



**Estudio preliminar sobre las condiciones
que motivaron el deslizamiento de bloques
en la zona del Cerro de la Virgen,
ruta provincial N°43.
Chos Malal, Provincia del Neuquén**

Dirección Museo Olsacher - Alberto C. Garrido

Serie Contribuciones Técnicas
Peligro Geológico - Boletín N° 02

**Estudio preliminar sobre las condiciones
que motivaron el deslizamiento de
bloques en la zona del Cerro de la Virgen,
ruta provincial N°43.**

Chos Malal, Provincia del Neuquén

Dirección Museo Olsacher - **Alberto C. Garrido**

Zapala, 2023

Gobernador

Gobernador de la Provincia del Neuquén: Cr. Rolando Figueroa

Vicegobernadora

Vicegobernadora de la Provincia del Neuquén: Téc. Gloria Ruiz

Ministerio de Energía y Recursos Naturales

Ministro de Energía y Recursos Naturales: Ing. Gustavo Medele

Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos

Subsecretario de Energía, Minería e Hidrocarburos: Ing. Fabricio Gulino

Dirección Provincial de Minería

Director Provincial de Minería: Lic. Carlos Portilla

Sugerencia de referencia bibliográfica

Garrido (A.C.). 2023. Estudio preliminar sobre las condiciones que motivaron el deslizamiento de bloques en la zona del Cerro de la Virgen, ruta provincial N°43. Chos Malal, Provincia del Neuquén. Dirección Provincial de Minería. Serie Contribuciones Técnicas - Peligro Geológico, Boletín N° 02: 32 p. Zapala, Neuquén.

Dirección Provincial de Minería

Elena de la Vega 4721 (8340)

Zapala | Neuquén | Argentina

Tel: (0299) 449 - 4626

halucesoli@neuquen.gov.ar

Contenido

Resumen.....	6
Introducción	8
Metodología y alcance del trabajo	8
Contexto geológico regional del área de estudio	8
Descripción geológico-estructural del Cerro de la Virgen	11
Descripción y tipología del derrumbe.....	15
Factores que habrían propiciado el deslizamiento de bloques.....	16
Hipótesis sobre la mecánica del deslizamiento.....	24
Posibilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos	26
Consideraciones finales	28
Referencias y material bibliográfico consultado.....	29

Resumen

El cerro de la Virgen corresponde estructuralmente a un pliegue sinclinal vinculado al desarrollo del frente de deformación de la faja plegada y corrida de Chos Malal. En su extremo meridional, región por donde transcurre la nueva traza de la ruta provincial N° 43, se desarrolla una antiforma interpretada como un anticlinal de rampa; cuyo origen se atribuye a la acción del campo de esfuerzos generados por la actividad del lineamiento estructural de Cortaderas.

El cierre periclinal del mencionado anticlinal, es responsable de la estructuración de la secuencia rocosa aflorante en este sector; cuyas características estratigráficas, sedimentarias y estructurales, inciden negativamente en las condiciones de estabilidad del macizo rocoso.

El derrumbe sucedió con fecha 01/08/2023, afectó parte de la nueva traza de la ruta provincial N° 43, estimándose provisoriamente un volumen de roca desplazada del orden de los 7.800 m³. Acorde a la clasificación de Varnes, dicho fenómeno corresponde en términos técnicos a un deslizamiento de bloques, esto es, un deslizamiento rocoso de tipo traslacional, en el que el movimiento consiste en una sola unidad o unas pocas unidades estrechamente relacionadas que se mueven pendiente abajo como una masa relativamente coherente (USGS, 2004).

Los principales factores que contribuyeron al proceso generador del deslizamiento; estuvieron regulados en gran medida por los factores estructurales y la íntima combinación de los factores estratigráficos y sedimentarios. Las principales superficies de debilidad estructural se encuentran materializadas en el terreno por los planos de estratificación de la secuencia sedimentaria y la presencia de un juego de fallas de 4° orden, cuyos planos cortan a los primeros de manera cuasi ortogonal. Esta configuración y disposición espacial de las superficies de debilidad, sumado a un buzamiento de los estratos dispuestos en el sentido de la pendiente del relieve, genera que los bloques resultantes resulten gran medida afectados en su estabilidad por la acción de la fuerza de gravedad. El sistema de diaclasas desarrollado en este sector, jugaría un rol complementario (pero importante) en la generación de las condiciones de inestabilidad del macizo.

El contraste de competencia dado entre los distintos componentes litológicos de las rocas sedimentarias presentes en el sector, juegan asimismo un rol fundamental en las condiciones de inestabilidad del macizo rocoso. En este sentido, la superficie de

deslizamiento (o superficie de ruptura) sobre la cual se produjo el efecto de “resbalamiento”, coincide con una superficie de contacto estratigráfico el que, a su vez, marca un límite físico entre dos tramos de dos sucesiones sedimentarias caracterizadas por poseer distintas cualidades de comportamiento geomecánico.

La presencia de humedad, ha sido también un factor de gran incidencia en la mecánica del deslizamiento. La infiltración en el terreno de aguas meteóricas se habría producido a través de los planos de fallas de 4° orden y las fracturas del sistema de diaclasas. Una posible baja permeabilidad del estrato sobre cuyo contacto superior se desarrollara la superficie de deslizamiento, habría posibilitado la generación de una delgada película de agua sobre la misma; actuando de esta forma como agente lubricante.

Asimismo, los trabajos de desmonte (remoción de terreno) realizados durante la ejecución de la obra de la ruta, dejaron expuesto el horizonte rocoso sobre el cual posteriormente se generó la superficie de deslizamiento. El descalce y exposición de dicho horizonte, también habría cumplido un rol determinante en la generación del deslizamiento; debido principalmente a la extracción de material soporte que contribuía al sostenimiento de los bloques rocosos en ese sector.

El tramo de la ruta comprendido entre las coordenadas 37°21'48.0"S / 70°16'51.4"O y 37°22'11.0"S / 70°17'6.2"O, debe ser considerado como de alta inestabilidad; razón por la cual debe evitarse y prohibirse todo tipo de circulación sobre este sector. Dadas las condiciones de inestabilidad observadas en el terreno, existe la posibilidad cierta de ocurrencia de nuevos deslizamientos de similares características al del evento del 01/08/2023, factor que podría verse potenciado ante la ocurrencia de nuevas precipitaciones sobre la región.

Previo a cualquier acción de tareas de remoción de material sobre este sector; debe realizarse un nuevo estudio geotécnico que permita evaluar y caracterizar objetiva y técnicamente las condiciones de estabilidad del macizo rocoso.

Finalmente, se deja expresado se contemple y evalúe la posibilidad de proceder al cambio de la traza de la ruta sobre esta área. La nueva traza, debería evitar o alejarse de la zona correspondiente al cierre periclinal de la antiforma desarrollada sobre el sector meridional del cerro de la Virgen.

Introducción

El día martes 1 de agosto de 2023, aproximadamente a horas del mediodía, se produjo un deslizamiento de rocas sobre el pie de la ladera suroriental del cerro de la Virgen, adyacente al casco urbano de la ciudad de Chos Malal, en la Provincia del Neuquén (fig. 1). Dicho evento ocasionó la remoción de material rocoso sedimentario, cuyo volumen ha sido estimado (de forma preliminar) en el orden de los 7.800 m³. La deposición y acumulación final de dicho material, se produjo sobre la calzada de la ruta provincial N°43 (en su tramo nuevo); cortando la circulación vehicular y dejando un lamentable saldo de cuatro personas heridas.

Ante este suceso, se solicitó a la Dirección Provincial de Minería de la Provincia del Neuquén (DPM), la asistencia de un profesional (geólogo) perteneciente a esta repartición; con el objetivo de realizar una inspección ocular (expeditiva) que permita identificar las posibles causas del deslizamiento y, fundamentalmente, establecer de manera cualitativa las condiciones de estabilidad del macizo rocoso.

En el presente informe, se expone las observaciones y consideraciones del caso.

Metodología y alcance del trabajo

Las tareas de campo se realizaron durante las últimas horas de la tarde del día martes 1 y horas de la mañana del día miércoles 2 de agosto de 2023.

La inspección sobre el terreno se efectuó de manera ocular, con un recorrido que abarcó tanto a la zona afectada como a la región adyacente (faldeos oriental y suroriental del cerro de la Virgen). Los instrumentos utilizados para el relevamiento consistieron en brújula Brunton, piqueta y cámara fotográfica. Tal lo expresado, el presente informe es de alcance preliminar y carácter expeditivo.

Contexto geológico regional del área de estudio

El cerro de la Virgen, forma parte de una extensa estructura orogénica conocida en la literatura geológica como “faja corrida y plegada de Chos Malal” (Ramos, 1978; Ramos *et al.*, 2011). Esta región, se caracteriza por encontrarse sujeta a una intensa deformación tectónica, factor que se vincula a la subducción existente entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. La existencia además en esta área de un elevado flujo calórico cortical,

induce a una disminución en la rigidez flexural de la pila sedimentaria; factor que incrementa el potencial de deformación de los macizos rocosos existentes en esta región (Sigismondi, 2012).

