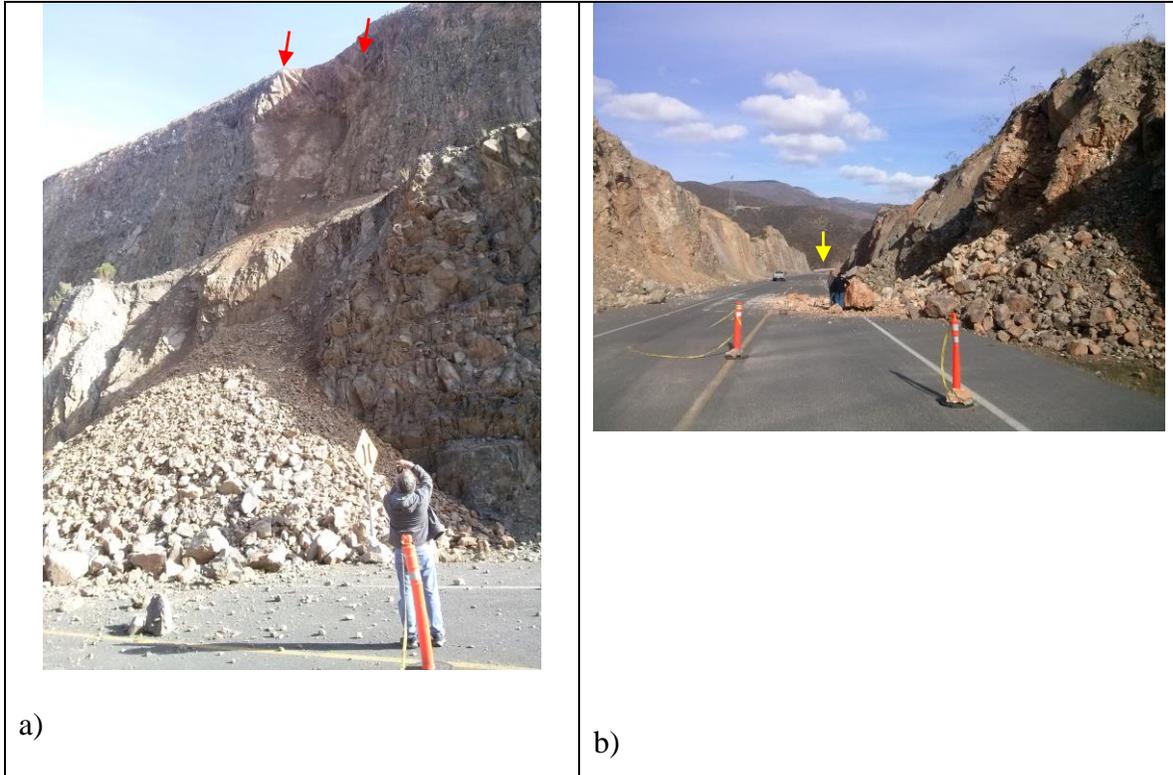
**Figura 30. Mosaico de 24 fotografías del corte carretero de 500 m correspondiente a la línea geoelectrica 1 en cuerpos de rocas ignimbríticas. En la parte inferior se presenta el modelo de resistividad correspondiente, después de las lluvias. Las letras indican zonas con anomalías que se interpretan en términos estructurales y que correlacionan con los afloramientos (ver texto).**

