



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Estudio del peligro asociado a la inestabilidad del talud
del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos (El
Peaje), San Luis Potosí, S.L.P.”**

Tesis Maestría

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. David Alejandro Morales Basurto

Asesor:

Dr. Lorenzo Borselli

Co-asesora:

Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez

San Luis Potosí, S. L. P.

septiembre de 2026

16 de julio de 2026

ING. DAVID ALEJANDRO MORALES BASURTO
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Lorenzo Borselli y Azalea Judith Ortiz Rodríguez** Asesor y Coasesora de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Estudio del peligro asociado a la inestabilidad del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos (El Peaje), San Luis Potosí, S.L.P."

Introducción.

1. Descripción geográfica y geológica del área de estudio.
2. Caracterización geotécnica y de estabilidad de taludes de los macizos rocosos.
3. Parámetros geomecánicos de las unidades geotécnicas.
4. Análisis de estabilidad de taludes.

Conclusiones.

Bibliografía.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR. DIRECCION

www.uaslp.mx

Ccp. Archivo

-bvlg.



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Estudio del peligro asociado a la inestabilidad del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos (El Peaje), San Luis Potosí, S.L.P.”

se realizó en el periodo agosto de 2024 a septiembre de 2026 bajo la dirección del Dr. Lorenzo Borselli y la Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis. para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, David Alejandro Morales Basurto.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación académico-científica fue realizada gracias a los proyectos geotécnicos del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (IGUASLP), encabezados por el Dr. Lorenzo Borselli. Agradezco, así como la colaboración de amigos en los que debo destacar a la M.C. Yaritza Patricia Saucedo Castro, M.C. Luis Fernando Rodríguez Sosa, M.C. Nick Antonio Rodríguez Rodríguez, M.C. Mariana Gómez Ramírez, M.C. Helios Bafún y Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez quienes siempre estuvieron aportándome sus consejos y conocimientos muy útiles en lo académico, y lo personal, que me ha servido para desarrollarme mejor como estudiante, trabajador y persona en mi trayecto. El trabajo de campo fue apoyado por el Dr. Lorenzo Borselli, Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez, M.C. Luis Fernando Rodríguez Sosa y M.C. Yaritza Patricia Saucedo Castro. En el IGUASLP agradezco el apoyo académico, educativo y facilidades para todo trámite en el instituto al Dr. Lorenzo Borselli, Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez, Dr. José Ramón Torres Hernández, Dr. Ricardo Saucedo Girón, Dr. José Rafael Barboza Gudiño, M.C. Marco Antonio Rojas Beltrán y Dr. Damiano Sarocchi.

Agradezco a mis asesores Dr. Lorenzo Borselli y Dra. Azalea Judith Ortiz Rodríguez primeramente por aceptarme como su estudiante-asesorado y por guiarme en todo momento en la elaboración del presente estudio, incluyendo el respaldo académico y revisión del presente trabajo también debo destacar mis agradecimientos a mis sinodales Dr. José Rafael Barboza, M.C. Marco Antonio Rojas Beltrán y Dra. Lucia Capra Pedol.

Agradezco el apoyo brindado a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por darme la posibilidad de estudiar un posgrado gracias a la Beca CONAHCYT No. 65197d69e5f0e41e1ea83ae2 y CVU 1318828.

Agradezco por toda la amistad brindada durante mi estancia en el posgrado en Ciencias en Geología Aplicada a la M.C. Yaritza Patricia Saucedo Castro, M.C. Luis Fernando Rodríguez Sosa, M.C. Mariana Gómez Ramírez, Ing. Daria Marcela Barboza Treviño y a Lic. Karina Rentería Santoyo.

Agradezco por todo el amor, apoyo y amistad que me brinda mi esposa la M.T.G.A. Diana Berenice Rangel Velázquez que en los momento buenos y malos momentos ha estado presente.

Un enorme agradecimiento con todo mi amor a mi madre la C.P. Martha Elba Morales Basurto que me ha apoyado en todo momento y en cada aspecto de mi vida. Sin ella no hubiera llegado hasta donde estoy ahora, ha sido, es y seguirá siendo parte importante en mi vida. Los consejos y valores morales que me ha inculcado estarán presentes durante mi vida personal y profesional. También, quiero agradecer la orientación profesional de mi tío el Ing. José María Vélez Basurto y toda mi gratitud a mi familia, que en todo momento me han soportado, apoyando y brindando amor en buenos y malos momentos.

¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!

**El presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de la beca CONAHCYT No.
65197d69e5f0e41e1ea83ae2 con CVU 1318828**

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación académica es dedicado a mi señora madre la C. D. Martha Elba Morales Basurto, a mi esposa M. T. G. A. Diana Serenice Rangel Velázquez y a mi tío el Ing. José María Vélez Basurto, quienes sumaron y siempre estuvieron y están presentes conmigo y su apoyo se ve reflejado en parte en el presente trabajo.

También, la dedicatoria especial a la memoria de mi abuelito Andrés Morales Mendoza, mi abuelita Esperanza Basurto Rueda y mi tía Lic. Beatriz Adriana Morales Basurto que siempre los recuerdo con mucho cariño y los llevo en el corazón también quiero dedicar este esfuerzo a la memoria de mi asesor de tesis de licenciatura el Dr. Miguel Morales Gámez y a mi profesor de las materias de Petrología y Petrografía Ígnea y Facimientos Minerales el Dr. Francisco Javier Orozco Villaseñor que sus enseñanzas siempre me acompañaran a lo largo de mi vida..

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA.....	IV
INDICE GENERAL.....	V
RESUMEN.....	VII
Introducción	1
Objetivo	3
Trabajos previos	3
Materiales y métodos.....	7
Capítulo 1. Descripción geográfica y geológica del área de estudio.	10
1.1 Zona de estudio	10
1.2 Fisiografía y geomorfología.	11
1.3 Hidrología.	12
1.4 Paleogeografía.....	14
1.5 Provincias geológicas.....	15
1.6 Terrenos Tectonoestratigraficos	15
1.7 Marco geológico regional.	16
1.8 Marco geológico local.....	18
1.9 Clima y vegetación.....	19
Capítulo 2. Caracterización geotécnica y de estabilidad de taludes de los macizos rocosos.....	20
2.1 Descripción litológica del talud.	20
2.2 Descripción de los tipos de discontinuidades del talud.	30
2.3 Descripción de grado de alteración e intemperismo del talud.	35
2.4 Caracterización de los factores fundamentales.	37

2.5 Secciones geológico-estructural-geotécnico	40
Capítulo 3. Parámetros geomecánicos de las unidades geotécnicas.	46
Capítulo 4. Análisis de estabilidad de taludes.	58
Conclusiones.....	81
Recomendaciones	84
Bibliografía.....	85
ANEXOS.....	90

RESUMEN

Este trabajo de investigación de tesis de maestría presenta una metodología integral para el análisis de estabilidad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos (El Peaje), situada en San Luis Potosí, una zona propensa a desprendimientos de bloques rocosos que ponen en peligro la carretera federal No. 80, la infraestructura hidráulica y las líneas eléctricas de alta tensión.

El estudio se fundamenta en una rigurosa caracterización geológico-estructural y geotécnica. Estructuralmente, el área se encuentra afectada por el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes, específicamente por la Falla Juachín, la cual induce un patrón de fallamiento secundario en terminación de "cola de caballo" que incrementa sustancialmente el fracturamiento y la permeabilidad en el macizo rocoso.

Para evaluar la calidad geomecánica de los materiales, se utilizaron clasificaciones de campo como es el *Geological Strength Index* (GSI) integradas en el *software* libre SSAP 6.1, (Borselli, 2026), complementadas con el uso de imágenes de alta resolución para la obtención de perfiles topográficos precisos.

La resistencia de la matriz rocosa se determinó mediante mediciones de campo con el Martillo de *Schmidt*, aplicando método estadístico no paramétrico para definir la mediana y el quinto percentil de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

Este enfoque probabilístico permitió diferenciar las propiedades mecánicas de la roca sana frente a los sectores degradados o meteorizados, revelando una marcada disminución de la competencia estructural en unidades como la Riolita Superior y los diques de vidrio del talud, cuyos valores de UCS en el percentil 5% descienden críticamente por debajo de los 7 MPa.

Finalmente, la integración de la geometría del talud, las discontinuidades estructurales y las propiedades geomecánicas calculadas se procesaron mediante el *software* libre SSAP 6.1 (Borselli,

2026). A través del análisis de 8 secciones transversales estratégicas, el modelo demostró cuantitativamente cómo factores antrópicos sumados a detonadores naturales como las presiones de poro por lluvias extraordinarias y la aceleración sísmica regional, reducen drásticamente los factores de seguridad del corte.

También con el *software* CSSAP, (Borselli, 2025) se crearon planos de factor de seguridad que nos definen la relación que existe en el talud en torno a la geología estructural, la hidrología para que el factor de seguridad baje drásticamente y sea susceptible a deslizamientos de roca de gran volumen con afectación directa a la carretera federal no. 80 y la cortina de la presa Gonzalo N. Santos.

Introducción

El área de estudio es el talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos mejor conocida como “El Peaje”, es parte de un sistema de red hídrica que está constituida por 3 presas interconectadas que son las presas Gonzalo N. Santos, El Potosino y San José, que surten agua potable a la zona metropolitana de San Luis Potosí, actualmente el talud de la zona a estudiar está teniendo continuamente deslizamientos y caídas de bloques debidas a la inestabilidad del talud, inestabilizando a la vez obras civiles como la carretera y la propia cortina de la presa.

Este talud ha tenido caídos y deslizamientos importantes a partir del 2008 a la actualidad siendo la más intenta en el año 2012 que cubrió de grandes bloques la carretera federal No. 80, las maniobras civiles fueron enfocadas en retirar los bloques de rocas y rehabilitar la carretera para su tránsito, excluyendo los estudios y obras de estabilización del talud para evitar futuros deslizamientos.

Al día de la creación del presente trabajo ha tenido nula atención sobre su progresivo deterioró por parte de las autoridades competentes gubernamentales y de continuar esto, en próximos años pudiera tener un deslizamiento de mayor magnitud que afectaría de forma directa la cortina de la presa, la carretera federal 80 San Luis Potosí-Guadalajara libre, el centro de piscicultura y la red eléctrica de distribución de la CFE de 132 kV que está ubicada sobre el talud y de forma indirecta las viviendas que están cercanas y ubicadas sobre el trazo del arroyo de Escalerillas.

Los factores que están actuando para la inestabilidad del talud son los factores antrópicos, litológicos, geológicos-estructurales, sísmicos, hidrogeológico y vegetativo. Todos estos factores se conjugan para aumentar la peligrosidad, como es el corte a la pendiente natural del domo riolítico, que conforma al talud de la margen izquierda de la presa, además del tránsito continuo de camiones de carga pesada, autobuses y automóviles particulares que generan vibraciones continuas las 24 horas del día, estas vibraciones generan pequeñas vibraciones que inestabilizan el talud progresivamente.

Lo anterior se suma a la alteración de la roca por meteorización y alteración hidrotermal existente en la zona, así como a los sismos que por lo menos en los años recientes se han registrado cercanos al área de estudio. Otros factores que influyen incrementando el peligro de nuevos deslizamientos son las lluvias intensas, la presencia de fallas y fracturas, además de la litología, tipos de discontinuidades, fracturas y fallas, así como la cobertura vegetal escasa.

En el presente trabajo del estudio, se analizó la morfología del talud mediante imágenes satelitales con resolución a 1.5 metros creando curvas de nivel más precisas que nos han servirá para caracterizar e identificar las partes del talud y los deslizamientos de bloques anteriores, además de poder entender los procesos que inducen al vencimiento del talud a través del tiempo.

Además las imágenes de alta resolución corregidas nos ayudaron a construir el plano base y perfiles base para la cartografía geológico-estructural con enfoque geotécnico a fin de detectar discontinuidades, tipos de litología, estructuras geológicas como fallas y fracturas, alteración preexistente en la zona y con él entendimiento del tipo de vegetación que abunda en áreas no afectadas en la zona, además de los mecanismos de fallamiento regional y local, se logró hacer el estudio integral del talud.

También se analizó la conectividad hidrológica del talud y se realizaron pruebas uniaxiales de resistencia al corte directamente en campo con el martillo de Schmidt y también se analizó el récord histórico de sismos cercanos al área de estudio actualizado al 2025 (Servicio Sismológico Nacional, SSN., 2025). Toda la información recabada fue utilizada para crear secciones geológicas-estructural precisas.

Esta información, junto con la información sísmica, hidrológica y de resistencia al corte se utilizó para crear las secciones en el *software* SSAP y recrear posibles deslizamientos a futuro, mismos que se modelaron con diferentes condiciones que afectan el factor de seguridad de nuestro talud, calculando el impacto de peligrosidad en la zona. El presente trabajo será un aporte a los estudios geológicos y geotécnicos que podrán contribuir a una intervención a futuro del talud de la

margen izquierda de la presa Gonzalo N. Santos y aumentar su factor de seguridad creando condiciones óptimas para mitigar el peligro en la zona.