Estructuralmente, el cerro de la Virgen es definido como un sinclinal (“sinclinal de Chos Malal”; Frías Saba et al., 2021), el cual se encuentra a su vez limitado por fallas o fracturas regionales de 1°, 2° y 3° orden (ver fig. 1). Entre éstas, se destaca el denominado “lineamiento de cortaderas”, definido como una faja de fracturación basamental vinculada a la estructuración inicial de la Cuenca Neuquina (fractura de 1° orden). Dicho lineamiento, opera como límite estructural entre regiones que ofrecen diferentes estilos de deformación, así como en el grado y tipo de actividad magmática desarrollada (Ramos y Folguera, 2005).

La aquí denominada Falla del Curi Leuvú, junto a las fallas del Mayal y Loma Verde; conformarían un sistema de fracturas de 2° orden, vinculadas a corrimientos epidérmicos que regulan la formación y diseño de las estructuras plegadas de gran escala observadas en superficie. Las fallas Tricahuera y Maitenes, son inferidas a través de los rasgos morfológicos y estructurales del relieve. Ambas son consideradas como fracturas de 3° orden, originadas como consecuencia de la reacomodación espacial de los bloques estructurales mayores, e infiriéndose para las mismas la existencia de un rechazo del orden de los metros a las pocas decenas de metros.

Las fracturas de 4° orden solo son observadas a escala de afloramiento. Se trata de juegos de fallas locales con escaso rechazo vertical, situados en el orden de los cm a pocos m de desplazamiento (generalmente <6 m). Estas fallas menores, son originadas como respuesta la acción del juego de esfuerzos compresivos y distensivos producidos sobre la zona de charnela y limbos de las estructuras plegadas.

Finalmente, las diaclasas son consideradas como fracturas de 5° orden. Por definición, no existe en este tipo de fracturas desplazamientos de cizalla medibles. Las diferentes familias de diaclasas presentes en los afloramientos, son intersectadas y cortadas por las fracturas de 4° orden.

Para un entendimiento más profundo de las condiciones tectónicas y estructurales regionales del área de estudio, se remite al interesado a los siguientes trabajos: Turienzo *et al.* (2014, 2018, 2020), Sánchez *et al.* (2014, 2015, 2018), Lebinson *et al.* (2015, 2018, 2020), Rojas Vera *et al.* (2015), Irastroza *et al.* (2019) y Frías Saba *et al.* (2021).

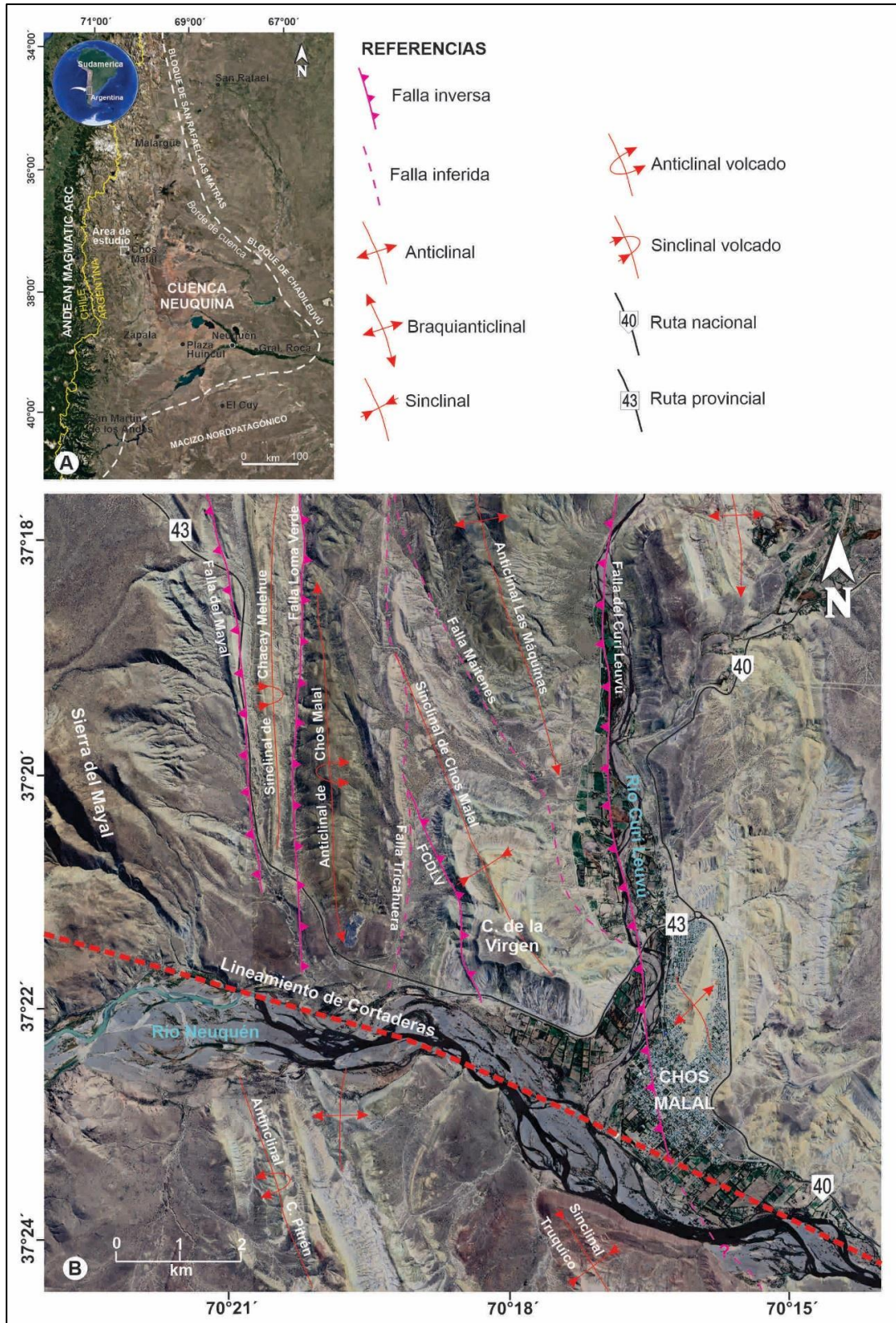


Figura 1. A) Esquema de ubicación general del área de estudio. B) Imagen satelital del área de estudio. Se señalan las principales estructuras tectónicas existentes en la región circundante al cerro de la Virgen (FCDLV= Falla Cerro de la Virgen). Fuente de la imagen satelital: Google Earth (imagen satelital de fecha 10/07/2022).

Descripción geológico-estructural del Cerro de la Virgen

Tal lo arriba señalado, el cerro de la Virgen es definido estructuralmente como un sinclinal originado por un conjunto de corrimientos que afectan a los depósitos mesozoicos de la Cuenca Neuquina, formando parte de un complejo sistema de deformación de piel fina (Frías Saba et al., 2021). El mismo, posee un eje axial orientado en sentido NO-SE y ligeramente inmerso en su extremo noroccidental (fig. 2). Las dimensiones de la estructura