Con la finalidad de visualizar de mejor manera la correlación entre los rasgos estructurales que afloran en los cortes carreteros con la respuesta geoelectrica del subsuelo, en la Figura 30 se muestra un mosaico de veintidós fotografías de Kv1 y el modelo de resistividad de la Línea 1 después de la temporada de lluvias. La litología de este sector es ignimbrítica. Destacan en los perfiles las anomalías verticales de bajos resistivos cercanos a  $10 \Omega\text{-m}$  correlacionados con los rasgos estructurales asociados a la deformación. En la zona a), cuyo centro se localiza en  $x= 120 \text{ m}$ , aflora una zona de cizalla de aproximadamente  $15 \text{ m}$  de ancho en donde la densidad de fracturas aumenta considerablemente. En dichas fracturas pueden presentarse arcillas transportadas durante la permeación de agua de las lluvias, así como efectos de argilitización en fracturas asociadas con el proceso de deformación y cizallamiento. Debido a la escala de la deformación, en el modelo geoelectrico se muestra una penetración profunda en el subsuelo, lo cual facilita el acceso de agua. En la zona b), con el centro localizado en  $x= 170 \text{ m}$ , una zona de cizalla de aproximadamente  $3 \text{ m}$  de ancho, observable en el afloramiento, produce una anomalía angosta, penetrativa y de bajo resistivo de  $12 \Omega\text{-m}$  por debajo de los  $15 \text{ m}$ . En la zona c), localizada entre  $x= 250, 260 \text{ y } 275 \text{ m}$  y a una profundidad de  $5 \text{ m}$  aproximadamente, se presentan tres bajos resistivos. En  $x=250 \text{ m}$  un rasgo vertical de  $12 \Omega\text{-m}$  puede deberse a agua que penetró a través de fracturas desarrolladas por una zona de cizallas. En  $x= 260 \text{ m}$  se presenta otro rasgo vertical de aproximadamente  $10 \Omega\text{-m}$ , que podría relacionarse con la parte central de la zona de cizallas. En  $x=275 \text{ m}$  se encuentra un bajo resistivo de aproximadamente a  $10 \Omega\text{-m}$  que parece extenderse de forma vertical a una profundidad mayor de  $15 \text{ m}$  por lo que este último puede asociarse a una falla o fractura vertical. A  $300 \text{ m}$  del origen del perfil geoelectrico hacia el SW, en la zona d), se define un alto resistivo de  $300 \Omega\text{-m}$  a una profundidad de  $10 \text{ m}$  cuya parte inferior es casi paralela a la estratificación de las ignimbritas. Hacia el NE esta zona estratificada parece estar limitada por una posible falla o fractura, mientras que hacia el SW el cuerpo estratificado parece estar limitado por una amplia zona de fracturas o cizallas con valores de resistividad mayores (entre  $15 \text{ y } 50 \Omega\text{-m}$ ). A  $370 \text{ m}$  del origen de perfil geoelectrico hacia el SW (zona e) en la Figura 30) aflora una zona de falla donde el material rocoso está intensamente fracturado, creando un ambiente idóneo para la precipitación y desarrollo de arcillas. En la zona f), centrada en  $425 \text{ m}$  del origen del perfil geoelectrico, a pesar de las limitaciones del modelo por no tener mucha penetración, los valores altos de

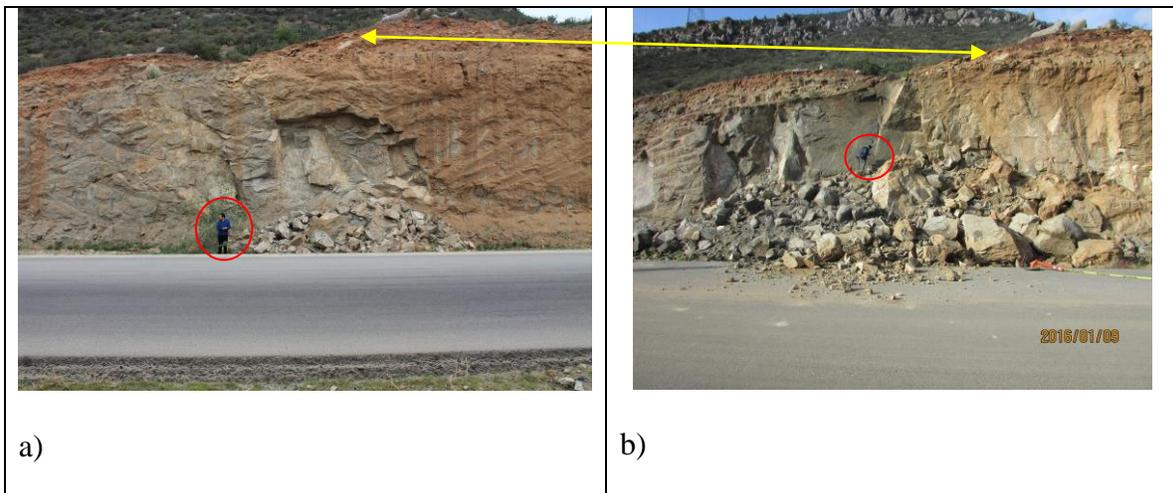
resistividad de 50  $\Omega$ -m sugieren que esa zona está menos deformada. Este análisis solo se pudo hacer en un corte de talud por falta de tiempo.