Objetivo

Realizar un estudio geotécnico y de estabilidad de taludes de macizos rocosos para el análisis del peligro para el talud izquierdo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos mediante técnicas de caracterización de taludes, mecanismos de fallas, análisis y cálculos de resistencia al corte de las rocas, análisis de estabilidad, efectos del agua, comportamiento sísmico del talud y análisis geológico y creación de mapas de factores de seguridad bajo las condiciones estáticas, tension crack, saturada y sísmica que nos permitan crear un modelo geotécnico del talud.

Con esto informar textual y gráficamente el posible potencial peligro que corre los usuarios de la carretera federal 80 debido a nuevos deslizamientos. Este trabajo podra ser utilizado como base para estudios posteriores para la estabilización del talud, evitando daños a la infraestructura pública, accidentes y hasta pérdidas de vidas humanas.

Trabajos previos

Labarthe-Hernández & Jimenez-Lopez, (1992), cartografiaron la porción centro de la Sierra de San Miguelito y crearon un mapa de escala 1:20,000. Sus descripciones de las distintas unidades litoestratigraficas en cada localidad son muy precisas y detalladas, delimitando las unidades volcánicas de la zona de estudio de forma local, las cuales fueron: Latita Portezuelo, Riolita San Miguelito, Ignimbrita Cantera, Riolita Panalillo, Basalto La Placa, Conglomerado Halcones, Pumicíta del Desierto, Suelo Residual y aluvión.

Del mismo modo recolectaron datos estructurales de la zona mencionando el dominio de estructuras con dirección Noroeste-Suroeste y de comportamiento regional ya que esta misma tendencia se mantienen en otros lugares alejados de esta zona.

Blanco-Briones & Rodríguez-Ríos, (1997), realizaron un informe técnico geológico-minero y cartografía de la carta Tepetate F14-A83 para el Servicio Geológico Mexicano (SGM), en donde mapean de forma más regional las unidades existentes en la zona de estudio teniendo similitudes con los trabajos realizados previamente de (Labarthe-Hernández & Jimenez-Lopez, 1992).

Nieto-Samaniego *et al.*, (2005), Llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la estratigrafía, la estructura y la evolución tectónica de la provincia Mesa Central (MC). En el estudio, se determinó el espesor de la corteza y los límites estructurales de la provincia, identificando el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT), como su límite occidental. Este sistema de fallas jugó un papel crucial en la disposición de rocas volcánicas, hipoabisales y depósitos minerales de la era cenozoica a lo largo de su extensión. En su sector meridional, atraviesa la Sierra de San Miguelito, una zona caracterizada por fosas tectónicas y fallas normales con una orientación NW-SE, las cuales provocaron un basculamiento en la región. Además, se logró establecer que esta área experimentó una extensión en dirección E-W.

Vélez-Basurto, (2006), realizó los inventarios físicos de los recursos minerales de Villa de Reyes, S.L.P., en donde menciona una columna estratigráfica similar al área de estudio, pero con un basamento del Cretácico Superior reconocido como Formación Caracol constituido por una intercalación de lutitas y areniscas tipo flysh con turboglifos.

Torres-Hernández *et al.*, (2006), analizaron los diques piroclásticos situados en fallas con orientación NW-SE, que se extienden paralelas a los arroyos Las Cabras y El Juachín, en el suroeste de la ciudad de San Luis Potosí. En este estudio, establecieron una relación entre estos diques y los flujos de ceniza del miembro inferior de la Riolita Panalillo, mediante el análisis de la composición mineralógica de los materiales que los conforman y de los depósitos piroclásticos superficiales. A

partir de estos datos propusieron un modelo genético para explicar el proceso de emplazamiento de los diques piroclásticos.

Tristán-González *et al.*, (2009), describen el campo volcánico de San Luis Potosí y lo dividen en 6 complejos volcánicos que son Complejo Volcánico Pinos, Ahualulco, Sierra de San Miguelito, Santa María del Rio, Villa Hidalgo y La Repartición, de estos complejos volcánicos obtuvieron planos geológicos estructurales de escala 1:20,000.

Además de crear una columna estratigráfica con dataciones isotópicas por Ar-Ar y K-Ar de cada unidad litológica que conforman los complejos volcánicos, el campo volcánico de San Luis Potosí tuvo 3 etapas de actividad; la primera etapa estuvo restringida al Eoceno medio y consistió en lavas de composición andesítica. La segunda etapa fue la más voluminosa y efusiva que ocurrió entre los 32 y 28 Ma., en esta etapa se formaron las cadenas de domos exógenos y las calderas. Finalmente la tercera etapa consistió de un volcanismo bimodal.

Suarez-Díaz, (2012), describe temas importantes que se abordaron en el presente trabajo como son nomenclaturas, clasificación de los movimientos, partes de los taludes, los tipos de deslizamiento en masa, hundimientos, mecanismos de fallas y sus diferentes tipos, además de estructuras, factores detonantes para un deslizamiento y cinemática de las fallas.

Soto-Velasco (2015) llevó a cabo un estudio detallado de los diques piroclásticos de la Ignimbrita Panalillo inferior en la zona de Pozuelos, dentro de la porción central del CVSSM. En dicho análisis, se identificó que los conductos piroclásticos albergaron simultáneamente diques de lava riolítica y, en ciertos lugares, pequeños domos riolíticos, lo que llevó a la propuesta del término “diques compuestos”. También se planteó la existencia de zonas de transtensión que se originaron antes del fallamiento normal y continuaron activas tras el depósito de la Ignimbrita Cantera. Este comportamiento se observa en las zonas brechadas con forma sigmoide dentro de la unidad, donde se registraron estrías laterales oblicuas en los planos de falla de sus márgenes. Finalmente, se concluyó que la Ignimbrita Panalillo inferior fue expulsada a través de fallas extensionales, aunque

estas se formaron como resultado de una fase previa de transtensión que generó los conductos por donde se emplazó.

Serna Bafún, (2018), analizó el control estructural de la zona norte de la sierra de San Miguelito proponiendo que la cuenca del Juachín es una cuenca *pull apart* o *strike slip* donde su control estructural está regido principalmente por fallas laterales con dirección NW-SE, además de tener basculamiento y caída de bloques internos de la cuenca con dirección de 45° al NE. También cartografió la cuenca del Huachín y sus alrededores donde obtuvo una columna estratigráfica con las unidades de latita Portezuelo, riolita San Miguelito, ignimbrita Cantera, riolita Panalillo inferior y superior, co-ignimbrita, sedimentos lacustres, domos riolíticos y basalto la placa.

Sosa Dávila, (2019). realizó la caracterización geomecánica para averiguar el grado de la estabilidad de taludes, (margen izquierda y derecha) de la cortina de la presa “El Realito” San Luis de la Paz, Guanajuato, además evaluó nuevos aspectos geotécnicos de afloramientos de roca y núcleos de barrenación a diamante, también utilizó los criterios de ruptura no lineal de *Hoek and Brown* para determinar los parámetros geotécnicos en el *software RockLab*.

La metodología que desarrollo Sosa Dávila, (2019) para evaluar los materiales tipo *Bimrock* fue con el enfoque de obtener una guía práctica para recolectar los datos necesarios en el afloramiento durante el trabajo de campo, así como una guía de cómo obtener los 122 parámetros geomecánicos una vez determinado el porcentaje de bloques.

Otro macizo rocoso evaluado fue una que en su tiempo estuvo bajo el agua, por lo cual se debió obtener el GSI y recurrir a la evaluación detallada de los núcleos de exploración, la cual demostró ser de gran utilidad para aprovechar esta valiosa información de una zona en donde no se puede observar de forma directa el afloramiento, promueve que durante los levantamientos geológicos de las áreas de estudio se realice una evaluación más completa de las familias de discontinuidades.

Lo cual se le suma a el método tradicional de evaluación de los núcleos por el método de RQD, utilizarla desde la etapa de exploración permite anticipar valores de GSI del macizo rocoso en el que

se va a trabajar y generar un proyecto más completo y nutrido en el aspecto geotécnico, por otro lado, para proyectos ya en operación nos permite obtener un factor de seguridad post-construcción.

Rodríguez Rodríguez, (2026) evaluó el peligro por inestabilidad de taludes en los márgenes de la Presa de San José, San Luis Potosí, mediante la integración de estudios geotécnicos, SIG y modelación numérica con SSAP. Los resultados indicaron que las laderas presentan estabilidad aceptable en condiciones normales, pero una reducción significativa del factor de seguridad bajo escenarios de saturación, identificándose la infiltración de agua y el fracturamiento del macizo como los principales factores condicionantes de la inestabilidad. Además, se delimitaron zonas con susceptibilidad a la caída de bloques, aportando información para la gestión preventiva del riesgo en el área.

Materiales y métodos

Recopilar información sobre caracterizaciones geotécnicas previas de la zona o cercanas a la zona; ubicando bibliografía de CONAGUA, INTERAPAS, Gobierno del Estado y municipal referente a estudios geotécnicos sobre la presa Gonzalo N. Santos o trabajos de reacondicionamiento de dicha presa.

Realizar planos base para análisis topográfico y geomorfológico utilizando modelos digitales de elevación de alta resolución de INEGI en formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) con resolución a 1.5 metros, los modelos utilizados fueron modelos digitales de elevación de tipo superficie y terreno de la carta INEGI F14-A83.

Mapear a escala 1:1,000 y analizar la geología y se identificaron zonas de alteración producto de la meteorización o procesos hidrotermales y con esto describir la litología existente tanto en el talud como sus alrededores para preparar el mapa geológico-estructural con enfoque geotécnico y posteriormente digitalizarlo mediante el *software ArcMap* 10.8.1.

Obtener datos estructurales del talud y sus alrededores en campo para clasificar familias de fracturamiento, zonas de fallamiento y analizar por sectores las tendencias generales de las

estructuras geológicas, por otra parte, se recopiló la información del clima y vegetación del talud y sus alrededores.

Analizar la conectividad hidrológica para localizar puntos de peligro de deslizamiento nuevos y activos en temporadas de lluvias lo que pudiera ser de utilidad para un plan de acondicionamiento de estabilidad de taludes de la zona.

Realizar parte del perfil topográfico en campo con el auxilio del distanciómetro para mayor precisión en el relieve y mejorar la calidad de los datos, fueron procesados en Excel para al final reinsertar estos datos y configurar de forma correcta el perfil topográfico con el proporcionado por el ráster de INEGI en el *software ArcMap 10.8.1*.

Realizar el mapa de conectividad hidrológica para analizar el comportamiento superficial del agua de lluvia y posibles puntos de infiltración y de escurrimiento e ir ingenizando ideas de drenaje al talud como es un canal que desvíe el caudal del agua que se analizó con esta metodología.

Realizar 8 secciones geológicas que cortan el talud en zonas afectadas, las secciones geológicas son importantes para el presente trabajo ya que dependiendo de su precisión en el perfil topográfico y los cambios litológicos y discontinuidades existentes podrá llegar a una correcta interpretación en el *software SAAP*.

Realizar pruebas con el martillo de *Schmidt* en campo para estimar la resistencia al corte de las diferentes unidades del macizo rocoso y realizar gráficos de dispersión para el análisis de los Kpa que resiste el macizo rocoso antes del corte en su condición actual.

Método de clasificación GSI.; es un sistema de caracterización de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, a través de la fácil identificación por evaluación visual de las propiedades geológicas en el campo.

Modelar el comportamiento de taludes; para realizarlo hay que crear una serie de secciones en el talud para analizar el comportamiento de taludes que es la forma en que las pendientes de

terreno, naturales o artificiales, reaccionan ante factores como el clima, la gravedad y la geología. Es crucial para evitar deslizamientos de material rocoso y conocer su impacto verdadero a futuro y prevenir desastres que involucren vidas humanas e infraestructuras.

El modelamiento se realizó mediante los 8 perfiles topográficos con información de su características geológicas, estructurales, hidrológicas y geomecánicas para analizar en el SSAP bajo la metodología de Morgenstern y Price (1965), y los cálculos de *Sniff Random Search* (SRS) 3.3 y *Mixed Engines Search* (MES) 1.0 bajo las condiciones estáticas, *tension crack*, saturado y sísmico.

Para generar secciones de factores de seguridad con el posible plano de deslizamiento inmediato (factor de seguridad menor) graficada con esto; se puede evaluar diferentes panoramas que pueden desestabilizar el talud y mostrar evidencia de las zonas de debilidad, la profundidad y movimientos internos en el talud que sirva para una evaluación de estabilidad del talud a futuro.

La condición de tension crack fue a partir del nivel de fracturamiento de cada una de las 8 secciones analizadas, la condición hidrológica fue basado en el análisis de conectividad hidrológica que se realizo previamente para replicar lo mas parecido las condiciones del talud en épocas de lluvias extremas y la condición sísmica fue establecida por el promedio de actividad sísmica de la zona la cual se estableció en sismos de 3.5 en la escala *Richter*.