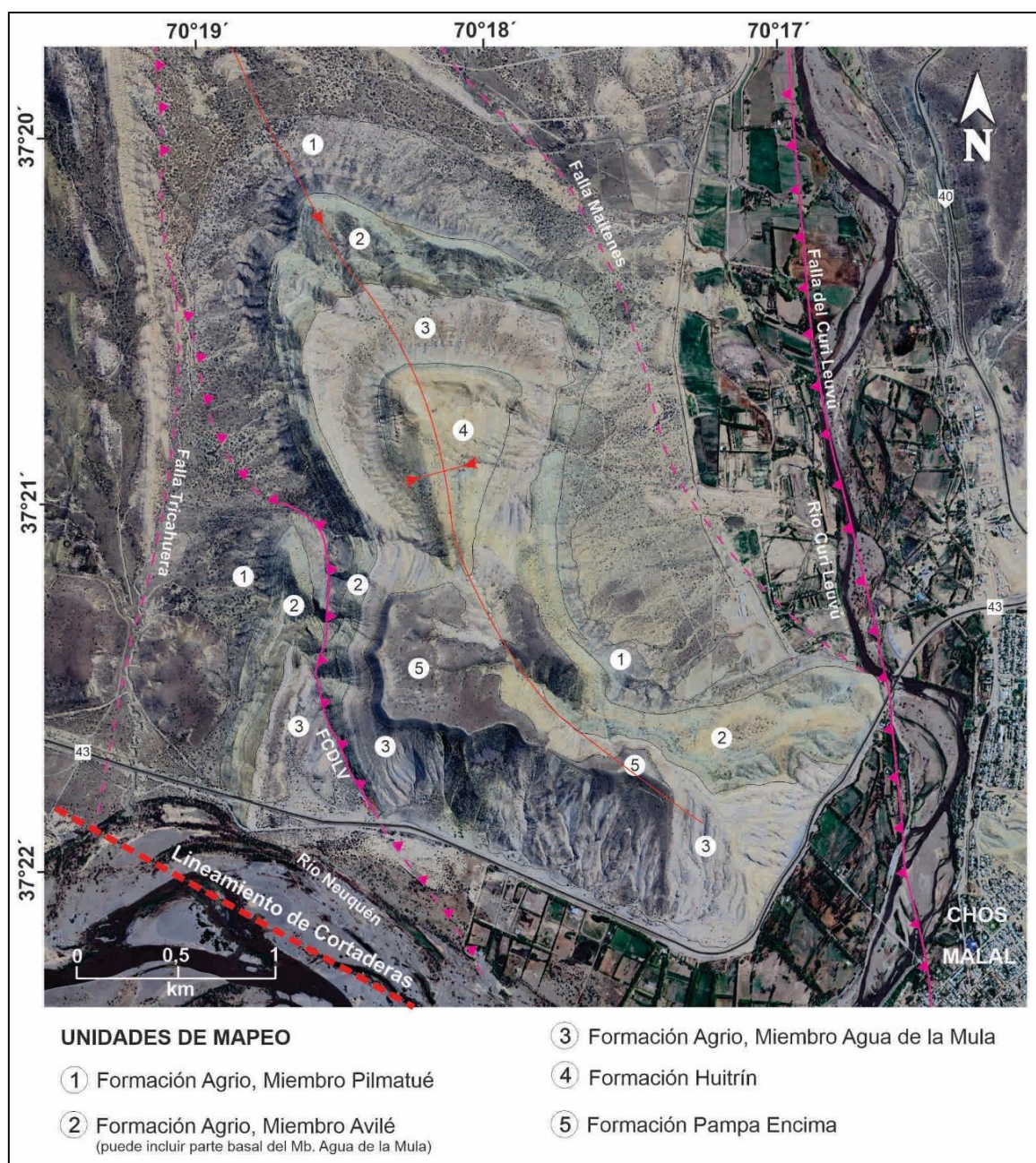


Figura 2. Esquema interpretativo estructural y litoestratigráfico del cerro de la Virgen. Fuente de la imagen satelital: Google Earth (imagen de fecha 10/07/2022).

aflorante, alcanza los 4.720 m de longitud y un ancho máximo (en su sector meridional) de 3.460 m. La altura máxima en relación a su nivel de base local (desnivel) es de 287 m.

Más allá de su configuración general de tipo sinclinal, el cerro de la Virgen posee una conformación estructural mucho más compleja. En una vista perpendicular a su eje axial, llama la atención el desarrollo de un “abovedamiento” de sus estratos, lo que da lugar a una configuración de menor escala de tipo antiformal (fig. 3). Esta segunda estructura se encuentra subordinada a la primera, sin embargo, adquiere preponderancia en el extremo meridional del cerro; sector sobre el cual se produjo el deslizamiento.

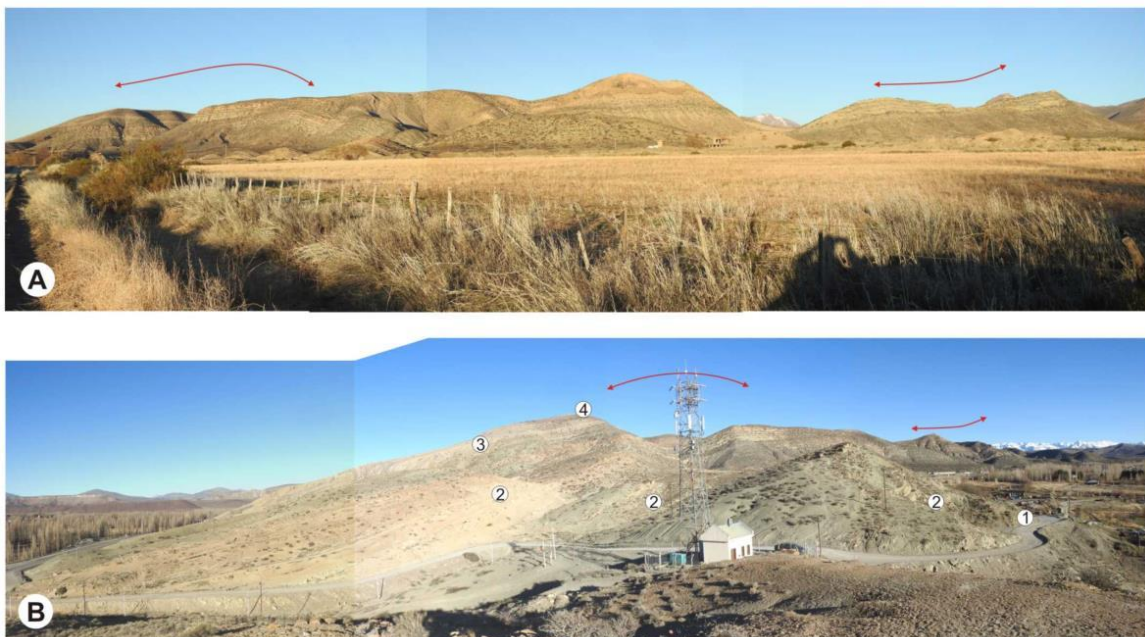


Figura 3. Vistas generales del cerro de la Virgen en su flanco oriental. A) Imagen tomada aproximadamente desde el punto $37^{\circ}20'10.1''\text{S} / 70^{\circ}17'10.2''\text{O}$ con dirección de visión orientada hacia el SO. B) Imagen tomada desde el punto $37^{\circ}21'30.1''\text{S} / 70^{\circ}16'43.2''\text{O}$ con dirección de visión orientada hacia el O. Las referencias numéricas en esta imagen, se corresponden con las señaladas en la figura 2.

Las imágenes satelitales (3D) exhibidas en la figura 4, nos permite realizar algunas interpretaciones sobre los factores que inciden en los cambios observados en la configuración estructural de la sucesión sedimentaria. En las mismas, se aprecia la traza (en vista lateral) de la denominada falla cerro de la de la Virgen (FCDLV) (ver también fig. 2), así como la estructura antiformal desarrollada sobre el bloque superior de la falla; el cual conforma, en definitiva, el cuerpo principal del cerro.

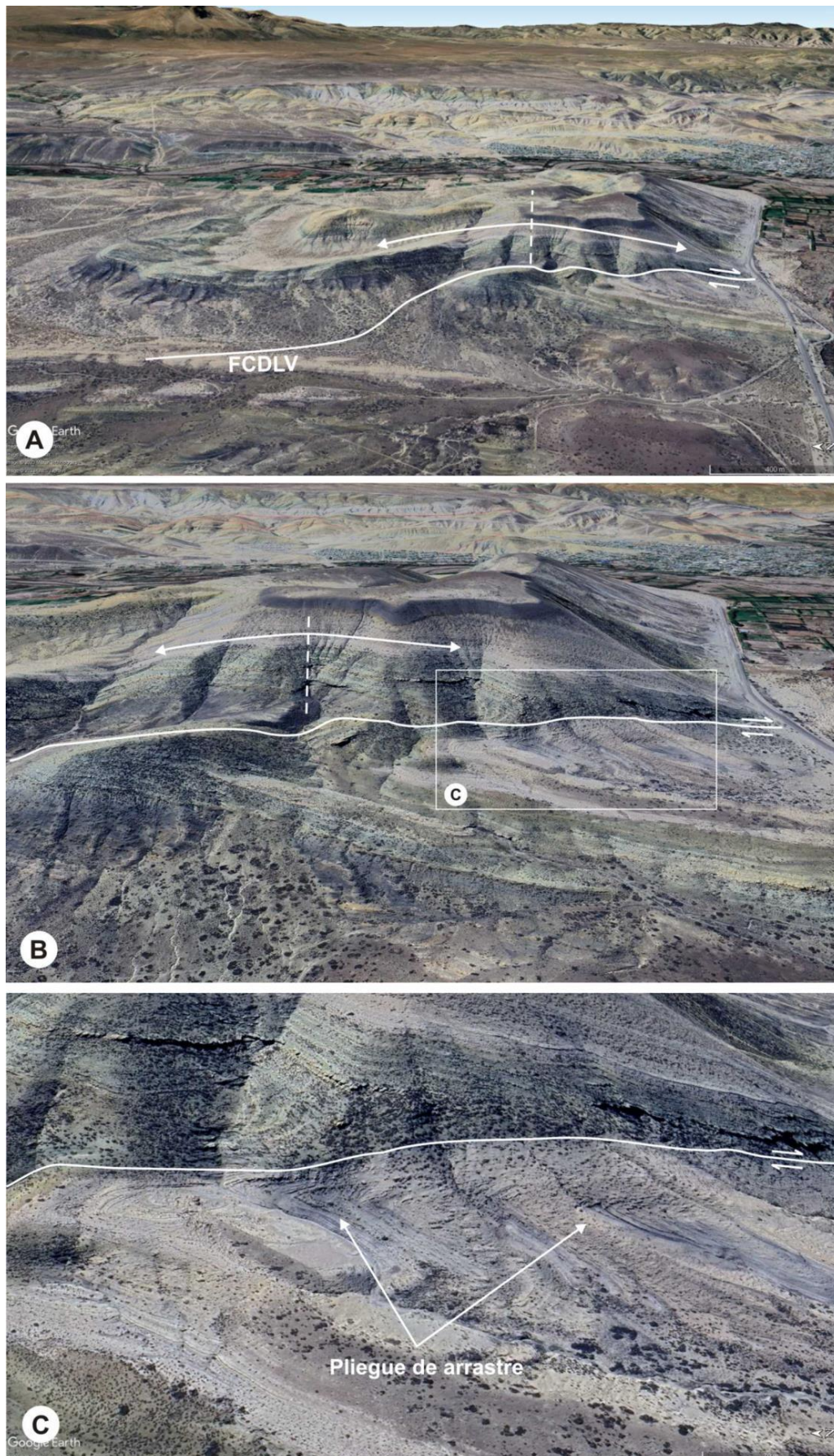
Sobre el plano alto del bloque inferior, se aprecia el desarrollo de pliegues de arrastre (fig. 4 B y C); denotando una configuración de falla de tipo inversa con una marcada componente de desplazamiento en dirección sur para el caso del bloque superior.