### **3.7 Ejemplos de accidentes ocasionados por las lluvias de 2015 y 2016**

En concordancia con las expectativas de este trabajo, como lo son la caída de rocas siendo el agua el principal agente promotor se observaron derrumbes en varios sectores de la carretera durante las lluvias ocurridas entre los días 3 al 9 de enero de 2016, los cuales acumularon hasta 89 mm (CICESE, 2016). En la Figura 31 se muestran dos aspectos de flujos de rocas fragmentadas de ignimbritas en el km 13, en la zona de la Línea 1, al SW del puente del arroyo Doña Petra. En el mismo corte de talud ocurrieron tres derrumbes similares. En todos los casos, los cortes con pendiente abrupta, los echados de los planos de fractura hacia el corte, la densidad de fracturas convergentes, acumulación de arcillas rehidratadas en las fracturas y la acción de la gravedad provocaron el movimiento de masa. El material desplazado en casi todos los casos invadió un carril completo. Los derrumbes mostrados en la Figura 31 coinciden con las zonas de resistividades bajas del orden de los 50  $\Omega$ -m, como en  $x=240$  m, y en las que se observan cuerpos verticales de 12  $\Omega$ -m que cortan a más de 15 m de profundidad, como en a, b y c, según el modelo geoelectrico de la Figura 24. Un accidente ocurrido en material granítico se muestra en la Figura 32 en donde, en un corte de aproximadamente 7 m se observa desprendimiento en la pared en una condición seca (Figura 32.a) y, en el mismo lugar, después de las lluvias del 3 y 4 de enero se observa un desprendimiento mayor hacia la izquierda de la referencia marcada con la línea amarilla (Figura 32.b). Antes del desprendimiento mostrado en b) se midieron fracturas con geometría conjugada que fueron las responsables de la forma del desprendimiento (sitios de observación de fracturas q, r y s). Una familia de fracturas buza con echados fuertes a favor del corte. Las fracturas expuestas después de las lluvias y el desprendimiento, mostraban arcilla que penetró en las aberturas y que incluso contenían raíces de arbustos. Se puede pronosticar que las zonas donde ha habido caída de rocas pueden reactivarse si las condiciones, sobre todo de pendiente de corte pronunciada, se mantienen.