Al tener completo estos análisis los resultados arrojados de las 8 secciones bajo las 4 condiciones mencionadas, se utilizó el software *CSSAP* (Borselli, 2026) para unir los resultados individuales de las secciones en un plano por condición de factor de seguridad (Fs) que nos permite evaluar en planta de las zonas de peligrosidad para la carretera federal numero 80 y analizar si se estaría comprometiendo la seguridad de otras infraestructuras que están cercanas al talud como la cortina del talud y la vía de transporte de luz eléctrica de la CFE.

Capítulo 1. Descripción geográfica y geológica del área de estudio.

1.1 Zona de estudio

El talud izquierdo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos más conocida como “La presa el Peaje”, es parte de un sistema de red hidráulica que incluyen 3 presas interconectadas (Presa Gonzalo N. Santos, Presa El Potosino y Presa San José; Figura 1) para el suministro de agua potable en la ciudad de San Luis Potosí, el área de estudio está ubicada en la parte suroeste de la ciudad de San Luis Potosí en las afueras de la comunidad de Escalerillas.

El área de estudio forma parte del sector central de la Sierra de San Miguelito, las coordenadas de la zona de investigación son latitud 22.093394 y longitud -101.099801, (283364 E, 2444658 N, proyección UTM zona 14N, datum WGS84,). La extensión del área a investigar es de 216,806 metros cuadrados.

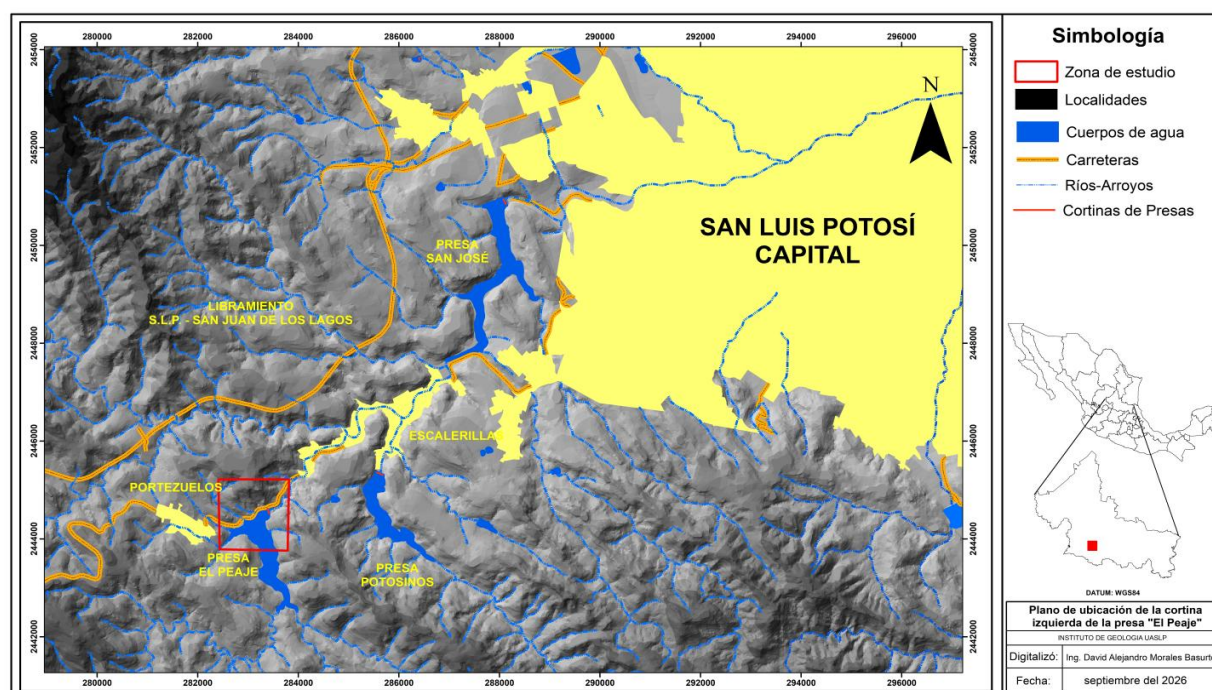


Figura 1. Plano de ubicación del área de estudio, ruta a seguir desde la ciudad de San Luis Potosí hasta la presa Gonzalo N. Santos (El Peaje), además de mostrar el sistema de red hidráulica que pertenece la presa que está en nuestra zona de estudio.

1.2 Fisiografía y geomorfología.

La presa Gonzalo N. Santos está ubicada en la provincia fisiográfica Mesa del Centro (INEGI, 2008; Figura 2) y la subprovincia de las Sierras y Llanuras del norte de Guanajuato (INEGI, 1986). La Mesa del Centro, también se conoce como Altiplanicie Mexicana y es descrita como un terreno plano interrumpido por sierras aisladas.

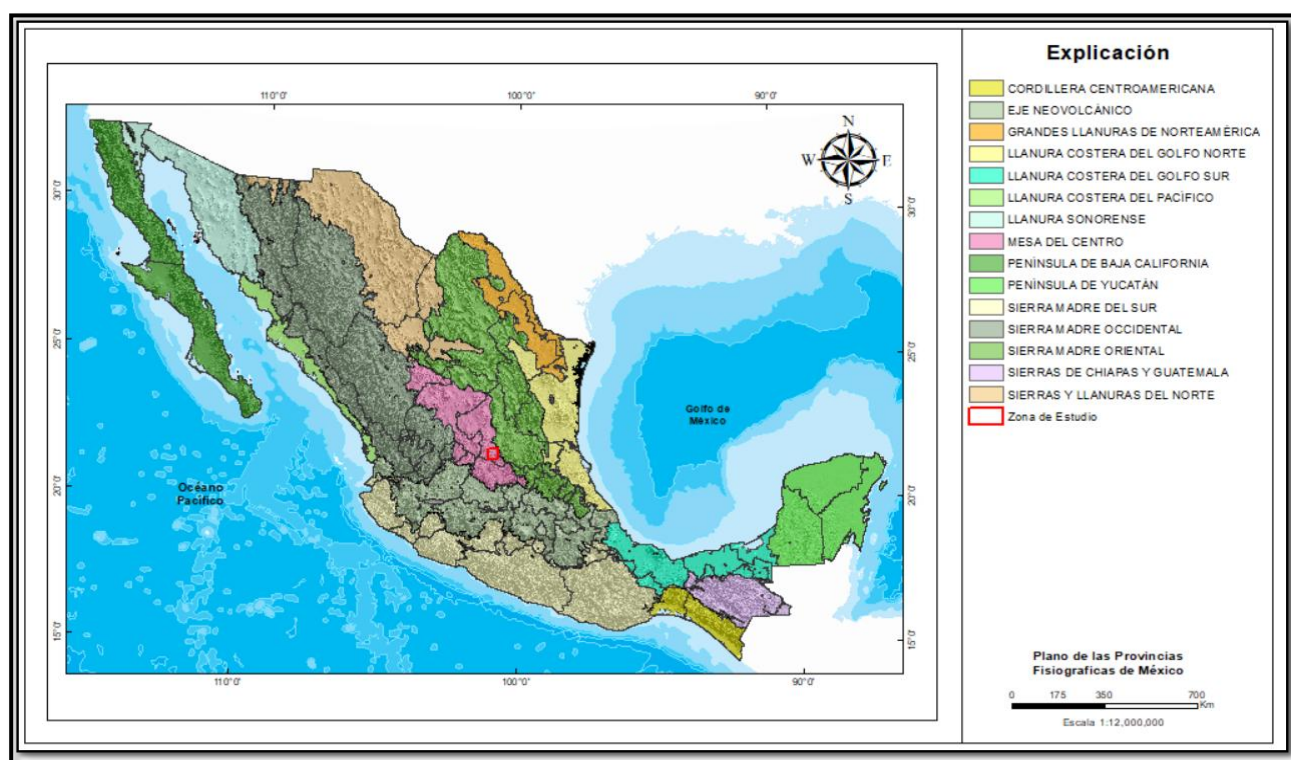


Figura 2. Plano de las provincias fisiográficas de México. Ubicación del área de estudio, está ubicada en la porción rosada que comprende a la provincia del Mesa del Centro (M.C., INEGI 2008).

En esta provincia dentro del estado de San Luis Potosí, gran parte de la morfología es cerril, predominando las sierras volcánicas orientadas noroeste-sureste, que tienen una altitud máxima de 2,630m.s.n.m. y se clasifican como pequeñas sierras altas con mesetas, (Figura 3), presentan pendientes mayores de 70° y contiene una saliente con una pared cercana a 90°.



Figura 3. La zona de estudio muestra una morfología madura a senil con altitud máxima de 2,200 m.s.n.m.

1.3 Hidrología.

La zona geohidrológica de San Luis Potosí, esta ubicada dentro de la región hidrológica N°. 37 denominada El Salado, caracterizada por cuencas de drenaje endorreico, lo que significa que el agua de lluvia y otros escurrimientos no tienen salida al mar y se acumulan en depresiones internas.

La zona geohidrológica abarca la cuenca del río Santiago, que actúa como su principal colector, y se forma a partir de los escurrimientos provenientes de una serie de pequeñas sierras ubicadas al oeste y suroeste de la Ciudad de San Luis Potosí. En este río se han construido tres presas para el control de avenidas, denominadas San José, El Potosino y El Peaje (Figura 4).



Figura 4. Presa Gonzalo N. Santos, mostrando una de las 3 presas que conforman la red de distribución de agua para la ciudad de San Luis Potosí, además controla el flujo de agua en el Río Santiago que cruza por la misma ciudad.

La conectividad hidrológica del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, se analizó mediante imágenes de alta resolución y en el software ArcMap 10.8.1 e indica que donde el color rojo muestra alta conectividad del agua de lluvia no se infiltra al subsuelo y corre superficialmente que es el 90% del talud de la presa, el color verde es media conectividad en esta área se satura de agua el subsuelo y empieza a correr superficialmente el agua y el color azul fuerte a azul turquesa son donde el agua de lluvia se infiltra en el subsuelo y se corta la conectividad superficial del agua, (Figura 5).

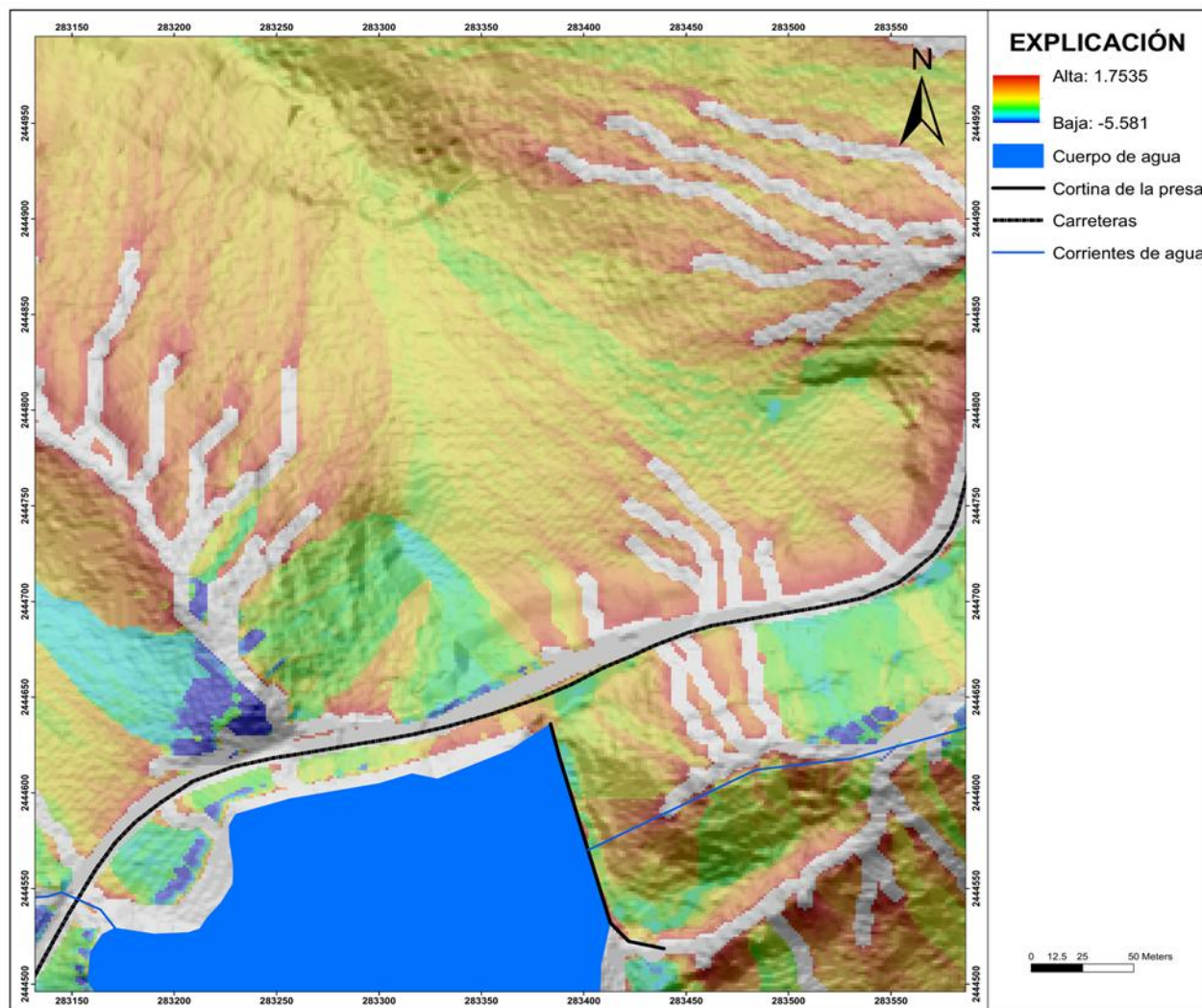


Figura 5.- Mapa de conectividad hidrológica del talud del margen izquierdo de la Presa Gonzalo N. Santos.