Estas características, permiten interpretar a la estructura antiformal como un típico anticlinal de rampa, producto de un sobrecorrimento que afecta en superficie a los estratos del Cretácico Inferior, aquí representados por depósitos de las formaciones Agrio y Huitrín (ver también fig. 2).

Si bien el análisis sobre la cinemática que gobierna el desarrollo de estas estructuras excede ampliamente los alcances de este informe; se hipotetiza que la estructura sinclinal (de mayor escala), obedece su origen a esfuerzos compresivos dirigidos de oeste a este, ligados a la evolución del frente de corrimiento de la faja corrida y plegada de Chos Malal y materializado en el terreno por la traza de la falla del Curi Leuvú.

Por otro lado, el sobrecorrimento materializado por la falla cerro de la Virgen, generador a su vez de la estructura antiformal (anticlinal de rampa) que configura el sector meridional del cerro epónimo; podría tener vinculación en su desarrollo con la dinámica generada por el lineamiento de Cortaderas. En este sentido, el dominio de esfuerzos compresivos dirigidos aproximadamente en sentido norte-sur (ortogonal a los anteriores), coincide con las observaciones realizadas por Cobbold y Rossello (2003) para dicho lineamiento al sur de Huantraico (cerro Tormenta), y el cual es interpretado por dichos autores como un cabalgamiento con vergencia al nor-noreste

Figura 4 (página siguiente). Vista del flanco occidental del cerro de la Virgen e interpretación de las principales estructuras tectónicas observadas a diferentes escalas. FCDLV= falla cerro de la Virgen. Fuente de la imagen satelital: Google Earth.



Descripción y tipología del derrumbe

Se entiende por derrumbe, en un concepto general, a un fenómeno por el cual un determinado volumen de suelo y/o roca se moviliza, cae o desplaza pendiente abajo por pérdida de estabilidad y bajo los efectos de la fuerza de gravedad.

Acorde a la clasificación de Varnes (1978), el fenómeno ocurrido en el cerro de la Virgen corresponde en términos técnicos a un deslizamiento de bloques; esto es, un deslizamiento rocoso de tipo traslacional, en el que el movimiento consiste en una sola unidad o unas pocas unidades estrechamente relacionadas que se mueven pendiente abajo como una masa relativamente coherente (USGS, 2004).

En la figura 5A, se observa el acúmulo correspondiente al pie del deslizamiento, yacente sobre la calzada del nuevo tramo de la ruta provincial N° 43 (coordenadas del sitio: 37°21'57.7"S / 70°16'55.8"O). La altura máxima alcanzada por el acúmulo de bloques, se estima en el orden de los 10 m. En las figuras 5B y 5C, se aprecia la corona y escarpa principal del deslizamiento. El cuerpo principal, se encuentra desplazado aproximadamente unos 25 m respecto a la escarpa principal.

La imagen de la figura 5D, muestra el extremo frontal del deslizamiento. En él, se aprecia el efecto de arrastre generado sobre los elementos de la infraestructura vial (postes de luz, guardacarriles y cartelaría). Esta particularidad, permite inferir que el desplazamiento inicial del volumen rocoso se produjo bajo la forma de un cuerpo compacto y coherente.

Dada las características expeditivas del relevamiento, no ha sido posible tomar mediciones precisas que permitan realizar cálculos certeros respecto al volumen total del material rocoso desplazado. Si bien ha trascendido públicamente una estimación de este volumen inferido en el orden de los 30.000 m³; el cálculo preliminar realizado sobre la base de la estimación del área afectada (realizada a través de Google Earth) y la asignación de un espesor medio de 6 m para el bloque afectado, permite arribar a un volumen total de aproximadamente 7.800 m³. De todas maneras, cada una de estas estimaciones deben ser evaluadas y calculadas con mediciones precisas obtenidas en el terreno.



Figura 5. A) Acúmulo del cuerpo frontal o pie del deslizamiento. B) Escarpa principal (a la derecha) y parte del cuerpo principal (a la izquierda). Nótese el espacio resultante entre ambos elementos. C) Detalle de la escarpa principal y corona del deslizamiento. D) Extremo frontal del deslizamiento. Los elementos de la infraestructura vial, fueron arrastrados por el mismo.

Factores que habrían propiciado el deslizamiento de bloques

Dentro del contexto geológico-estructural arriba descripto, el sitio del deslizamiento se ubica sobre la zona del cierre periclinal del anticlinal de rampa, desarrollado en el sector meridional del cerro de la Virgen. Precisamente, en este sector, el buzamiento de los

estratos regula la configuración morfológica del terreno; existiendo de esta manera una relación de paralelismo entre el sentido de inclinación de los estratos y la pendiente del relieve. Esta particularidad, constituye uno de los principales factores que incide negativamente en la condición de estabilidad del macizo rocoso.

Sobre la base de las condiciones y atributos estructurales y litológicos de este sector, se puede esbozar una zonificación referida al grado de peligrosidad ante la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos de bloques, próximos al tramo de la traza de la ruta provincial N° 43 que rodea al cerro de la Virgen (fig. 6). Si bien se trata de un boceto primario y expeditivo, permite visualizar que la zona definida como de alta peligrosidad relativa, es precisamente donde se ha producido el deslizamiento. No obstante, es necesario aclarar que en la zona caracterizada como de peligrosidad relativa moderada, puede sucederse además otro tipo eventos; tales como deslizamientos rotacionales y flujos de detritos.

El flanco lateral derecho del deslizamiento de bloques (considerado según el sentido del movimiento) se encuentra “abierto”, es decir, no existe una cicatriz o escarpe lateral de la superficie de rotura, debido a la existencia de un cauce fluvial efímero el cual ha provocado un corte erosivo natural en el terreno. En este sentido, en la figura 7 se puede apreciar los diferentes cauces efímeros existentes en el sector considerado de mayor peligrosidad relativa, los cuales cortan a las rocas estratificadas generando un subconjunto de cuerpos rocosos aflorantes (bloques o macizos), identificados como C1 a C5; siendo además el cuerpo rocoso C3, susceptible de ser subdividido en bloques menores.

La figura 7B (según imagen satelital de fecha 10/07/2022), muestra un detalle de la zona afectada por el deslizamiento. En ella se señala (de forma aproximada), la superficie correspondiente al mencionado deslizamiento de bloques; el cual afectó el costado meridional del cuerpo rocoso C1. El cauce efímero que separa a los cuerpos C1 y C2, expone en su margen derecha las características litológicas y estructurales de los depósitos sedimentarios yacentes en ese sector; oficiando como imagen especular de las condiciones originales presentes el sector afectado del cuerpo C1.

La imagen de la figura 8 muestra dichas exposiciones, donde se destacan una serie de atributos estratigráficos, sedimentarios y estructurales cuyas características inciden, de manera primaria, en las condiciones de estabilidad de los bloques que conforman a los cuerpos rocosos en este sector.



Figura 6. Boceto de zonificación de peligrosidad de deslizamientos para el flanco meridional del cerro de la Virgen. Fuente de la imagen satelital: Google Earth (imagen de fecha 10/07/2022).

Los planos de estratificación, corresponden a extensas superficies de discontinuidad a través de las cuales se suceden diversos cambios composicionales y texturales de los sedimentos que conforman la secuencia sedimentaria; factor que los destaca como importantes superficies de debilidad estructural. El predominio de superficies de estratificación con contactos de tipo neto y planares, sumados a una dirección de buzamiento cuasi paralelo a la inclinación del relieve, son factores que sin dudas actúan en grado sumo y de forma negativa en la condición de estabilidad del macizo rocoso. Cabe

agregar que el valor angular del buzamiento en la parte baja de este sector (sector medio a izquierdo de la figura 8A), varía entre los 20° a 25° en dirección SE.