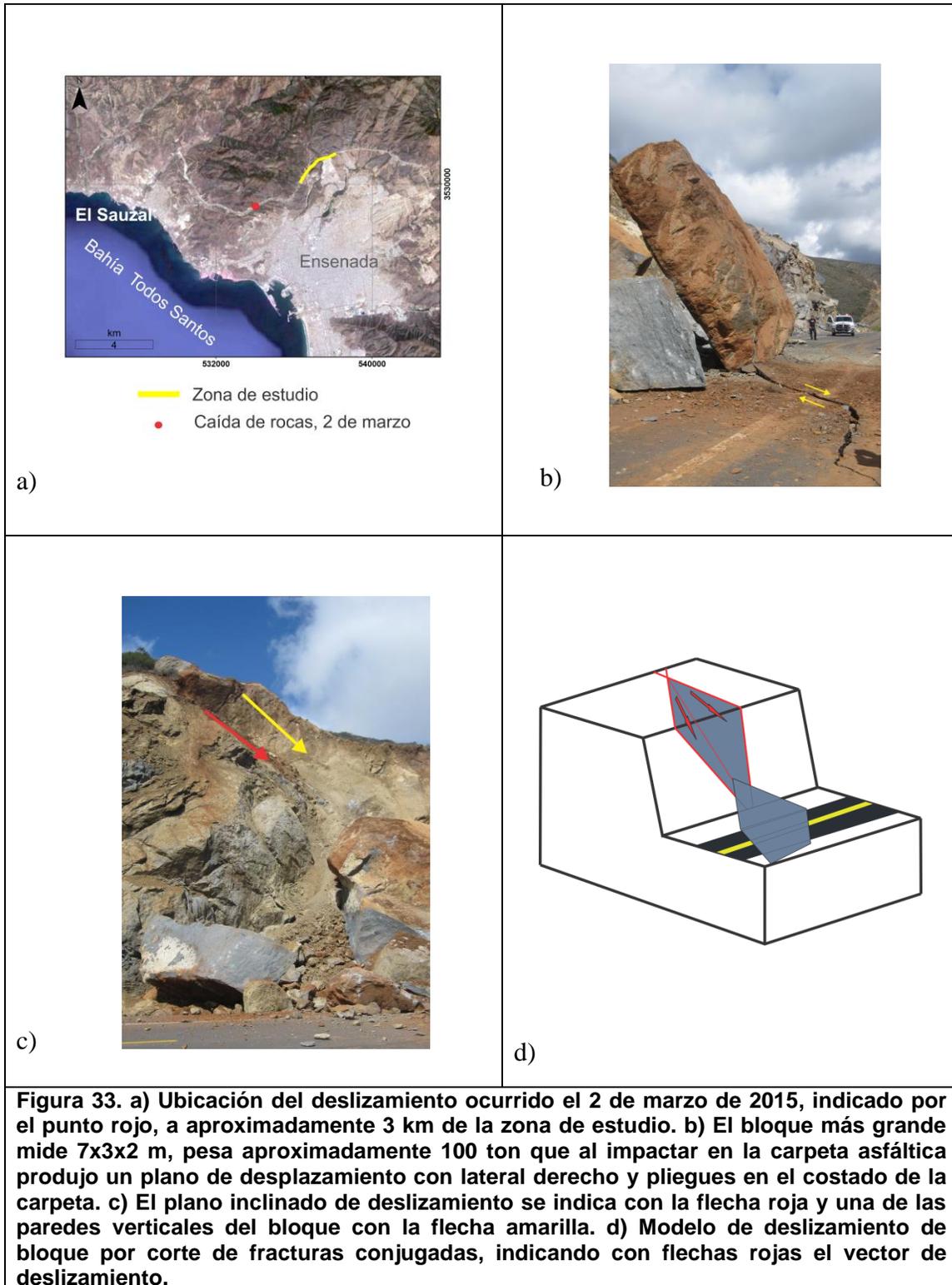


**Figura 31. Derrumbes de fragmentos en ignimbritas en dos cortes del km 13 durante las lluvias del 9 de enero de 2016. Se observa un flujo de detritos más fino en a), el cual está controlado por fracturas dominantes verticales indicadas con las flechas y a la densidad muy alta de fracturas entre las estructuras principales. Además, los planos de estratificación se dirigen hacia la izquierda y hacia el corte del talud. En b) el flujo de detritos es más grueso y los fragmentos están menos intemperizados que en a). La flecha amarilla en la fotografía b) indica el puente sobre el arroyo Doña Petra.**



**Figura 32. Derrumbe ocurrido en el corte carretero del km 15, a 400 m del puente del arroyo Doña Petra, este evento ocurrió a 140 m al NE de la línea 2 de resistividad. a) Caída de bloques en talud granítico antes de las lluvias, en enero de 2015. b) El mismo corte el 9 de enero de 2016 después de las lluvias. La flecha amarilla muestra el mismo punto en el afloramiento.**

Un desprendimiento de rocas particularmente ilustrativo es el que ocurrió el 2 de marzo de 2015 cuando hubo lluvias intensas que alcanzaron los 50 mm. El accidente ocurrió en el km 8, a 3 km al SW de la zona de estudio (Figura 33.a). El sitio muestra claramente el peligro que representa la conjunción de factores geológicos como tipo de roca y sus estructuras primarias y por deformación, la acción antrópica y la lluvia. En la Figura 33.b se muestra la foto de los bloques deslizados, donde el bloque más grande es de aproximadamente 7x3x2 m (aproximadamente 100 ton). El bloque se deslizó a lo largo del plano de fractura inclinado indicado con la flecha gruesa en la Figura 33.c. Dicho plano estaba relleno de arcilla que, al hidratarse durante las lluvias funcionó como lubricante y rompió el estado de reposo del bloque al bajar el coeficiente de fricción en el plano de la fractura. Este caso puede representarse esquemáticamente con un modelo de deslizamiento de un bloque cortado por fracturas conjugadas, como el mostrado en la Figura 33.d.