La zona de la parte izquierda del talud tiene una débil conectividad hidrológica debido a su alta permeabilidad lo que crea un serio problema para la estabilidad ya que genera presión hidrostática al interior del talud al irse percolando el agua y saturar el subsuelo.

1.4 Paleogeografía.

El área de estudio se encuentra en la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM), una cuenca sedimentaria marina. Morán-Zenteno *et al.*, (1985) describen la Cuenca Mesozoica del Centro de

México como una vasta cuenca sedimentaria que contiene alrededor de 700,000 km³ de sedimentos marinos desde el Triásico hasta el Cretácico tardío.

1.5 Provincias geológicas.

El área de estudio está situada en la provincia Faja Ignimbrítica Mexicana y cercana a la provincia Zacatecana (Figura 6). En el área de estudio, la provincia de la Faja Ignimbrítica Mexicana exhibe los rasgos estructurales que están dominados por los eventos Laramídicos y post-laramídicos que generaron fallas normales, laterales e inversas en la región, el patrón de las estructuras post-laramídicas regionales muestra tendencias NW-SE, NE-SW y N-S, lo que provocó un vulcanismo bimodal extensivo asociado a las fases de relajamiento (tectónica extensiva) del Oligoceno (Tristán-González *et al.*, 2009).

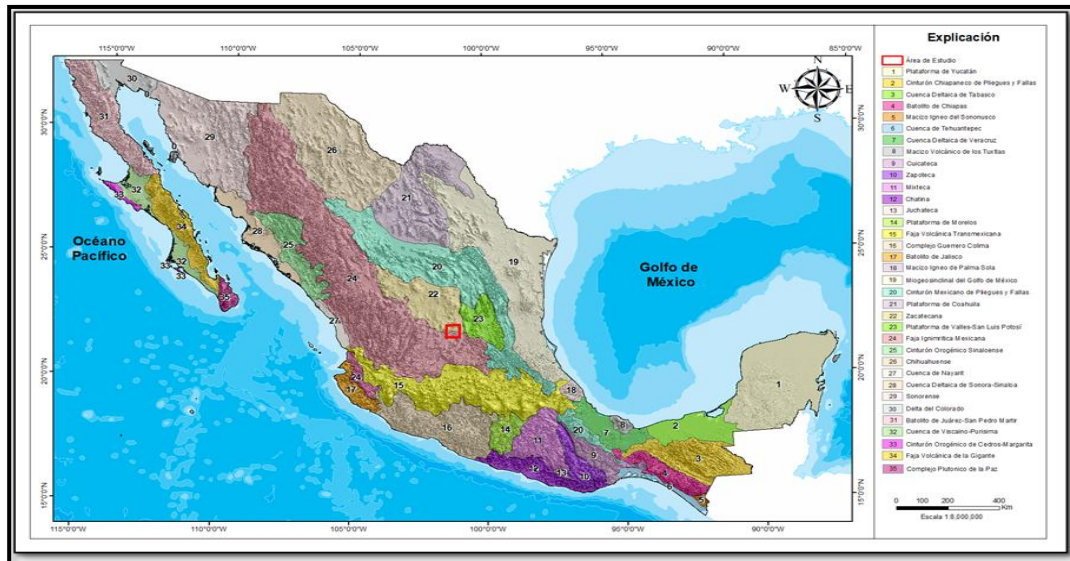


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio respecto a las provincias geológicas de México, localizada en la faja Ignimbrítica mexicana muy cercana a la provincia Zacatecana, (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992).

1.6 Terrenos Tectonoestratigraficos

El área de estudio está dentro del terreno tectonoestratigráfico Guerrero muy cercano al terreno Sierra Madre (Figura 7), el terreno Guerrero, es un terreno de composición compleja, formado mayormente por la acreción de arcos volcánicos.

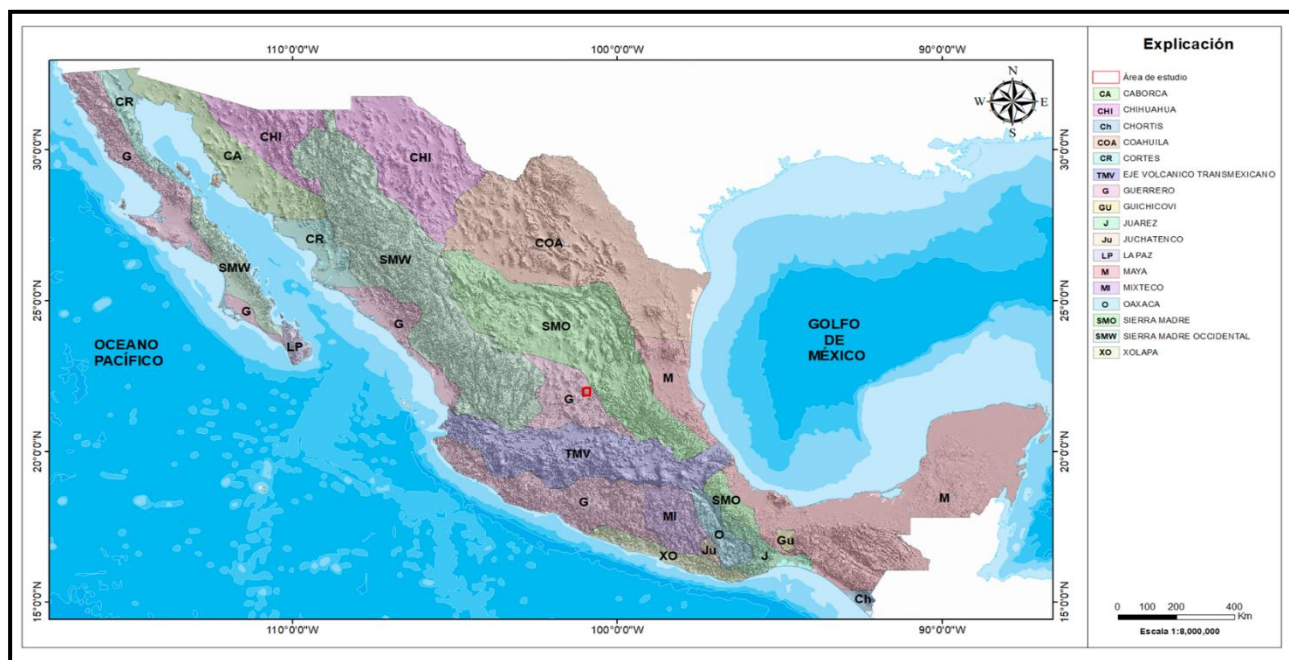


Figura 7. Plano tectonoestratigráfico de México. Ubicación del área de estudio, está localizado en la provincia tectonoestratigráfica de terreno Guerrero (modificado de Campa y Coney 1983).

1.7 Marco geológico regional.

La litología de la región esta detallada por Blanc Briones & Rodríguez Ríos, (1997) y por Tristán-González *et al.*, (2009), que describen que en la base de la columna estratigráfica regional hay rocas del Cretácico Superior, estas rocas tuvieron deformación dúctil-compresiva por efectos de la subducción de la placa Farallón, estas rocas están falladas, plegadas y cabalgadas.

La localidad más cercana al área de estudio en donde afloran estas rocas es la comunidad de Rodrigo en Villa de Reyes, donde se describe una secuencia cretácica con intercalación de lutitas y areniscas rítmica tipo Flysh, (Vélez-Basurto, 2006).

Las rocas del Paleógeno que están en la región pertenecen al Campo Volcánico de San Luis Potosí (Figura 8), que está compuesto por una gran variedad de magmas en emisiones multiepisodicas, asociadas a la subducción de la placa Farallón, (Tristán-González *et al.*, 2009). El Campo Volcánico de San Luis Potosí fue dividido en 6 complejos volcánicos que son los siguientes:

Complejo Volcánico Ahualulco, Pinos, Villa Hidalgo, La Repartición, Sierra de San Miguelito y Santa María, (Tristán-González *et al.*, 2009).

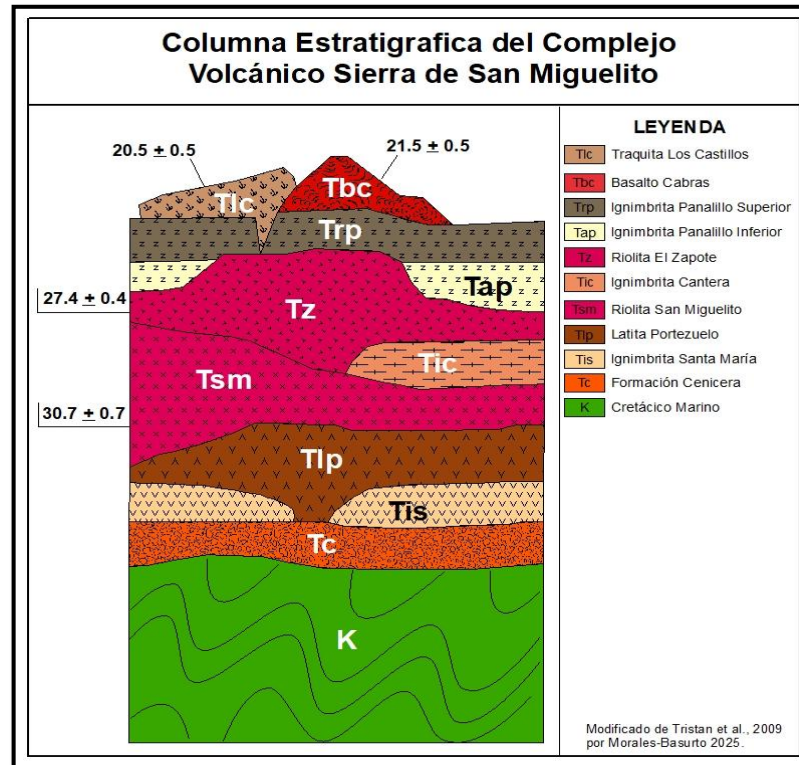


Figura 8. Columna estratigráfica regional del área de estudio, exhibe todas las unidades aflorantes en la región que fue elaborado en un compendio de 3 planos geológicos 1:20,000 para la realización completa de la columna estratigráfica tomado de Tristán-Gonzales *et al.*, (2009, redigitalización).

El talud del margen izquierdo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos está ubicado en el Complejo Volcánico de Sierra de San Miguelito.(Serna Bafún, 2018; Tristán-González *et al.*, 2009) con una columna estratigráfica detallada para este complejo y la geocronología de cada unidad dando un rango de edad para este complejo entre el Oligoceno al Mioceno (Tristán-González *et al.*, 2009; Figura 8).

1.8 Marco geológico local

La geología del talud del margen izquierdo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos y sus alrededores está constituida por 3 unidades de roca del Paleógeno, la riolita San Miguelito, la ignimbrita Cantera y la riolita Panalillo inferior, estas unidades volcánicas fueron originalmente descritas y cartografiadas a escala 1:50,000 (Figura 9) y a 1:20,000, (Blanco Briones & Rodríguez Ríos, 1997; Labarthe-Hernández & Jimenez-López, 1992).