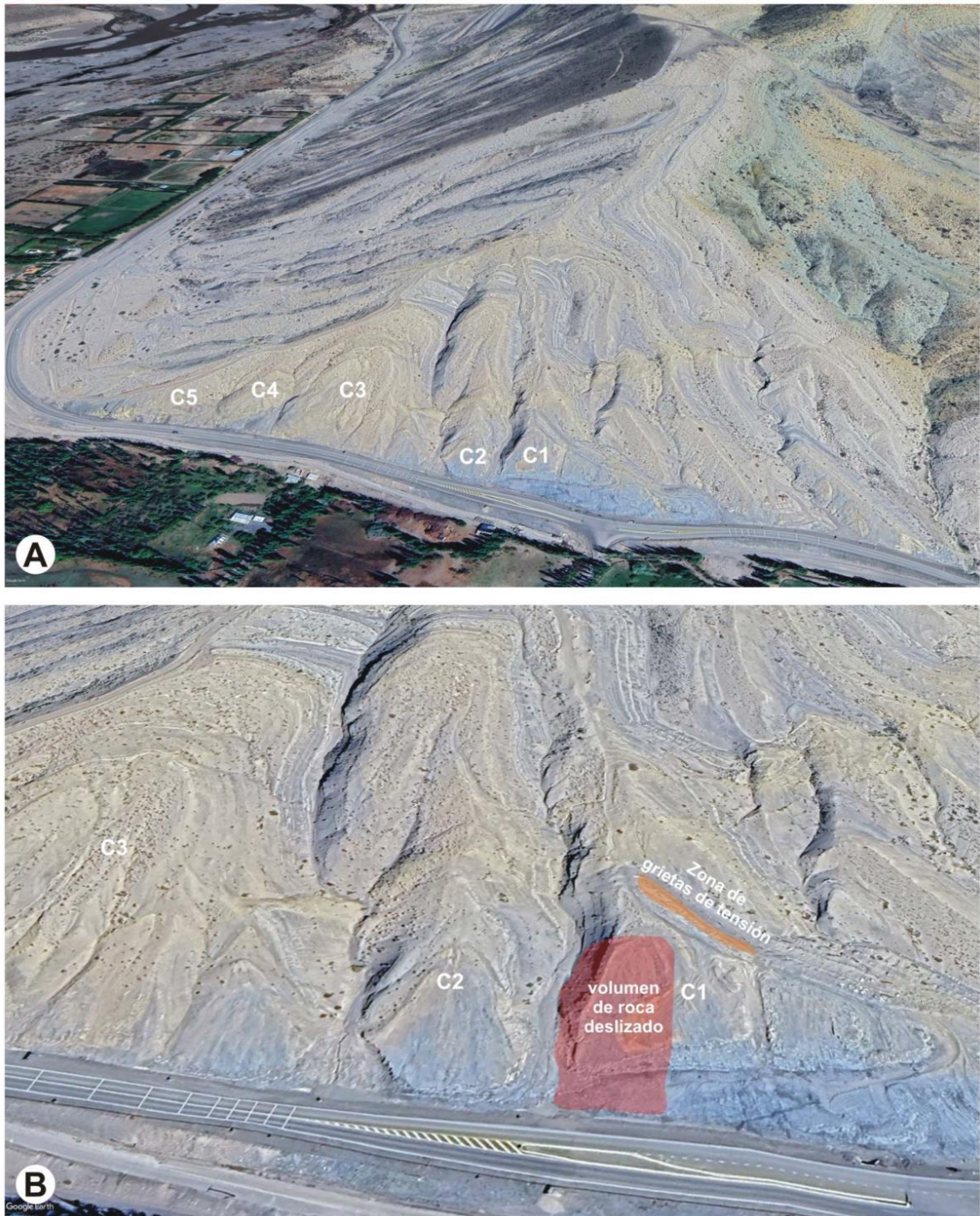


Figura 7. A) Flanco suroriental del cerro de la Virgen. La erosión generada por los cauces efímeros sobre la estructuración de las rocas aflorantes, permite subdividir este sector del macizo en diferentes cuerpos rocosos que comparten similares condiciones de estabilidad geomecánica. B) Detalle del sector afectado por el deslizamiento de bloques el día 01/08/2023. Fuente de la imagen satelital: Google Earth (imagen de fecha 10/07/2022).

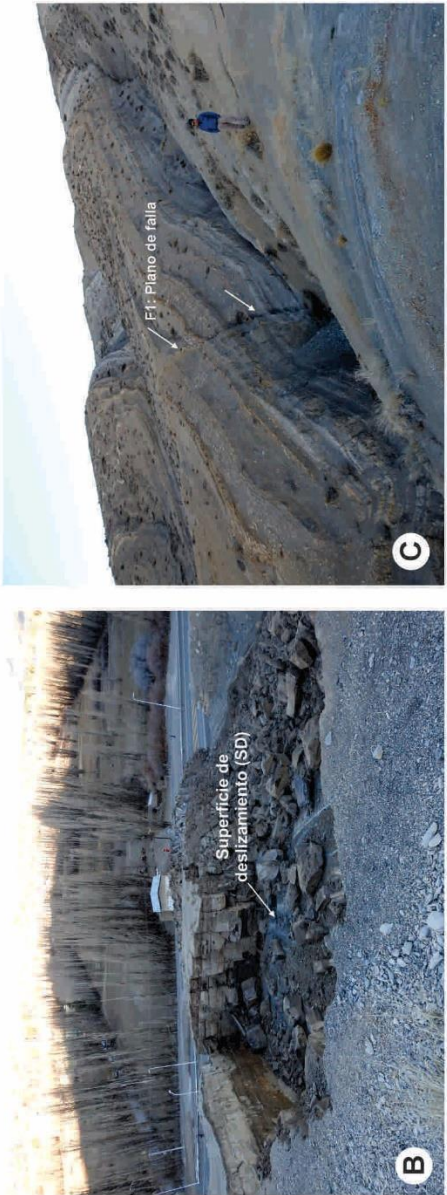
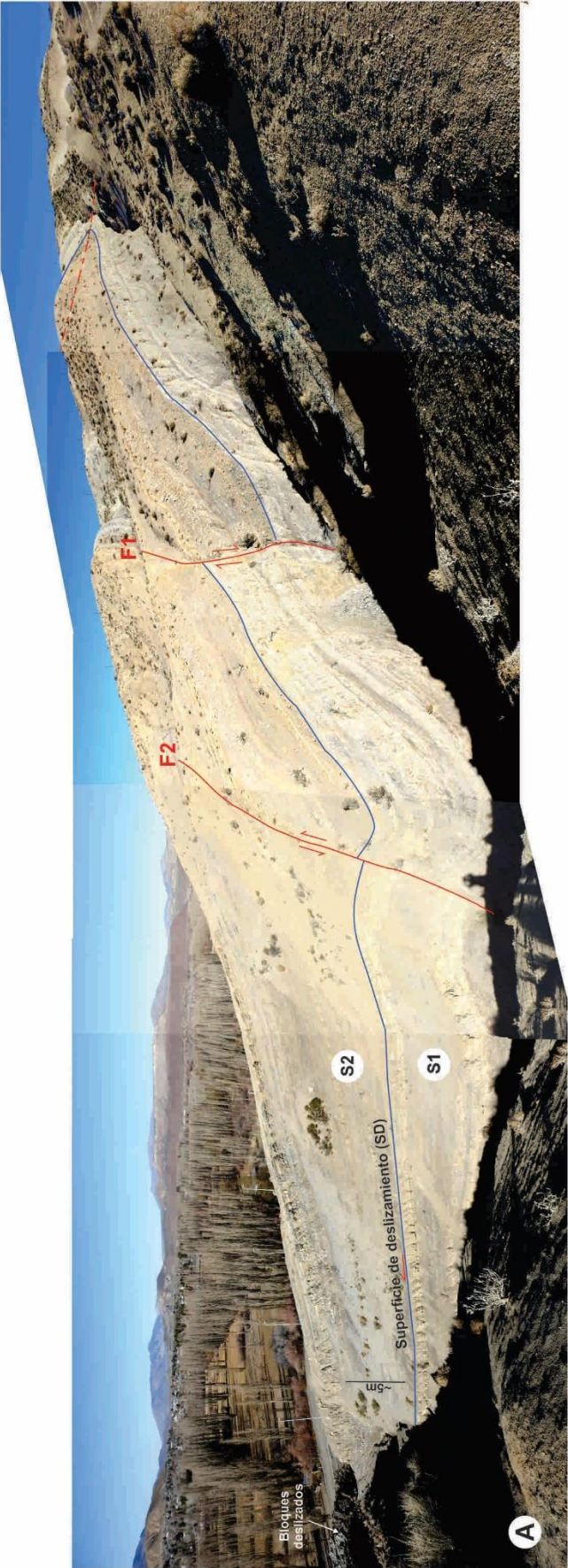


Figura 8. Afloramientos expuestos en el cauce efímero que separa a los cuerpos rocosos C1 y C2. Se aprecia las principales superficies de debilidad representadas por los planos o superficies de estratificación y por el juego de fallas (F) subverticales que los corta. Se destaca además un marcado contraste de competencia entre las sucesiones sedimentarias S1 y S2, sobre cuyo límite se sucede la superficie de deslizamiento (SD). B). Detalle de la superficie de deslizamiento (SD). C) Detalle de las fallas de 4° orden que afectan a la estratificación.