## Capítulo 4. Discusión

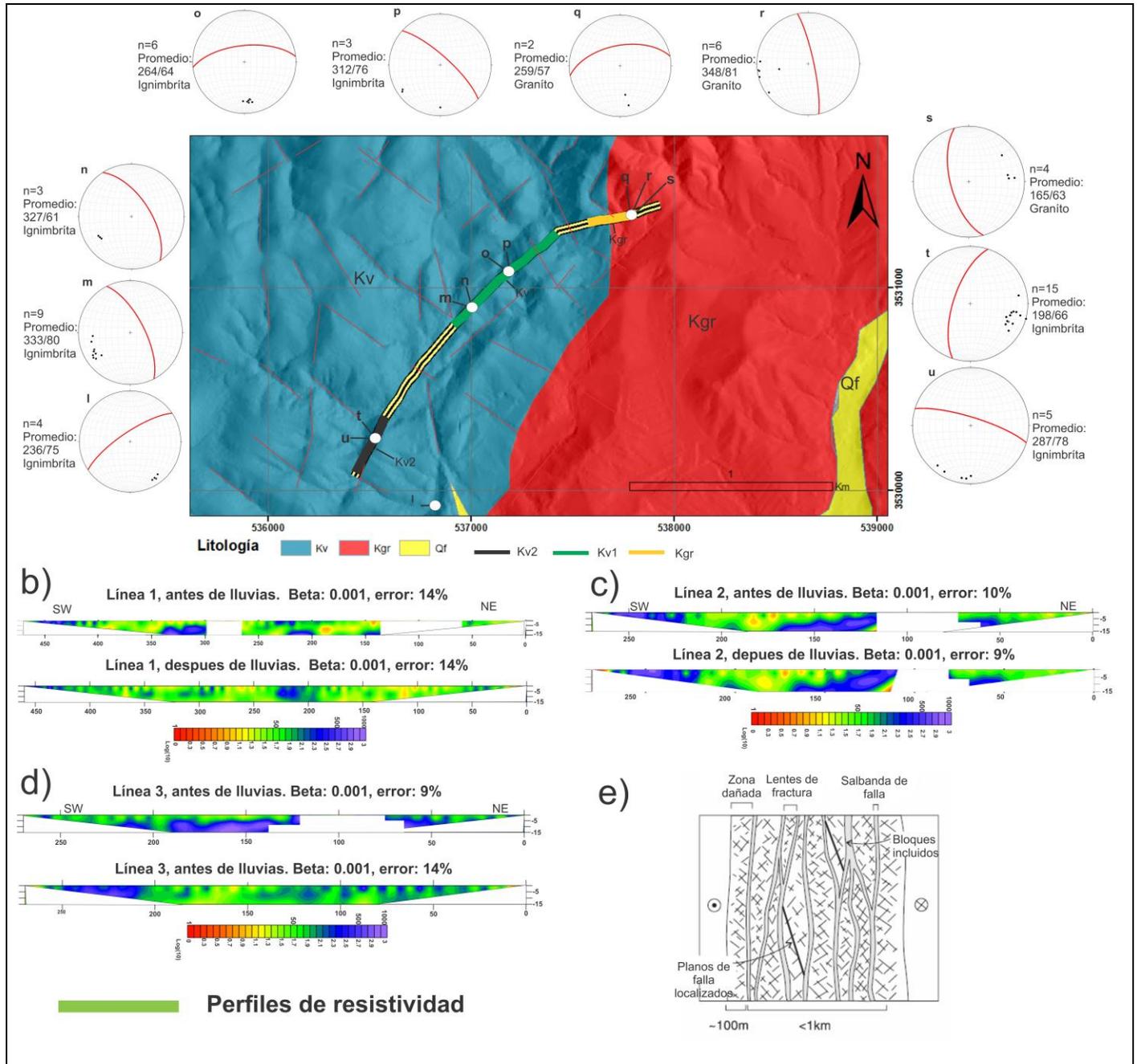
---

Con la finalidad de visualizar de una mejor manera las diferencias estructurales, así como la respuesta geoelectrica del subsuelo antes y después de la temporada de lluvias, en la Figura 34 se muestra la información sobre litología, fracturas y modelos geoelectricos. Esta información integrada facilitará también la visualización del mapa de peligro que representa el objetivo principal de este trabajo.

Se desprende de la Figura 34.a-d que existe una buena correlación entre las zonas de fractura y las zonas donde los valores de resistividad disminuyen. Dichos valores de resistividad baja se asocian con la presencia de arcilla a lo largo de fracturas o cizallas cuyo modelo conceptual se presenta en la Figura 34.e. En el modelo se muestran planos de cizalla y fracturas verticales y en líneas más tenues un arreglo de fracturas que se forman durante la actividad de la zona de falla.

La correlación muestra como el sistema de fracturas que se desarrolla a lo largo de los taludes, se refleja en los perfiles de resistividad, principalmente aquellos con orientación casi N-S. En estos ambientes fracturados se favorece el depósito de arcillas y agua. En temporada seca, con poca humedad (resistividad promedio de 50  $\Omega$ -m) y en temporada de lluvias baja hasta 12  $\Omega$ -m. La alternancia de ambientes de fractura rellenas de arcillas húmedas y roca sana, produce una alternancia de conductor-resistivo en la sección de resistividad, como se muestra en la Figura 34.e. Para integrar toda la información disponible en un mapa que indique bajo un criterio semicuantitativo un valor empírico de peligrosidad de la zona, se elaboró la matriz multicriterio que asigna valores a los siguientes factores: intemperismo, pendiente natural, profundidad del corte de talud (altura), densidad de cizallas, densidad de fracturas y filtración del agua interpretada a partir de los modelos geoelectricos.

Los criterios seguidos para asignar los valores mostrados en la Tabla 1, entre los tres segmentos de la carretera con respecto a los factores mencionados fueron los siguientes: 1) la densidad de fracturas y cizallas en cada sección es la proporción de estas estructuras con respecto al total (todos los datos). A cada una de las secciones se le nombró de acuerdo con su litología, de manera que la sección 1, 2 y 3 se nombran Kv1, Kv2 y Kgr, respectivamente, por estar las dos primeras en ignimbritas y la tercera en granitoides. Las cizallas de Kv1 representan el 67%, en la Kv2 equivalen al 18% y en la sección Kgr al 15%. Asignando un valor de 0 a 3 de acuerdo a esa densidad Kv1