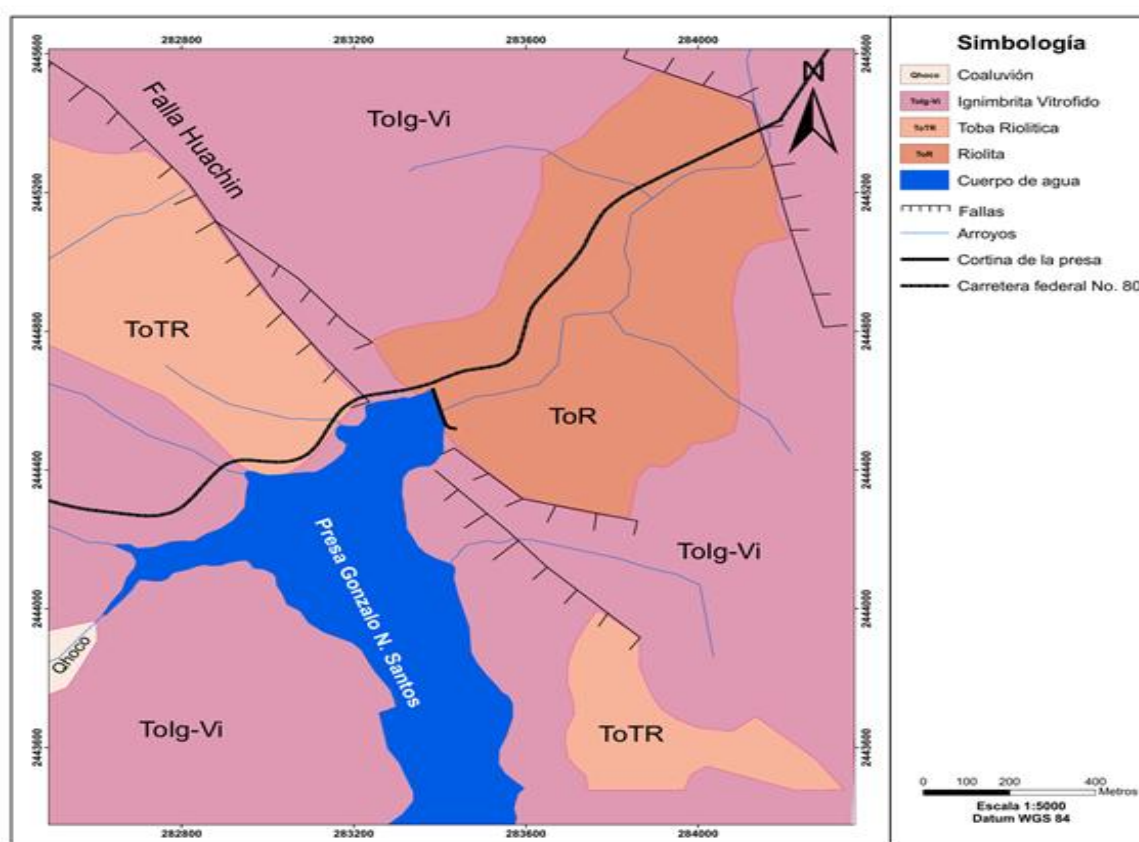


Figura 9. Plano geológico estructural (Blanco Briones & Rodríguez Ríos, 1997), recorte de la carta geológico-minera F14-A83, escala 1:50,000, modificado de Blanco Briones & Rodríguez Ríos (1997) y ajustado a la zona de estudio en escala 1:5,000.

1.9 Clima y vegetación.

La zona centro de San Luis Potosí se caracteriza por tener un clima semiárido con temperaturas cálidas durante todo el año. Las temperaturas oscilan entre los 20°C y los 30°C durante el día, y por las noches pueden bajar hasta los 10°C.

La cobertura vegetal se distribuye en parches dejando zonas de interparchado con suelos desnudos. En la zona de estudio resalta la presencia de matorrales micrófilos, rosetófilos y crasicaules, así como algunas gramíneas y pastos anuales de temporada primaveral, (Figura 10). La cobertura vegetal corresponde a comunidades adaptadas a condiciones semiáridas y presenta una distribución discontinua, con áreas de roca y suelo expuesto, las temporadas de las lluvias en la región son de mayo a septiembre y la precipitación media anual está en el intervalo de 380 mm a 540 mm.

La influencia de la vegetación en el análisis de estabilidad de este talud pasa a una condición secundaria ya que no está cuantificada la influencia de la cobertura vegetal.

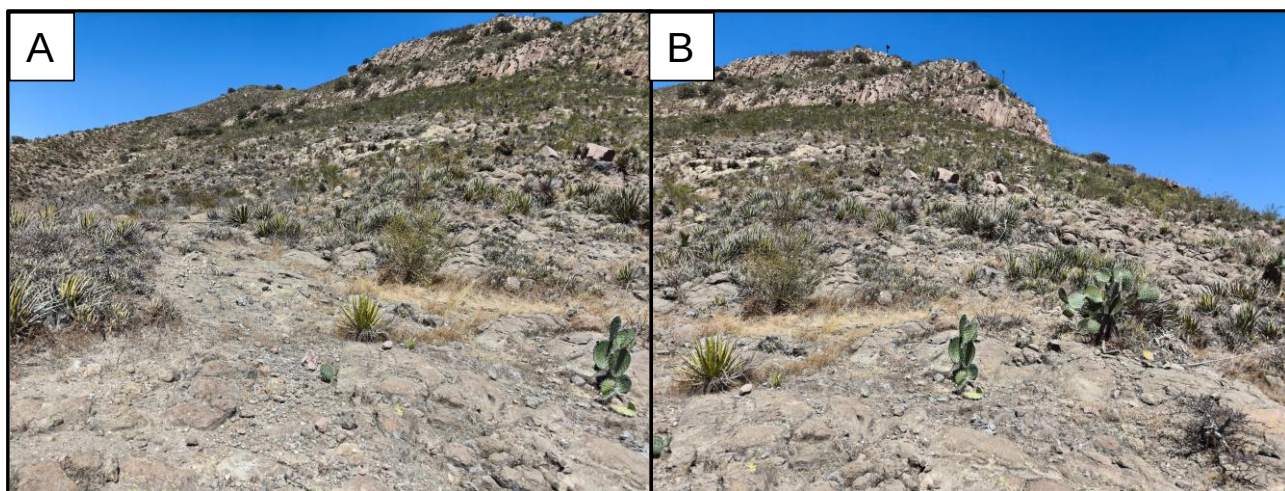


Figura 10. Fotografía A y B, mostrando la vegetación total sobre el talud del margen izquierdo de la presa, que son pastizales anuales de temporada, gramíneas y diversos matorrales.

Capítulo 2. Caracterización geotécnica y de estabilidad de taludes de los macizos rocosos.

2.1 Descripción litológica del talud.

La litología para el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos y sus alrededores fue cartografiada con enfoque geológico-estructural-geotécnico, por lo que no solo se dividieron las unidades volcánicas si no también las diferentes fases volcánicas eruptivas de cada unidad presente en la zona de estudio (Figura 11), las unidades volcánicas que afloran en la zona de estudio son: riolita San Miguelito (Tsm), ignimbrita Cantera (Tic) y la ignimbrita Panalillo miembro inferior (Tap; Figura 12), también está presente una brecha tectónica de gran dimensión por efecto de la falla lateral derecha Juachín (Torres-Hernández et al., 2006, TpBx; Figura 11).

El talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos es parte de una estructura geológica mayor que es un domo riolítico, que aún conserva la mayoría de sus características litológicas y estructuras originales del momento de su emplazamiento, (Labarthe-Hernández & Jimenez-López, 1992; Figura 12).

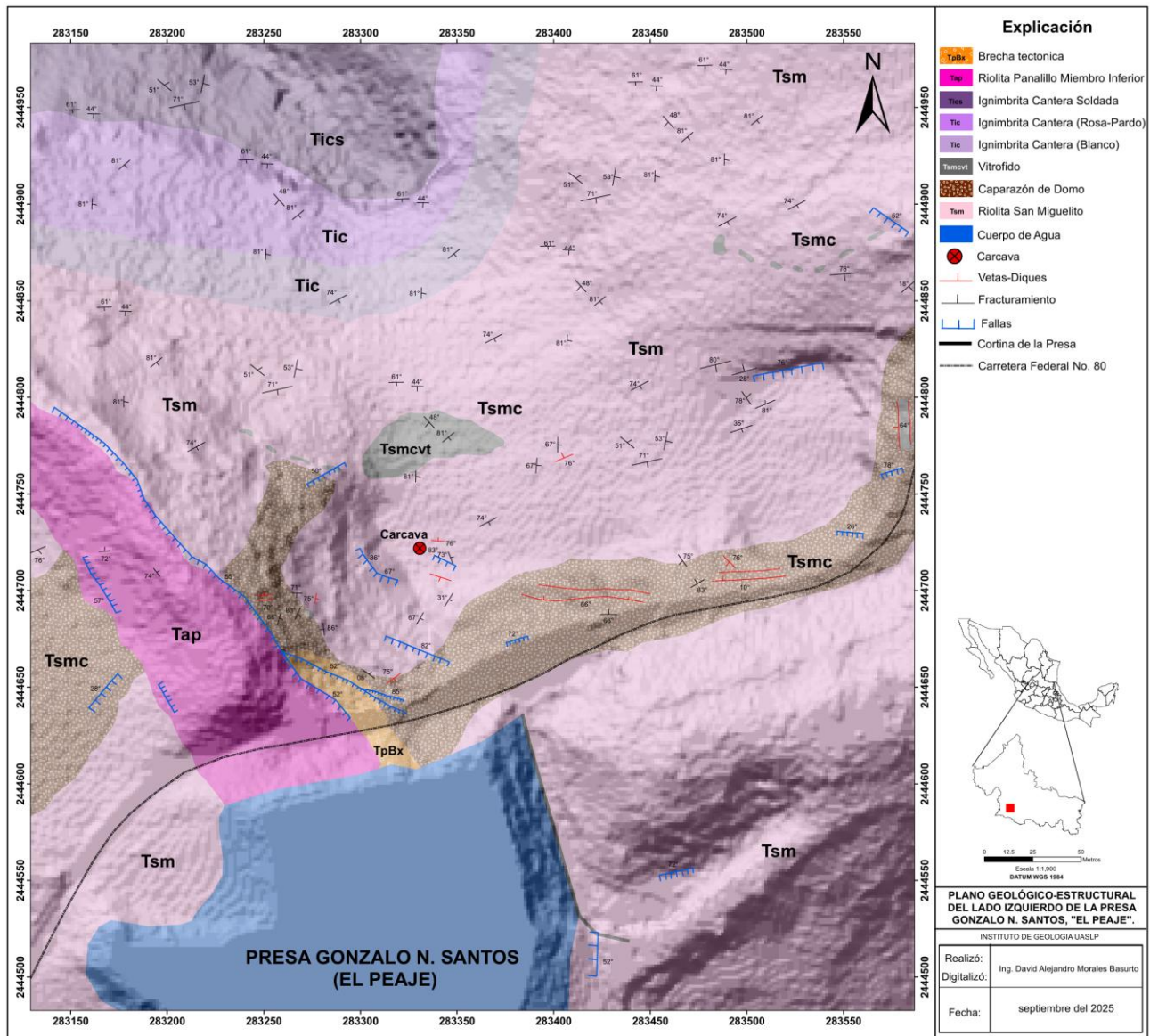


Figura 11. Plano geológico-estructural-geotécnico, exhibiendo la geología del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos.



Figura 12. Domo riolítico “mesa El Panal”, fotografía exhibiendo las divisiones de las 3 unidades de rocas volcánicas existentes en el talud izquierdo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos y la brecha tectónica, (TpBx).

La mayor parte del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos está conformada por la unidad riolita San Miguelito (Tsm, Figura 12) que está presente en el pie del talud y toda la parte central del mismo, es donde está siendo afectado por continuos deslizamientos y es el foco de atención del presente trabajo mientras que la cabeza del talud está conformada por la unidad ignimbrita Cantera, (Tic; Figura 11).

La riolita San Miguelito (Tsm, Figura 13), es una roca de color rosáceo a gris claro en fresco y conteniente mineral de cuarzo subhedral, sanidino euhedral en mayor proporción contiene minerales accesorios como son la magnetita, (Labarthe-Hernández & Jimenez-López, 1992; Serna Bafún, 2018).