Desde el punto de vista estrictamente sedimentario, se observa que dentro de los depósitos aflorantes en el sector es posible tipificar dos grandes grupos de sedimentos; señalados en la figura 8 como sucesiones sedimentarias S1 y S2.

La sucesión S1 se caracteriza por una alternancia y dominio de depósitos lutítico-calcáreos, de aspecto margoso en superficie meteorizada. Desarrolla extensos bancos de geometría tabular a mantiforme, de contactos netos y bien definidos. La presencia de carbonato contribuye a la cementación del sedimento, incidiendo en sus condiciones de porosidad y permeabilidad. Esta particularidad favorece el desarrollo horizontes rocosos compactos, lo que le brindan propiedades de mayor coherencia relativa frente a los esfuerzos a los que puede verse sometido.

La sucesión suprayacente S2, se compone por un dominio de pelitas laminadas poco consolidadas, ligeramente calcáreas, con intercalación de delgados horizontes de areniscas de granulometría mediana a fina. Esta sucesión presenta propiedades de menor coherencia frente a las condiciones de la sucesión S1, lo cual genera un marcado contraste de competencia entre ambas sucesiones.



Figura 9. Vista general de la superficie de deslizamiento (indicada por la flecha). Nótese la presencia de humedad sobre la misma.

En este sentido, las observaciones de campo han permitido definir a la superficie de contacto dada entre las sucesiones S1 y S2, como la superficie de deslizamiento (SD) sobre la cual se produjo el fenómeno de “resbalamiento” (sensu García Yagüe, 1966) por parte de los depósitos de la sucesión S1 sobre las rocas de la sucesión S2. En la figura 9, se observa la geometría marcadamente plana de la superficie de deslizamiento. Nótese

también la fuerte presencia de humedad en dicha superficie, factor sobre el que volveremos más adelante.

Estructuralmente, más allá del ya mencionado buzamiento de los estratos, se destaca en este sector la presencia de fallas subverticales pertenecientes a la familia de fracturas de 4° orden descritas con anterioridad (figura 8). Estas pequeñas fallas de reajuste, cortan a los planos de estratificación de manera aproximadamente paralela al rumbo de los estratos, configurándose también como importantes superficies de debilidad estructural.

Este grupo de fallas se disponen paralelas entre sí, con un espaciado variable situado entre los 5 a 35 m (ver también fig. 10B) y un rumbo general N30°. La falla F1 de la figura 8, presenta un buzamiento de ~80°SE y un rechazo vertical de aproximadamente 4,5 m; mientras que la falla F2 exhibe un buzamiento de ~70°SE y un rechazo vertical <1m. Cuesta arriba, fallas de esta misma familia de fracturas continúan afectando los afloramientos. Obsérvese también en la figura 8C, los rastros de humedad presente sobre la traza lateral del plano de falla.

Se mencionó previamente a las distintas familias de diaclasas, como un sistema de fracturas de 5° orden. Si bien las mismas también conforman marcadas superficies de debilidad estructural, en el caso del afloramiento analizado éstas jugarían un papel menor o secundario dentro de la mecánica del deslizamiento. En general, las familias de diaclasas observadas en el afloramiento muestran un desarrollo vertical, en donde se evidencia en la zona inmediatamente próxima al plano de fractura una marcada meteorización de la roca. Esta meteorización, es manifestada por el desarrollo de bandas de alteración mineral y concentración de óxido férrico (fig. 10C); denotando también la ocurrencia de filtración y circulación de agua a través este sistema de fracturas.

La figura 10D, muestra la cicatriz de la escarpa principal producida por un deslizamiento de menor envergadura situado sobre el cuerpo rocoso C4 (37°22'4.6"S / 70°17'3.3"O). Aun realizadas las consultas, no se pudo obtener la fecha precisa de este otro suceso. No obstante, las referencias orales lo ubican temporalmente unos 10 días antes del evento del 01/08/2023. En la figura 10E, se puede apreciar parte del cuerpo principal del deslizamiento ubicado sobre el cuerpo C4; destacándose la conformación de bloques menores los cuales se encuentran regulados en su conformación por el sistema de diaclasas verticales.

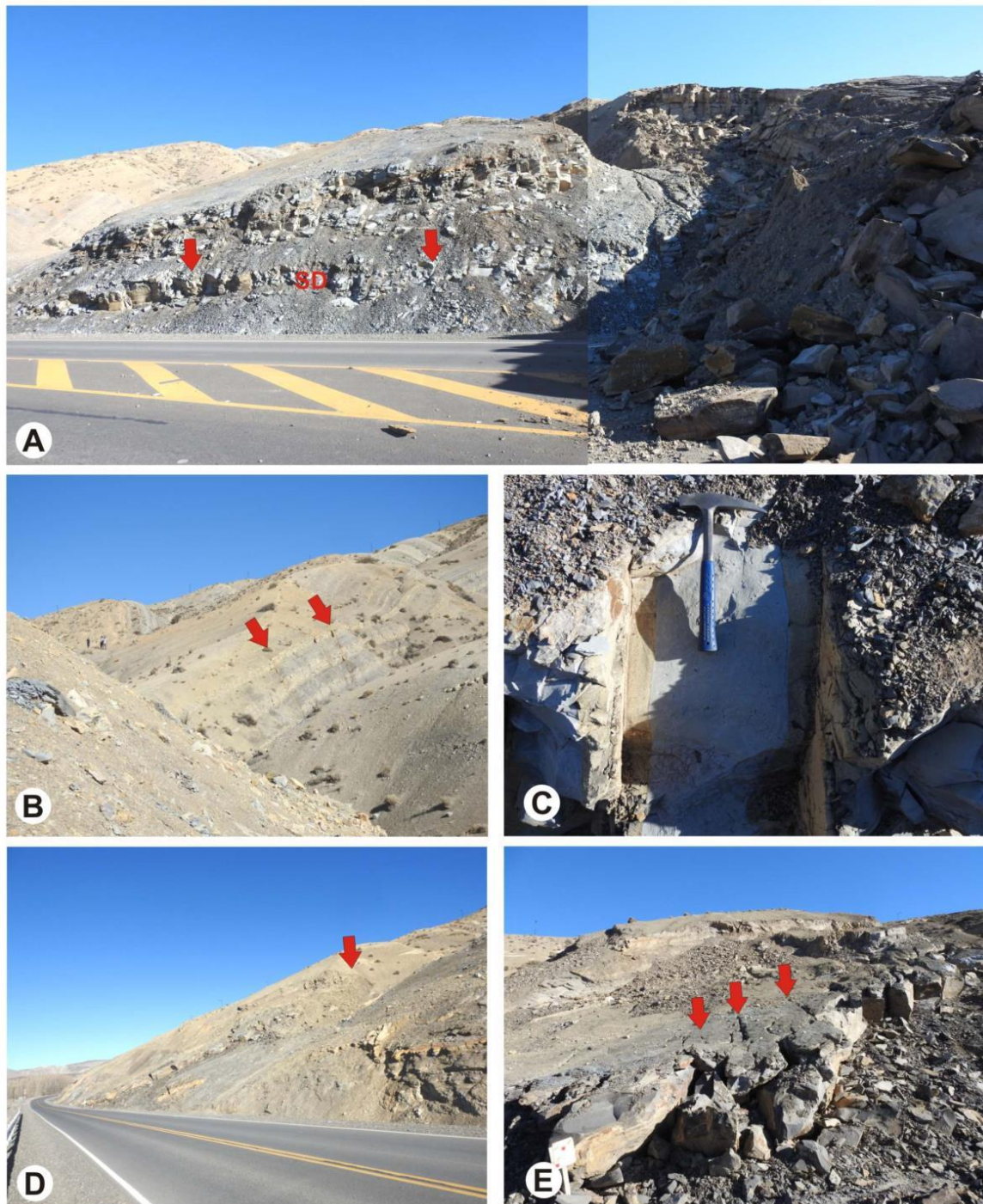


Figura 10. A) Vista del estrato sobre el que se desarrolla la superficie de deslizamiento (SD) expuesto sobre el talud de desmonte. B) Fallas subverticales de 4° orden. C) familia de diaclasas verticales. Nótese las bandas de alteración. D) Deslizamiento ubicado sobre el cuerpo rocoso C4. E) Disposición de bloques menores regulados por el sistema de diaclasas.

Hipótesis sobre la mecánica del deslizamiento

Basado en las observaciones anteriores, se establece que la mecánica que operó en el desarrollo del deslizamiento estuvo regulada, de manera primaria, por factores estratigráficos, sedimentarios y estructurales (ver fig. 11).

Estos factores son:

1. Factor estratigráfico: materializado por los planos de estratificación, los cuales dan lugar a la generación de extensas superficies de debilidad estructural dentro del macizo rocoso. Contactos de tipo neto y planares, acentúan las cualidades negativas de estas superficies al momento de evaluar las condiciones de estabilidad del macizo.