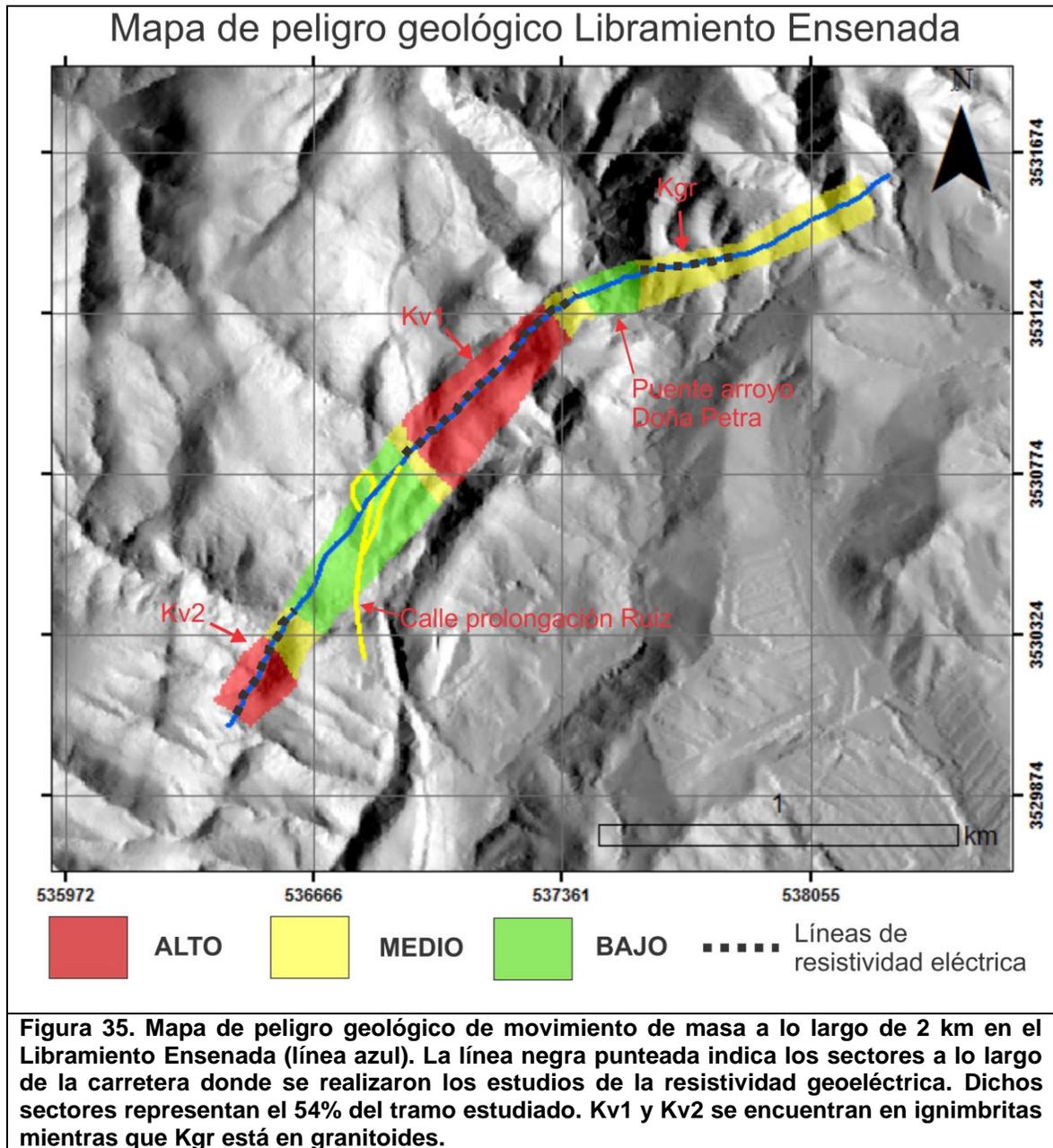


**Figura 34. Síntesis litológica, estructural y geoelectrica. (a) Análisis de fracturas mostrando la correlación observada con los sectores correspondientes a la líneas geoelectricas 1, 2 y 3 (b, c y d, respectivamente). Se observa que dicha correlación es buena entre las zonas de fractura y las zonas donde los valores de resistividad disminuyen, lo que facilita la visualización del peligro a lo largo de este sector de la carretera. El concepto de peligro está íntimamente ligado con el esquema de evolución de sistemas cizallados de Faulkner et al. (2003) mostrado en e) en el que se muestran cizallas verticales relacionadas con una zona de falla lateral izquierda y fracturas en arreglo ortogonal indicadas en líneas más suaves.**

Litología de corte de talud	Kv1	Kv2	Kgr
Cizallas	3	2	1
Fracturas	3	2	1
Intemperismo	2	2	3
Altura de corte	2/1/1	3/2/1	2/1/1
Pendientes	3	3	2
Filtración de humedades	3	1	2
<i>Valor máximo</i>	16	13	11
<i>Valor mínimo</i>	15	11	10