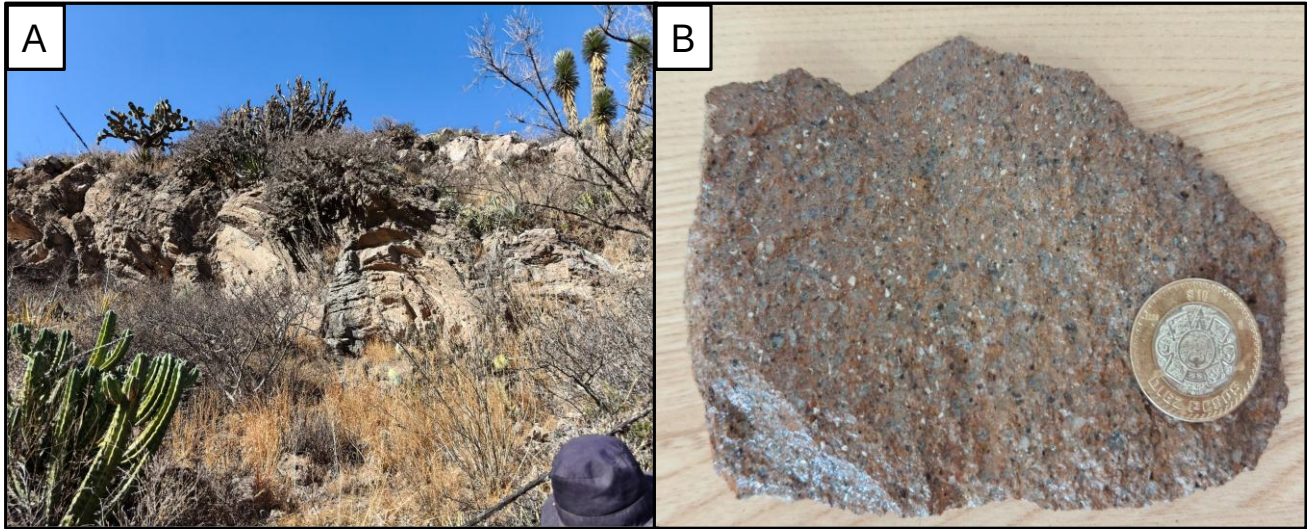


Figura 13.- Fotografía A muestra el afloramiento de la riolita San Miguelito con estructura de pliegues del flujo de la lava, fotografía B, es una muestra de mano de la riolita San Miguelito mostrando los fenocristales como cuarzo, feldespatos alcalinos (sanidino) y magnetita.

Esta unidad volcánica es dividió en 3 partes (Figura 11 y 15), ya que cuenta con características litológicas diferentes a pesar de estar dentro de la misma unidad volcánica:

1. Flujo inferior de riolita San Miguelito (Tsm(i)), que consiste en flujos de lava riolíticos masivos desvitrificados de la parte inferior de la estructura domica riolítica, (Figura 15).
2. Caparazón del domo (Tsmc), es la parte central del domo riolítico y está constituido por arenas volcánicas, vidrio volcánico y fragmentos angulosos de vidrio y del flujo riolítico inferior, (Figura 14).
3. Flujo superior de riolita San Miguelito (Tsm(s)), que está constituido por flujos masivos riolíticos desvitrificados y es parte superior de la estructura domica, (Figura 15).

El caparazón del domo (Tsmc, Figura 14), fue subdividido en 4 partes por tener diferentes características litológicas:

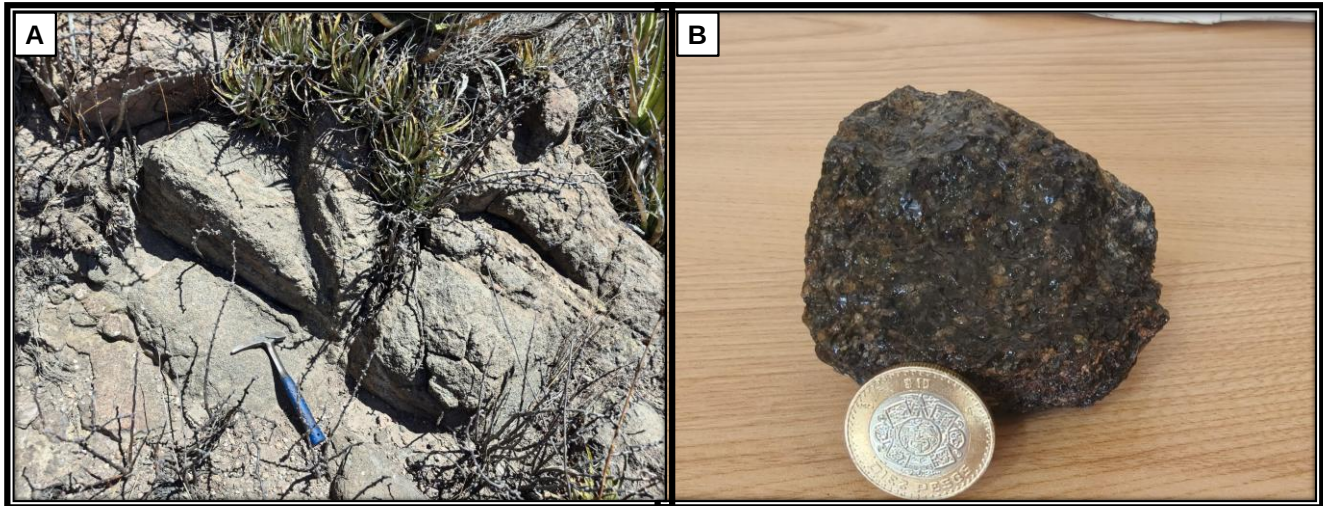


Figura 14.- A) Afloramiento de vidrio volcánico en lentes en la parte superior del caparazón del domo. B) muestra de mano del vidrio volcánico exhibiendo fragmento de pómez y fragmento dando la apariencia de la textura porfídica granular.

1. En la parte inferior encontramos un vidrio masivo desvitrificado (Tsmvd), de color negro a verdoso, contiene fragmentos de algunos pequeños clastos de líticos, pómez simulando crecimiento de cristales de feldespatos y plagioclasas, tiene fractura concoidal, los fragmentos de vidrio volcánico que están envueltos en el caparazón del domo están alterados y son fácilmente desgranables.
2. Tefra, que está constituida por arenas de color verdoso a beige.
3. En la parte superior de la Tefra de manera concordante está la brecha de desintegración que contiene fragmentos angulosos de vidrio volcánico desvitrificado y riolíticos en matriz arenosa cortado por diques de vidrio volcánico provenientes del centro de emisión del domo riolítico.
4. En la parte superior del caparazón del domo (Tsmc) y dentro del flujo superior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), se encuentra el vidrio volcánico lenticular (Tsmvd, Figura 14), proveniente del centro de emisión del domo riolítico como últimos pulsos eruptivos, (Labarthe-Hernández & Jimenez-Lopez, 1993).

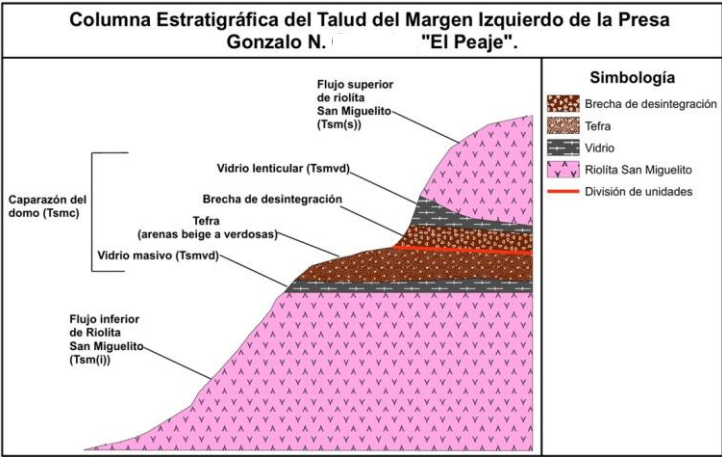


Figura 15.- Sección geológica ilustrativa para mostrar un ejemplo de las divisiones y subdivisiones de la unidad volcánica San Miguelito (Tsm) que componen al domo. riolítico y al margen izquierdo de la

La desvitrificación del vidrio volcánico causó aureolas de litofísas, que están principalmente dentro de los flujos masivos de la riolita San Miguelito (Tsm) y en menor medida como aureola de los diques acompañantes del vidrio volcánico en la parte del caparazón del domo (Tsmc; Figura 16).

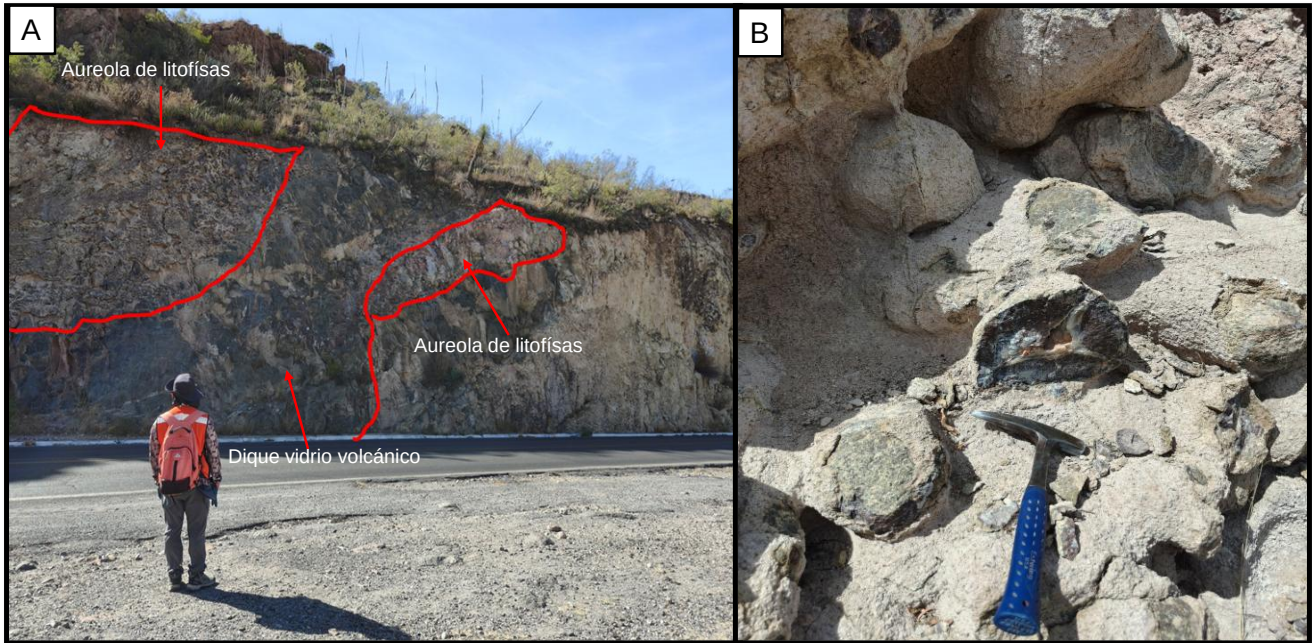


Figura 16.- A) Fotografía mostrando el dique de vidrio volcánico (Tsmvd) con su aureola de desvitrificación causando las litofisas. B) Fotografía exhibiendo las litofisas de cercas en los bordes del dique de vidrio volcánico.

La unidad volcánica ignimbrita Cantera (Tic), consiste de ignimbritas tobáceas que fueron divididas en 3 partes por sus características litológicas físicas ya que cuentan con diferencia marcada entre los 3 horizontes de fases volcánicas a pesar de ser la misma unidad, (Figura 17 A).

La base de la unidad Ignimbrita Cantera (Tic blanco), son unas cenizas riolíticas con espesor de 2 a 10 metros de color blanco lechoso, masivo sin estratificación definida, contiene abundante pómez sin colapsar en tamaño de 2 cm en una matriz de ceniza, contiene 30% de fenocristales de cuarzo y sanidina de mineral accesorio está presente la biotita en matriz de ceniza, tiene 2% de líticos verdes a rojizos de areniscas y cafés de rocas volcánicas sin notable fracturamiento, (Labarthe-Hernández & Jimenez-López, 1992, Figura 17B).

En la parte central de la unidad Ignimbrita Cantera (Tic pardo-rosa), cambia rápidamente a un flujo de ignimbrita riolítica sin soldar, no presenta gradación ni estratificación y poco fracturada

contiene pómez, fenocristales de cuarzo y sanidino, también como mineral accesorio cuenta con biotita y líticos de color verdoso, (Labarthe-Hernández & Jimenez-López, 1992, Figura 17C).

En la cúspide de la Ignimbrita Cantera (Tics), en una rápida transición la roca pasa en una ligera capa delgada de ignimbrita parcialmente soldada a paquetes de flujo volcánico bien soldados. El color de la roca es de tonos rosáceos a grisáceos y en sectores cafés grisáceos con textura holocristalina, eutaxítica y porfírica, (Figura 17 D).