2. Factor sedimentario (contraste de competencia): la presencia de sucesiones y/o estratos con diferentes cualidades mecánicas, reguladas a su vez por los atributos composicionales, texturales y diagénicos propios de cada depósito; generan condiciones de inestabilidad dentro del macizo rocoso como consecuencia de las diferentes respuestas que ofrece cada litología ante los esfuerzos a los que es sometida.

3. Factor estructural: de gran incidencia general, se ve aquí materializado por dos elementos principales, el buzamiento de los estratos y las fallas subverticales de 4° orden. En el caso del buzamiento, su inclinación orientada a favor de la pendiente del relieve, constituye uno de los factores que operan de manera altamente negativa en las condiciones de estabilidad de cualquier macizo rocoso. Las fallas subverticales de 4° orden, generan aquí por si mismas extensos planos de debilidad estructural que, por su disposición espacial dentro del macizo rocoso, acentúan en alto grado sus condiciones de inestabilidad.

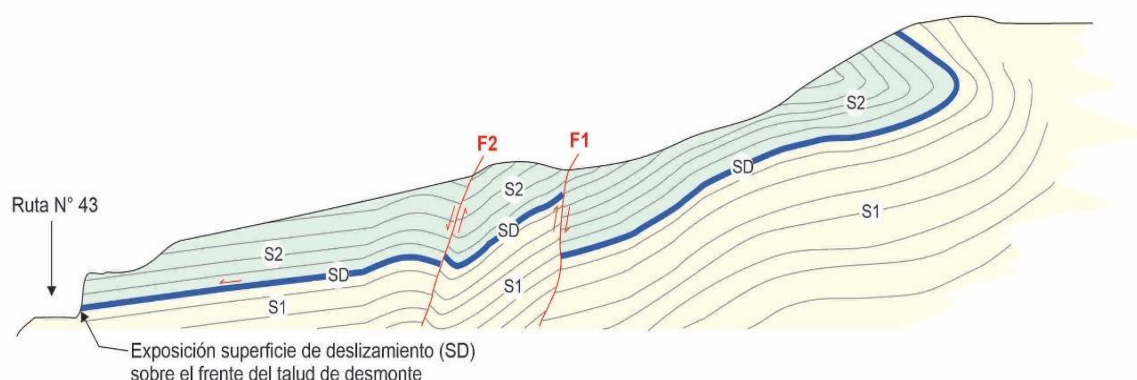


Figura 11. Esquema geológico-estructural del macizo rocoso, basado en la panorámica fotográfica de la figura 8A. S1: sucesión sedimentaria de dominio lutítico-carbonático. S2: sucesión sedimentaria de dominio pelítico con intercalaciones arenosas. SD: superficie de deslizamiento, originada por el contraste de competencia entre las rocas de las sucesiones S1 y S2. F1 y F2= fallas subverticales correspondientes a fracturas de 4° orden.

Además de los ya mencionados, otros factores que habrían coadyuvado en la generación del deslizamiento, son:

4. Humedad: La presencia de humedad en las superficies de los planos de falla y de estratificación; habría contribuido en gran medida en la mecánica del deslizamiento, generando un efecto de “lubricación” sobre estas discontinuidades.

5. Descalce y exposición de la superficie de deslizamiento (SD): La exposición (sobre el frente del talud de desmonte) del estrato sobre cuyo contacto superior se desarrollara la superficie de deslizamiento (figs. 10A y 11), habría contribuido en el resultado final del evento. La extracción de material soporte sobre este frente, afectó en cierta medida las condiciones de estabilidad del cuerpo rocoso.

Reunida toda esta información, podemos deducir que los principales factores primarios que contribuyeron al proceso generador del deslizamiento; estuvieron regulados en gran medida por los factores estructurales y la íntima combinación de los factores estratigráficos y sedimentarios. Las ya mencionadas características estructurales del macizo rocoso, propician la generación de múltiples superficies de debilidad; cuyo arreglo y ordenamiento espacial genera la conformación de bloques rocosos de distinta magnitud, y por cuya disposición en la configuración final del terreno, se ven en gran medida afectados en su estabilidad por la acción de la fuerza de gravedad.

El contraste de competencia dado entre los distintos componentes litológicos de las rocas sedimentarias presentes en el sector, juegan asimismo un rol fundamental en las condiciones de inestabilidad del macizo rocoso. Tal como se ha expuesto, la superficie de deslizamiento (o superficie de ruptura) coincide con una superficie de contacto estratigráfico el que, a su vez, marca un límite físico entre dos tramos de sucesiones sedimentarias caracterizadas por poseer distintas cualidades de comportamiento geomecánico.

La presencia de humedad sobre las superficies de discontinuidad, principalmente manifiesta sobre la cara de la superficie de deslizamiento; sin dudas también contribuyó a aumentar las condiciones de inestabilidad del macizo. Las altas precipitaciones registradas en la región durante los días y semanas previas al suceso, habría sido un factor gravitante en el resultado final.

La evidencia de campo sugiere que la infiltración de las aguas meteóricas, se produce principalmente a través los planos del sistema de fallas subverticales de 4° orden y las

fracturas del sistema de diaclasas. Las características litológicas del horizonte rocoso sobre cuyo contacto superior se desarrollara la superficie de deslizamiento, le habrían conferido condiciones de baja permeabilidad; situación que habría posibilitado la formación de una delgada película de agua sobre dicha superficie, actuando de esta forma como agente lubricante.

Finalmente, los trabajos de desmonte (remoción de terreno) realizados durante la ejecución de la obra de la ruta, dejaron expuesto el horizonte rocoso sobre el cual posteriormente se generó la superficie de deslizamiento. El descalce y exposición de dicho horizonte, también habría cumplido un rol determinante en la generación del deslizamiento; debido principalmente a la extracción de material soporte que contribuía al sostenimiento de los bloques rocosos en ese sector.

Para concluir, debe enfatizarse en que la ponderación de cada uno de los factores operantes en este proceso, debe ser realizada sobre la base de un detallado estudio geotécnico; el cual permita categorizar y cuantificar cada una de las variables actuantes.

Posibilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos

Tal lo señalado, ya existían antecedentes de deslizamientos menores originados en las semanas previas al evento del 01/08/2023. Es de suma importancia señalar, que sobre la corona y aproximadamente a 20 m por detrás de la escarpa principal del deslizamiento, se sucede un sistema de grietas de tensión que reflejan claramente la continuidad en las condiciones de inestabilidad del cuerpo rocoso C1 (ver figs. 7B y 12). Dichas grietas alcanzaban (al momento del relevamiento) los 15 mm de separación, coincidiendo en su emplazamiento y orientación con la ubicación y rumbo de la traza del plano de falla F2. En principio, esta particularidad denota la importancia de estos planos de debilidad sobre la inestabilidad del macizo en este sector.

Debe advertirse que estas condiciones de baja estabilidad estructural observadas en C1, podrían generar en un lapso de tiempo relativamente corto (días, semanas o meses), un nuevo evento de deslizamiento; el cual podría alcanzar un volumen similar o levemente superior al sucedido el 01/08/2023. En este sentido, la ocurrencia de nuevas precipitaciones sobre la región, podrían influir en el desencadenamiento rápido de dicho proceso.

Es necesario asimismo señalar, que las condiciones de estabilidad del cuerpo rocoso C2 (ver fig. 7) son similares a las que operaban en el cuerpo C1 en etapas previas a su