**Tabla 1. Matriz multicriterio para determinar la peligrosidad en el mapa de peligro de la Figura 35. Se nombró a cada corte de talud analizado de la siguiente forma: Kv1 y Kv2 son de composición ignimbrítica; Kgr es de composición granítica. La descripción de los criterios utilizados para asignar valores está en el texto. El 0 representa el valor más bajo de peligro y el 3 el más alto que posteriormente se utilizan en ArcMap de ArcGis 10.3 de ESRI.**

tiene el mayor valor. El criterio seguido para asignar valores a las fracturas es el mismo que el utilizado en el caso de las cizallas. Los valores de intemperismo están en función de la suavidad del relieve como consecuencia de la facilidad del tipo de roca a degradarse. En ese sentido, el valor más alto es el de las rocas volcánicas, seguido del granito. Para conocer la profundidad aproximada de corte del talud, a partir de Google Earth Pro, 2016, se midieron con la herramienta de visualizador de edificios 3D y regla de acceso en 3D. Cabe mencionar que los cortes de talud Kv1, Kv2 y Kgr se hicieron entre el 2011 y 2012. A las alturas de corte se les asignó un valor de acuerdo con el número de rangos de 10 m contenidos. En ese sentido, Kv2 en el SW tiene cortes en rangos de 15-30, 16-20 y 0-10 m, a los que se les asignan valores correspondientes de 3, 2 y 1, respectivamente. Las pendientes con valor de 3 son mayores a 30° y, las de 2, están en el rango de 18° a 29°. El valor de filtración depende de la proporción en área de zonas con resistividad menor a 15  $\Omega$ -m, según se observa en los modelos de resistividad. Los rangos de peligro elegidos a través de la matriz se basan en la suma de los valores mostrados. Por ejemplo, en la sección Kv1, los valores máximo-mínimo son 16-15, respectivamente, mientras que en Kv2 y Kgr son 13-11 y 11-10, respectivamente. El resultado de la integración de valores en celdas de 6.7x 6.7 m manipulados a través de ArcMap de ArcGis 10.3 (ESRI, 2014) se presenta en la Figura 35. Los rangos Bajo, Medio y Alto de la Figura IV.3 corresponden a los rangos de valor 0-12, 13-14 y 15-16, respectivamente. Es importante destacar que en el mapa existen zonas sin datos de los factores contemplados, cuyo valor será 0, por ejemplo, en los puentes de la prolongación de la calle Ruiz y el del arroyo Doña Petra, así como los sectores en donde no hay información geoelectrica del subsuelo y su valor de filtración de humedad es 0. Es muy importante hacer notar que de los 2000 m estudiados a lo largo de la carretera, sólo el 54% tiene cubrimiento geoelectrico. Esas zonas, en su mayoría, aparecen en el mapa de peligro de la Figura 36 en los rangos medio y bajo, debiéndose considerar que esos sectores están subestimados en su valor de peligro. La información integrada en el mapa de peligro muestra que la zona de peligro alto en la sección Kv1 tiene cerca de 500 m de longitud y disminuye a peligro medio hacia sus extremos. Como en la sección anterior, en Kv2, casi toda la sección se clasifica como de peligro alto. El rango de peligro de la sección Kgr es medio, así como la sección que continúa hacia el NE, lo que significa que algunos sectores de esa parte final del tramo



trabajado podrían tener valores de peligro más altos si se contara con información del subsuelo.

Destaca del análisis de la Figura 35 que las zonas de valor medio que se localizan en los costados de las zonas de valor alto coinciden con zonas donde se presentan lineamientos estructurales notables, todos orientados en alrededor de  $300^\circ$ , por lo que es importante darle seguimiento a lineamientos similares en otros sectores de la carretera que no pudieron cubrirse en este estudio.

La experiencia de haber trabajado antes y después de la temporada de lluvias fue muy importante para reconocer que el principal agente disparador de movimiento de masa de roca es el agua cuando se combina con los factores geológicos.

Es importante mencionar de nuevo que el peligro indicado en el mapa sólo es para el Libramiento Ensenada. La vulnerabilidad en este momento es significativa para la infraestructura carretera y el escaso tránsito vehicular.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

- Las rocas volcánicas ignimbríticas son rígidas y reaccionan a la deformación de forma similar a las rocas graníticas.
- Existe una buena correlación entre los lineamientos estructurales interpretados a partir del Modelo Digital de Elevación e imágenes satelitales y las estructuras asociadas con zonas de falla medidas en el campo. En dichas zonas de falla la densidad de fracturas es notablemente mayor.
- La deformación secundaria debida a zonas de cizalla es independiente del tipo de roca y determinan la densidad y geometría de las fracturas.
- Los taludes con pendientes abruptas pueden ser estables, siempre y cuando sus estructuras de discontinuidades estructurales no se inclinen en dirección de las pendientes del corte de talud.
- Los sistemas conjugados de fracturas, sobre todo si son penetrativos, son eficientes promotores de los deslizamientos y derrumbes en casos de pendientes pronunciadas.
- Las zonas de cizalla con alta densidad de fracturas son zonas donde la permeabilidad secundaria se incrementa de forma importante según muestran los rasgos verticales profundos de baja resistividad eléctrica.
- La resistividad de la roca disminuye notablemente en zonas donde se incrementa el contenido de arcillas, como en las zonas de cizalla. La resistividad característica en rocas sanas es del orden de los 300 a 800  $\Omega$ -m, mientras que en las zonas de cizalla en temporada seca disminuye a 50-70  $\Omega$ -m. Después de los periodos de lluvia la resistividad en las mismas zonas cizalladas baja hasta 10-20  $\Omega$ -m.
- Los modelos de resistividad indican que por debajo de los 40 m las zonas de fractura están lo suficientemente cerradas por la presión confinante que la permeabilidad se reduce de forma importante.
- Basado en la matriz de valores de peligro elaborada usando los datos de cizallas, fracturas, intemperismo, altura de corte, pendientes y filtración de