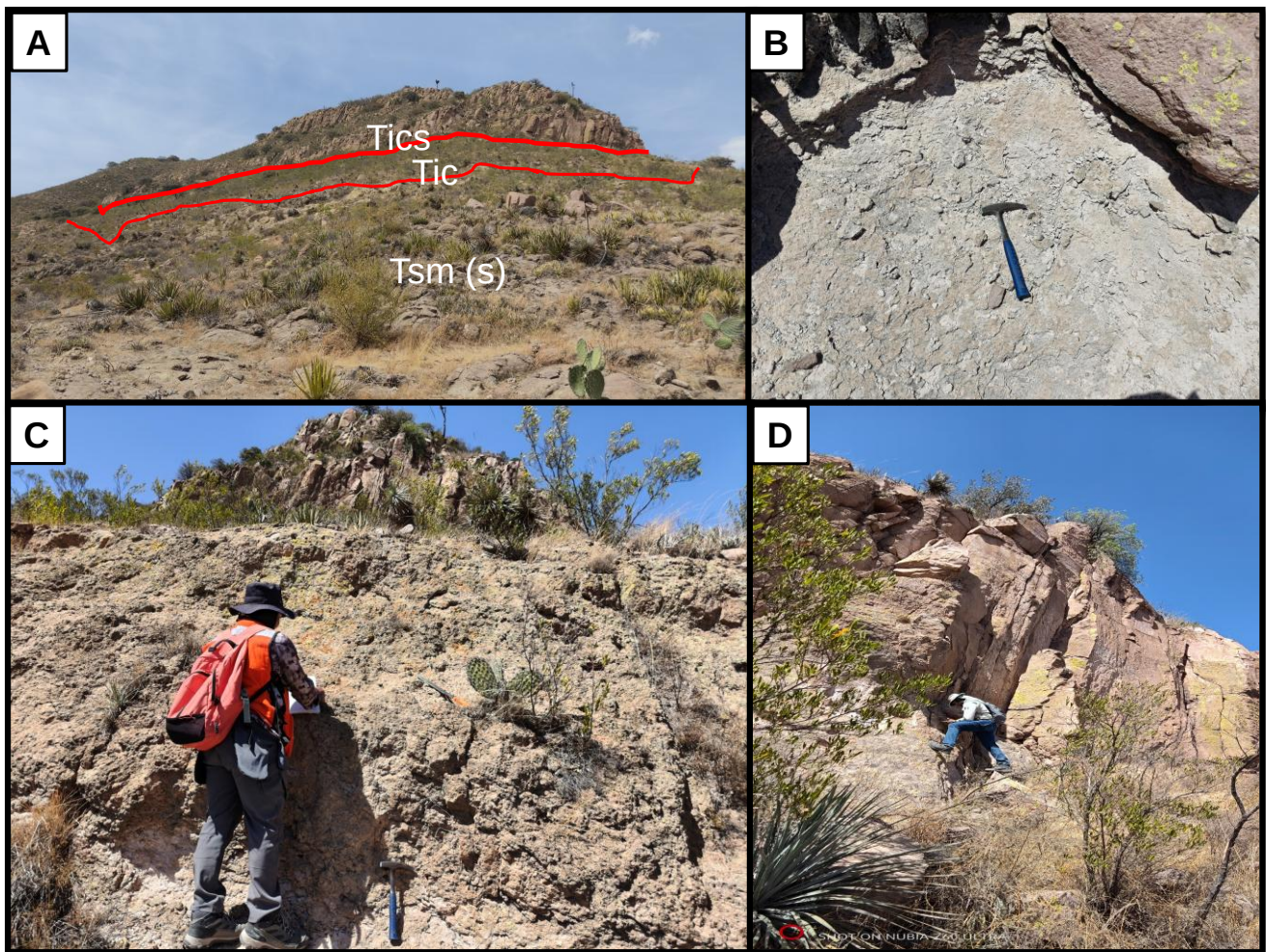


Figura 17 A) Fotografía mostrando las unidades superiores del domo riolítico donde hay una rápida transición de ignimbrita cantera no soldada a la ignimbrita cantera soldada que exhibe diaclasamiento y basculamiento al NE. B) Afloramiento de la ignimbrita tobacea de color blanco que es la base de la ignimbrita Cantera no soldada. C) Afloramiento de la ignimbrita Cantera no soldada. D) Fotografía del afloramiento de la ignimbrita Cantera soldada con diaclasamiento y basculamiento al NE.

La mineralogía de la roca es 40% de sanidino euhedral, 40% de cuarzo anhedral a subhedral, 15% de oligoclasa débilmente zoneado, 4% de biotita y 1% de magnetita alterándose a hematita con matriz de textura vitroclástica en las áreas más alejadas de los fenocristales, (Labarthe-Hernández & Jimenez-Lopéz, 1992). Presenta un fracturamiento o diaclasamiento de forma columnar muy visible, su cima es de un color rosado más intenso que es de donde extraen la mayor parte de la roca ornamental que se trabaja en el poblado de Escalerillas, (Figura 17 D).

La unidad volcánica Ignimbrita Panalillo miembro inferior (Tap), aflora a un costado del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos el afloramiento está controlado por la falla Juachín, en forma de dique y se originó sincrónicamente con el fallamiento, estos diques consisten de diques piroclásticos de riolita-ignimbrita con material volcánico de diferente granulometría, (Figura 18).

La mineralogía de la roca consiste en 70% de cuarzo, 4.76% de feldespato alcalino, 9.87% de plagioclasas y 1.98% de hematita con matriz vitroclástica, (Torres-Hernández *et al.*, 2006), el emplazamiento del dique tiene orientación NW-SE con buzamiento de 70° al suroeste, en la parte superior del dique está un depósito de brecha de co-ignimbrita de hasta espesor los 5 metros, en el área de estudio que consiste de piroclastos demasiado pesados y grandes que colapsaron de la columna del dique por su peso.



Figura 18.- Fotografía mostrando el afloramiento de la unidad ignimbrítica Panalillo miembro inferior, la roca es de color rojizo con silicificación de moderada a pervasiva.

La brecha tectónica (TpBx), esta entre el talud estudiado y el dique de Ignimbrita Panalillo miembro inferior, es producto del fallamiento lateral derecha entre bloques creando esta zona de espesor de hasta 20 metros contiene fragmentos angulosos de diversos tamaños (Cataclasita, Figura 19 B).

Los clastos son de la riolita San Miguelito y la ignimbrita Panalillo miembro inferior ya que se desarrollaron la brecha tectónica y la ignimbrita panalillo sincrónicamente, también contiene harina de falla (*fault gouge*), con textura fina a muy fina de color blanco y carece de cohesión es fácilmente deleznable, (Figura 19).

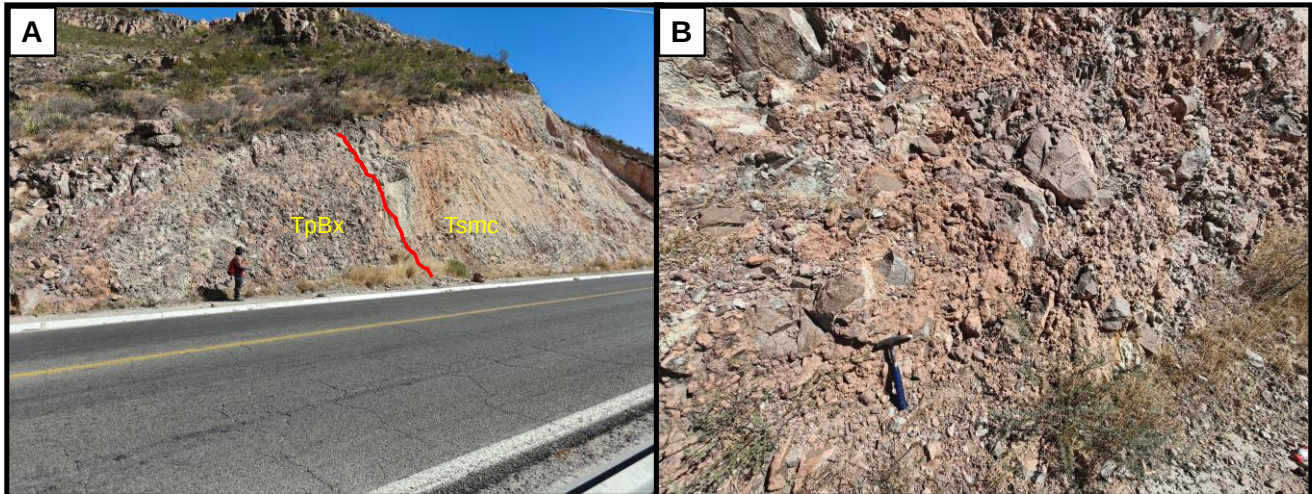


Figura 19.- A) Brecha tectónica producto del movimiento de la falla principal Juachín que es una falla normal con componente lateral derecho, además de que existen fallamiento menor que se desprenden de la falla principal que son conocidos como fallas tipo cola de caballo. B) acercamiento de la brecha tectónica, mostrando una matriz fina arcillosa con clastos de diferentes tamaños angulosos y subangulosos de la riolita San Miguelito e ignimbrita panalillo con moderada compactación.

2.2 Descripción de los tipos de discontinuidades del talud.

En el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos existen diversas discontinuidades litológicas y estructurales, en las litológicas son los contactos existentes entre cambios de unidades volcánicas (riolita San Miguelito, ignimbrita Panalillo miembro inferior e ignimbrita Cantera, Figura 20), además de existir límites por cambios de facies volcánicas dentro de la misma unidad las mismas unidades volcánicas, pero de cambio de facies volcánicas.

En estos casos de investigación geotécnica se deben tomar en cuenta todos estos rasgos ya que implica un cambio en las propiedades físicas de dureza principalmente en el caso de nuestro talud este ejemplo se ve en la unidad San Miguelito que se dividió en 3 por sus características geomecánicas (flujo riolítico inferior caparazón del domo o brecha de desintegración y flujo riolítico superior, Figura 20).

Las discontinuidades estructurales en el talud son la brecha tectónica producto de la falla normal con componente lateral derecho Juachín, los diques y lentes de vidrio volcánico producto de

los fluidos residuales del evento eruptivo del domo riolítico, además de las familias de fracturamiento en el talud, (Figura 20).

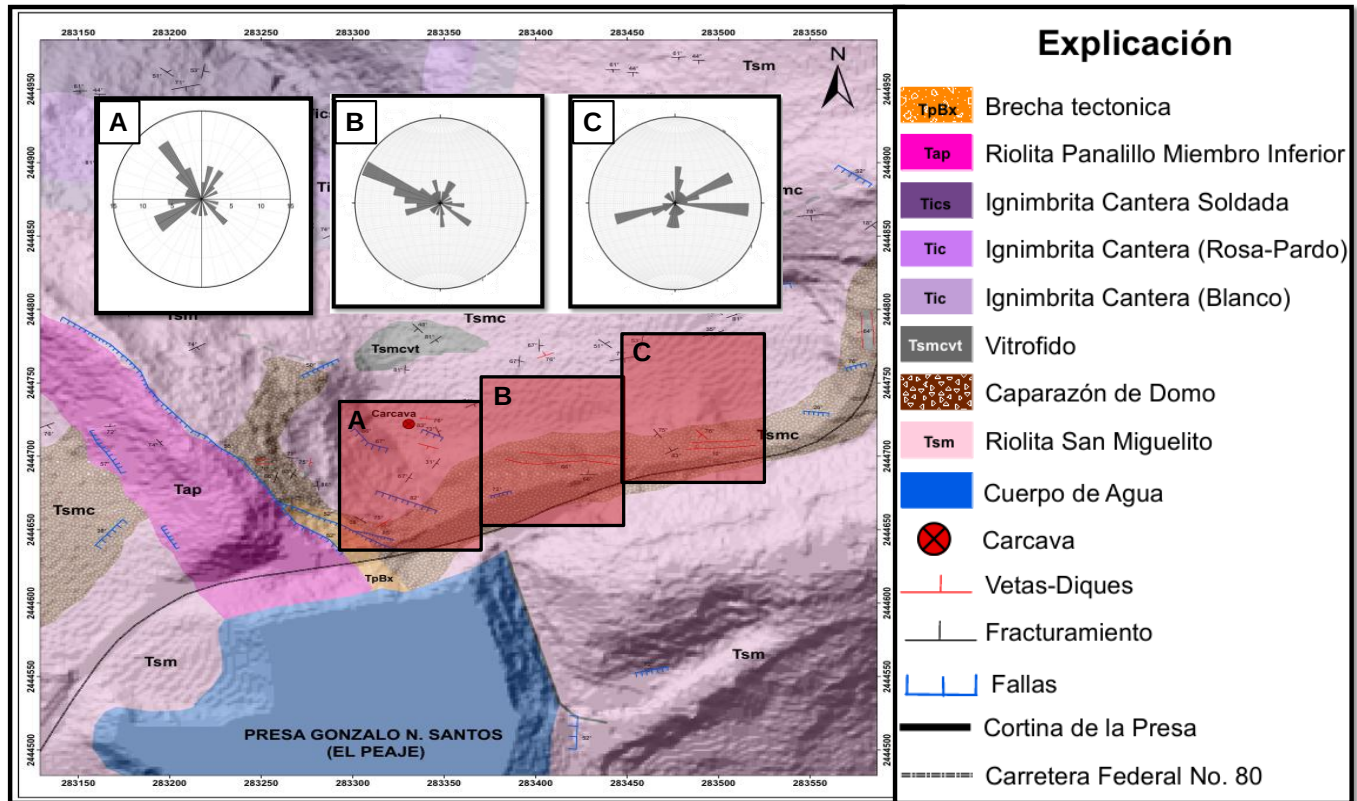


Figura 20. Plano geológico-estructural-geotécnico de la zona de estudio, dividiendo la parte del talud que tiene una mayor afectación en 3 partes para el estudio estructural de manera más detallada, zona A, parte del talud derecha, zona B, parte central del talud y zona C, parte izquierda del talud, cada zona fue analizada con el software Stereonet v. 7 y se obtuvieron los diagramas de rosas para identificar las tendencias del fracturamiento y cuantas familias coexisten en el talud a estudiar.