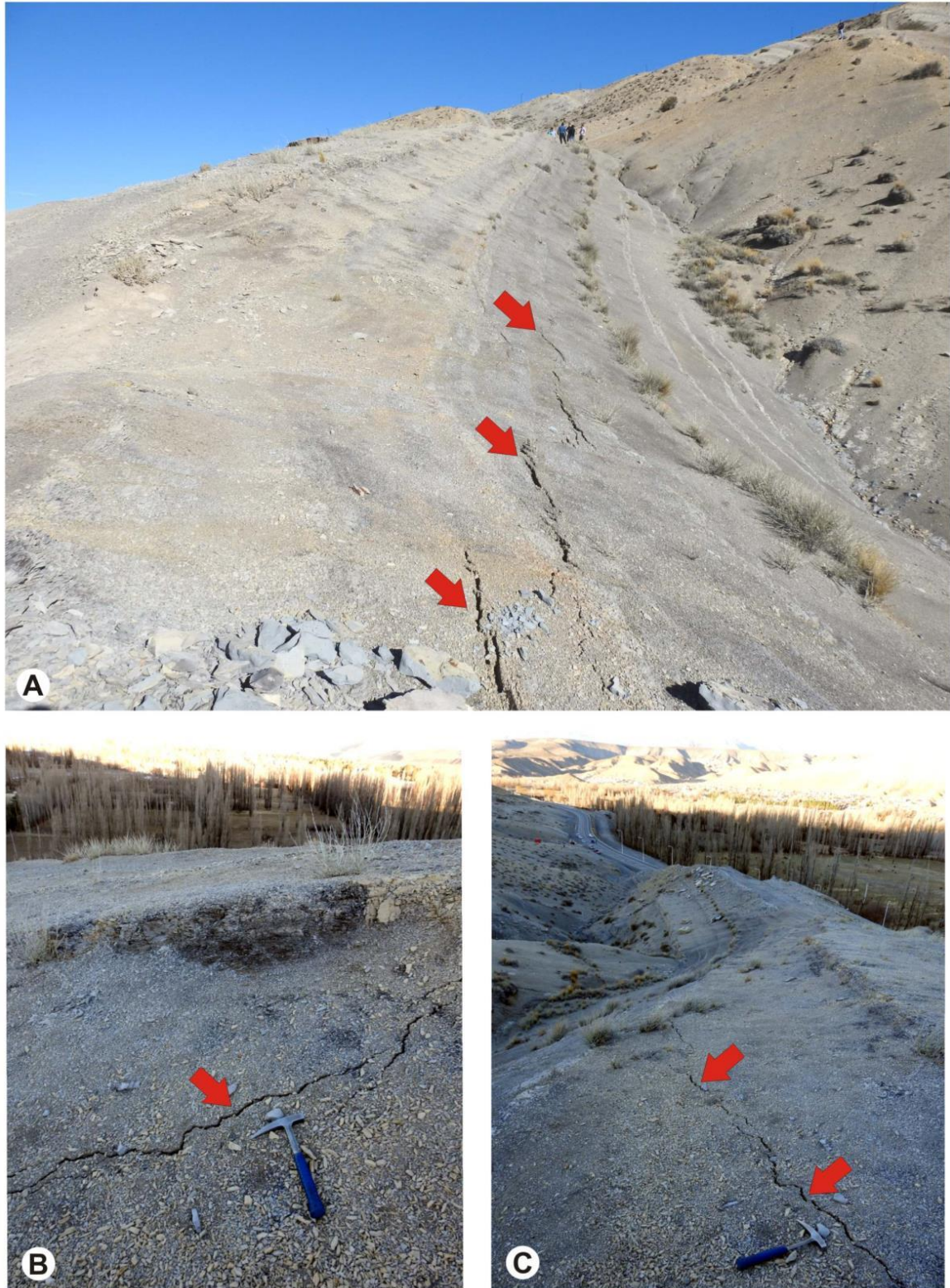


Figura 12. Grietas de tensión desarrolladas sobre la corona del deslizamiento y distante aproximadamente 20 m de la escarpa principal.

deslizamiento; razón por la cual debe monitorearse la evolución del comportamiento geomecánico que presente el mencionado bloque.

En líneas generales, la condición de inestabilidad del macizo rocoso es claramente manifiesta a lo largo del tramo de la traza de la ruta N° 43 comprendida entre las zonas de emplazamiento de los cuerpos C1 a C5 (fig. 7); representando una longitud aproximada de 500 m. A lo largo de todo este sector, debe restringirse totalmente cualquier tipo de circulación.

Consideraciones finales

El acúmulo de bloques dispuestos sobre la calzada de la ruta provincial N° 43, correspondiente al pie del deslizamiento, actúa en este momento como soporte del bloque que constituye al cuerpo principal del mismo. Atento a ello, cualquier intento de proceder al retiro de dicho material, desencadenaría el rápido deslizamiento del cuerpo principal; poniendo en riesgo a personas y equipo que operase sobre este sector.

Cualquier intento de disminuir los esfuerzos operantes en estos bloques, debería ejecutarse con retiro de material operando sobre la pendiente de arriba hacia abajo. Sin embargo, también se desaconseja en lo inmediato realizar este tipo de acción; hasta tanto existan nuevos estudios geotécnicos que permitan realizar una caracterización profunda de las condiciones generales de todo el macizo rocoso.

Independientemente de este último punto, y asumiendo la posibilidad que pudiese ejecutarse dichas labores, resulta evidente que los volúmenes de movimiento de terreno a realizar resultarían en magnitudes extremadamente grandes; y sin que ello, no obstante, llegase a asegurar condiciones óptimas de seguridad para todo el sector.

Por lo expuesto, se sugiere como primera medida, la realización de un nuevo estudio geotécnico a fines de evaluar y caracterizar objetiva y técnicamente las condiciones de estabilidad del macizo rocoso sobre este sector.

Debe asimismo planificarse la realización de tareas que tiendan a asegurar, disminuir o atenuar la ocurrencia de nuevos deslizamientos no controlados sobre el mencionado tramo de la ruta provincial N° 43.

Finalmente, se deja expresado se contemple y evalúe la posibilidad de proceder al cambio de la traza de la ruta sobre esta área. La nueva traza, debería evitar o alejarse de la

zona correspondiente al cierre periclinal de la antiforma desarrollada sobre el sector meridional del cerro de la Virgen.

Referencias y material bibliográfico consultado

Cobbold, P. y Rosello, E. 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.

Frías Saba, R.C., Sánchez, N.P., Turienzo, M.M. y Lebinson, D.O. 2021. Análisis geométrico y cinemático del anticlinal Chos Malal, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): 594-612.

García Yagüe, A. 1966. Contribución para la clasificación de los movimientos del terreno. *Revista de Obras Públicas* 114, N° 3020: 995-1003.

Irastorza, A., Turienzo, M., Peralta, F., Irastorza, M., Zavala, C. y Sánchez, N. 2019. La estructura del frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio a los 38°20'S, Cuenca Neuquina *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (3): 213-228.

Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V. y Dimieri, L. 2015. Geometría y cinemática de las estructuras tectónicas en el extremo septentrional de la faja corrida y plegada del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (3): 299-313.

Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V. D'Annunzio, M.C. y Dimieri, L. 2018. The structure of the northern Agrio fold and thrust belt (37°30'S), Neuquén Basin, Argentina. *Andean Geology* 45 (2): 249-273.

Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Cristallini, E., Araujo, V. y Dimieri L. 2020. Kinematics of a backthrust system in the Agrio fold and thrust belt, Argentina: Insights from structural analysis and analogue models. *Journal South American Earth Sciences* 100: 102594.

Lynn, M.H. y Bobrowsky, P. 2008. Manual de derrumbes: una guía para entender todo sobre los derrumbes. United State Geological Survey. Circular 1325, 154 p.

United State Geological Survey (USGS). 2004. Landslide types and processes. Fact Sheet 2004-3072. 4 p.

Ramos, V.A. 1978. Estructura. En: Rolleri, E.O. (Ed.): *Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén*, 7° Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Relatorio: 9-24. Buenos Aires.

Ramos, V.A. y Folguera, A. 2005. Los Andes australes: una evolución tectónica excepcional entre el sur de Mendoza y el norte de Neuquén. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), Actas electrónicas: 10 p.

Ramos, V.A., Folguera, A. y García Morabito, E. 2011. Las provincias geológicas del Neuquén. En: H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, J. Danielli y J. Vallés (eds.), Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 317-326. Neuquén.

Rojas Vera, E., Mescua, J., Folguera, A., Becker, T., Sagripanti, L., Fennell, L., Orts, D. y Ramos, V. 2015. Evolution of the Chos Malal and Agrio fold and thrust belts, Andes of Neuquén: insights from structural analysis and apatite fission track dating. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 418-433.

Sánchez, N., Turienzo, M., Dimieri, L., Araujo, V. y Lebinson, F. 2014. Evolución de las estructuras andinas en la faja corrida y plegada de Chos Malal: interacción entre el basamento y la cubierta sedimentaria de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 233-246.

Sánchez, N., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo, V., Coutand, I. y Dimieri, L. 2015. Structural style of the Chos Malal fold-and-thrust belt, Neuquén Basin, Argentina: relationship between thick and thin-skinned tectonics. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 399-417.

Sánchez, N., Coutand, I., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo, V. y Dimieri, L. 2018. Tectonic evolution of the Chos Malal fold and- thrust belt (Neuquén Basin, Argentina) from (UTh)/He and fission track thermochronometry. *Tectonics* 37: 1907-1929.

Sigismondi, M.E. (2012). Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Tesis Doctoral: 367 p.

Turienzo, M., Sánchez, N., Dimieri, L., Lebinson, F. y Araujo, V. 2014. Tectonic repetitions of the Early Cretaceous Agrio Formation in the Chos Malal fold-and-thrust belt, Neuquén basin, Argentina: geometry, kinematics and structural implications for Andean building. *Journal of South American Earth Sciences* 53: 1-19.

Turienzo, M., Sánchez, N., Lebinson, F., Dimieri, L. 2018. The structure of the southern central Andes (Chos Malal fold and thrust belt). En: Folguera (ed.), *The Making of the Chilean-Argentinean Andes*. Springer Earth System Sciences, 411-441.

Turienzo, M., Sánchez, N., Lebinson, F., Peralta, F. Araujo, V., Irastorza, A. y Dimieri, L. 2020. Basement-cover interaction in the mountain front of the Northern Neuquén fold and thrust belt (37°10' – 37°40' S), Argentina. *Journal South American Earth Sciences* 100: 102560.

Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. En: Schuster, R.L. y Krizek, R.J (eds.). *Special Report 176, Landslides: Analysis and Control*. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science. Chapter 2: 11-33. Washington D.C.