humedades obtenidas en este trabajo de tesis, se evaluó el peligro geológico de movimiento de masa a lo largo del tramo carretero estudiado. Se obtuvo peligro alto para Kv1 y aproximadamente la mitad de Kv2 en sentido NE-SW y medio para el resto de dicho corte de talud, al igual que medio para Kgr.

- Basando en los resultados de este trabajo, se recomienda que se identifiquen los bloques con discontinuidades con echado hacia los cortes de talud ubicados, en su mayoría, en las zonas evaluadas como zonas con peligro geológico alto y medio, para que sean removidos por ser susceptibles a deslizarse bajo eventos de lluvia o sísmicos.

## Lista de referencias bibliográficas

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D. (2013). Stereonet v. 9.2.0  
Recuperado de:  
<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>
- Almendinger, R. (2013). FaultKin 6  
Recuperado de:  
<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/faultkin-5-beta.html>
- Aragón-Arreola, M. J. (1994). Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la ciudad de Tijuana, B.C., México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, 124 p.
- Arosio, D., Longoni, L., Mazza, F., Papini, M. and Zanzi, L. (2013). Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring. In *Landslide Science and Practice*, Springer Berlin Heidelberg, 385-390 p.
- Billings, M. P. (1972). *Geología estructural*. Buenos Aires. EUDEBA, (2<sup>th</sup> ed.). 564 p.
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de la Baja California, México. *GEOS*, 22 (1), 37-42.
- Cruz-Castillo, M. y Delgado-Argote, L. A. (2000). Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. *GEOS*, 20 (4), 418-432.
- Delgado-Argote, L. A., Hurtado-Brito, J. C., Avilez-Serrano, P. y Gómez-Castillo, G. (2012). Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: El Caso del Fraccionamiento Jardines de Agua Caliente. *GEOS*, 32 (2), 1-25.
- Deer, W., Howie, R. and Zussman, J. (2013). *Introduction to the rock-forming minerals*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, (3<sup>th</sup> ed.). 498 p.
- Earth Resource Mapping. (2006). ER Mapper 7.1. Recuperado de:  
<http://earth-resource-mapping.software.informer.com>
- Faulkner, D. R. (2003). On the internal structure and mechanics of large strike-slip faults zones: field observations of the carboneras fault in southeastern Spain. *Elsevier Science*, 367 (3), 235-251.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press, 480 p.
- Gastil, R. G., Phillips, R. and Allison, E. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1-201 p.

- Harding, T. P. (1974), Petroleum traps associated with wrench faults. *The Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58 (7), 1290-1304.
- Highland, L., Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook - a guide to understanding landslides*. U.S.A. U.S. Geological Survey, 129 p.
- Hill, M. L. (1959). Dual classification of faults. *The Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 43 (1), 217-237.
- Méndez-Delgado, S., Gómez-Treviño, E. and Pérez-Flores, M. A. (1997). Forward modeling of direct current and low-frequency electromagnetic fields using integral equations. *Geophysical Journal International*. 137 (2), 336-352.
- Pérez-Flores, M. A., Méndez-Delgado, S., and Gómez-Treviño, E. (2001). Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, 66 (4), 1067-1081.
- Pérez-Flores, M.A. y Delgado-Argote, L.A. (2014). Resistividad y cargabilidad eléctricas en función de los rasgos geológicos en la zona de deslizamiento del km 93 de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, para TGC geotecnia S.A. de C.V., (informe confidencial).
- Ragan, D. M. (2009). *Structural geology, an introduction to geometrical techniques*. Cambridge University Press (4<sup>th</sup> ed.). 632 p.
- Reynolds, J. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley and Sons, 806 p.
- Sharma, P.V. (1986). *Geophysical methods in geology*. Elsevier Science (2<sup>th</sup> ed.). 442 p.
- Sylvester, A. G., Smith, R. R. (1976). Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas fault zone, Salton Trough, California. *The Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 60 (12), 2081-2102.
- Tchalenko, J.S. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. *The Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 81 (6), 1675-1640.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press, 792 p.
- Twiss, R.J., Moores, E.M. (1992). *Structural geology*. W. H. Freeman and Company (2<sup>th</sup> ed.). 532 p.
- Volkwein, A., Shellengberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, . Dorren, L. K. A., Gerber, W. and Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, 2617-2651.

Yong Technology Inc. (2015). GeoRose 0.5.1. Recuperado de:  
<http://www.yongtechnology.com/download1/georose/>