Las falla existente y principal es la falla Juachín que es una falla normal con componente lateral producto del evento tectónico de pull apart del valle de Juachín, Serna Bafún, (2018) lo menciona como un evento tectónico del Oligoceno donde se creó el valle de Juachín por los esfuerzos tectónicos regionales de las fallas laterales, (Figura 21).

Estas fallas estuvieron activas en esa época y hacia los extremos norte y sur cerraban con un conjunto de zonas de fallas descritas como fallas en flor o también conocidas como fallas de cola de caballo, que se desprenden de la falla principal como una serie de fallas secundarias, en el caso de

nuestra zona de estudio nos encontramos al sur del valle de Juachín y tenemos una parte de la serie de fallas en forma de flor o cola de caballo, (Figura 21).

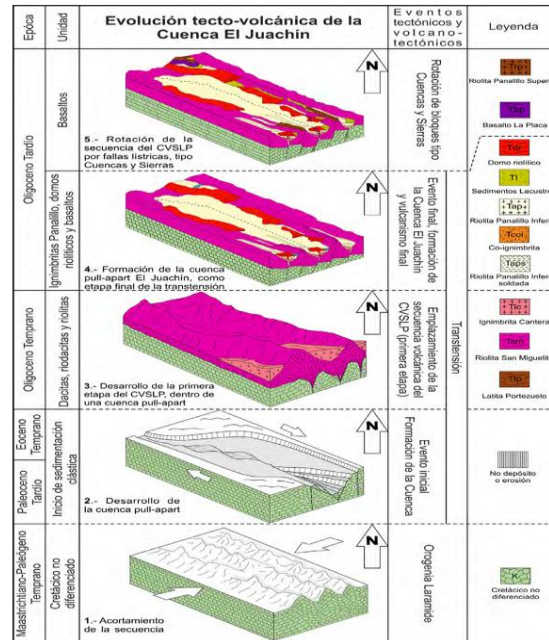


Figura 21. Imagen tomada de Serna Bafún, (2018), donde representa la evolución tectónica del valle Juachín que esta inmediatamente al norte de nuestra área de estudio, en la figura 2 del cronograma se indica el momento de la apertura de la cuenca Pull Apart dejando ver en el extremo sur una serie de fallas que se desprende del esfuerzo principal que es una falla lateral y es en esa porción donde está ubicado el talud que fue estudiado.

En general tenemos dos familias principales de fracturamiento (NW-SE y NE-SW, Figura 22) y una tercera familia con presencia esporádica en el talud (W-E), para el fracturamiento tenemos un fracturamiento de moderado a intenso en la zona, dividiendo el talud en 3 secciones A, B y C de Oeste al Este, para el análisis por zona del talud y tener un mejor control, el programa para analizar los datos estructurales fue *Stereonet* v. 11, (Figura 22).

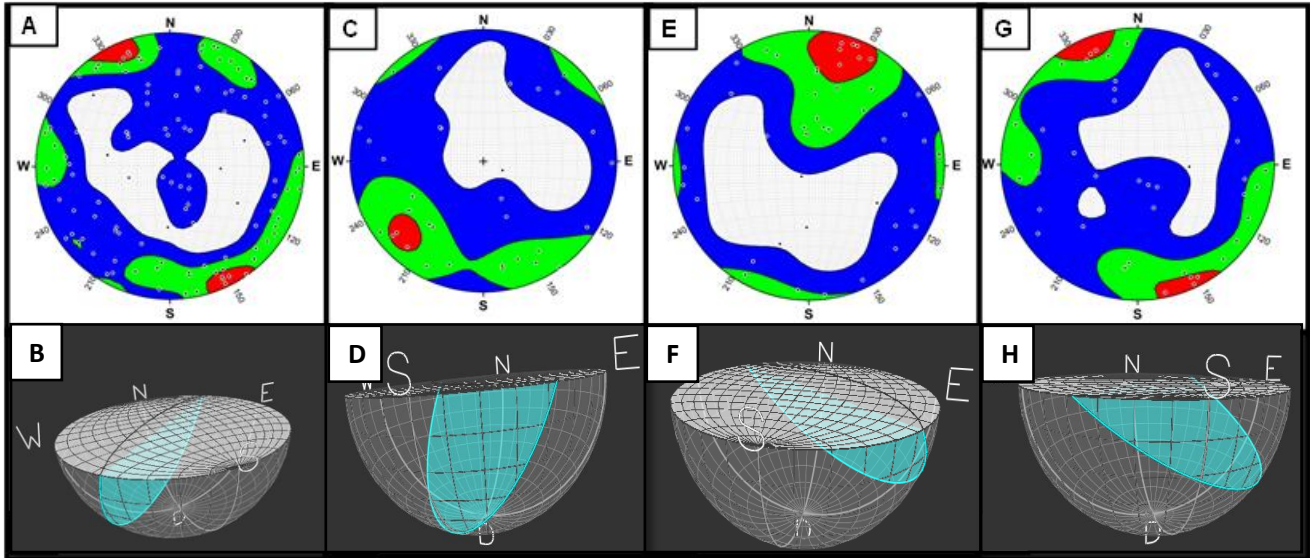


Figura 22. Ilustración de tendencias de fracturamiento de cada sector del talud. A) estereograma de polos donde en rojo se marca la tendencia principal del buzamiento de las fracturas en general del talud que sería la dirección NE-SW, B) estereograma se muestran solo círculos máximos en 3D para representar la dirección y ángulo de buzamiento general del talud, C) estereograma de polos del sector A donde se aprecia que el fracturamiento principal es NW-SE, D) estereograma se muestra una perspectiva de un plano en 3D para representar la dirección (NW-SE) y el ángulo de buzamiento de la tendencia en fracturamiento en esa zona es al SW influenciado por el fallamiento, E) estereograma de polos que muestra la tendencia del buzamiento del fracturamiento en el sector B, con preferencia al NE. F) estereograma de polos 3D para representar la dirección y buzamiento de la tendencia de fracturamiento del sector B, G) estereograma de polos del sector C, donde se representa la tendencia de buzamiento del fracturamiento en ese sector que es NW y SE, H) estereograma de polos en 3D del sector C para representar la dirección y buzamiento de la tendencia de fracturas en ese sector.

En la zona A el fracturamiento es más intenso, (pervasivo a moderado) asociado a las zonas de fallas antes mencionadas y al emplazamiento del miembro inferior de la ignimbrita Panalillo, siendo un factor importante en el análisis de estabilidad y peligro del talud.

En esta porción del talud domina el fracturamiento NW-SE (familia 1) que está acorde con el dominio estructural regional marcado por el Sistema de Fallas San Luis – Tepehuanes conjugado con la segunda familia de fracturas con rumbo NE-SW, (Figura 23).

En la zona B tenemos aun la presencia de la zona de fallas y la influencia del fracturamiento por emplazamiento que creó la ignimbrita Panalillo siendo aun un fracturamiento pervasivo en parches a moderado con relleno de sílice por la desvitrificación de los diques de vidrio volcánico y de la unidad San Miguelito. Esta zona es la que muestra mayor afectación y fue donde ocurrió el gran deslizamiento

de rocas en el 2011, a la fecha aún continúa teniendo caídas de bloques por lo que la presencia de estas discontinuidades estructurales está teniendo un rol importante para evaluar el peligro del talud.

En la parte central del talud el fracturamiento que se observa corresponde a la familia 1 NW-SE (Figura 23) con presencia de la tercera familia de fracturamiento (E-W) por su poca frecuencia de aparición respecto a las dos primeras, este fracturamiento también sigue el patrón regional del Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes.

La zona C en el extremo este ya con menor influencia de la falla principal muestra un fracturamiento más moderado, aumentando el patrón de fracturamiento NE-SW, el fracturamiento que domina en esta porción del talud (familia 1) seguida de NE-SW (segunda familia) y aun con la presencia de la tercera familia E-W, (Figura 23). El relleno de las fracturas por sílice disminuye, considerando que esta zona se aleja de la influencia de la zona de fallas, en esta zona aparecen las 3 familias de fracturamiento lo cual también es un punto a considerar para el análisis de peligro del talud.

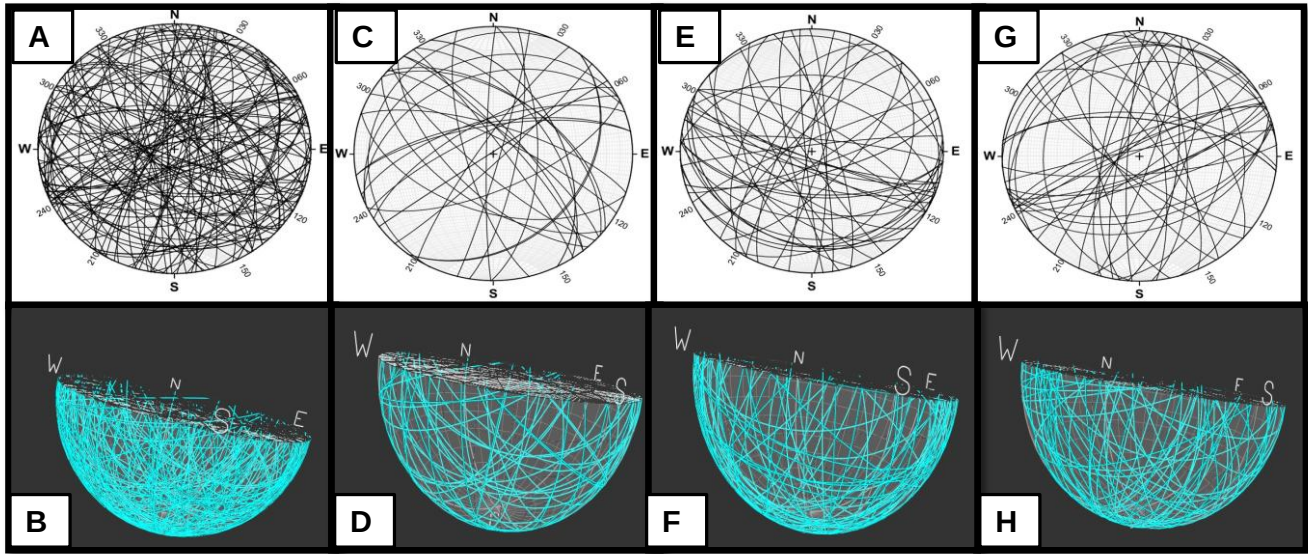


Figura 23. A) estereograma del fracturamiento del talud en general, B) estereograma en 3D para observar las direcciones y ángulos de corte de las fracturas a profundidad del macizo rocoso, C) estereograma del sector A en 2D para ver la dirección y buzamiento del fracturamiento, D) estereograma en 3D para observar la dirección y ángulos de corte del fracturamiento dentro del macizo rocoso, E) estereograma del sector B en 2D para observar direcciones y ángulos de buzamiento, F) estereograma en 3D donde se presenta el comportamiento del fracturamiento en ese sector en el interior del talud, G) estereograma del sector C en donde se representan los ángulos y direcciones del fracturamiento de ese sector en 2D, H) estereograma en 3D para mostrar el comportamiento del fracturamiento en el sector C en el interior del talud.

2.3 Descripción de grado de alteración e intemperismo del talud.

El talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos tiene un intemperismo moderado en las capas superficiales de la roca con excepción de la brecha volcánica (caparazón de domo) y el vidrio volcánico ya que tiene una mayor argilización por intemperismo debido a su mayor porosidad y menor dureza. Las alteraciones son:

1.- La desvitrificación de la riolita San Miguelito parte media y superior que en sectores en forma de parches se encuentran pervasivamente desvitrificada, producto de esta alteración se crearon litofísas, (geodas, Figura 24 A) y también se crearon fracturas rellenas de cuarzo lechoso brotoidal-coloidal emplazado en el fracturamiento de las mismas unidades, (Figura 24 C y D).

2.- Alteración hidrotermal producto del emplazamiento de la unidad ignimbrita Panalillo miembro inferior, en la parte izquierda del área de estudio, creó zonas con mayor oxidación de forma local y cercana a la zona de emplazamiento, en esta zona de oxidación podemos encontrar

esporádicamente jaseroide, además de una silicificación de moderada a pervasiva sobre la misma unidad.

También el hidrotermalismo generado durante el emplazamiento de esta roca creó una zona de argilización donde podemos encontrar zeolitas y existe una mina abandonada a tajo abierto de zeolitas a 200 metros al NW del emplazamiento de esta unidad, también generó sectores de arcilla recocida o recrystalizada, (con apariencia de cerámica, Figura 24 B) principalmente en donde estuvo en contacto directo con la brecha volcánica o caparazón de disgregación del domo riolítico.

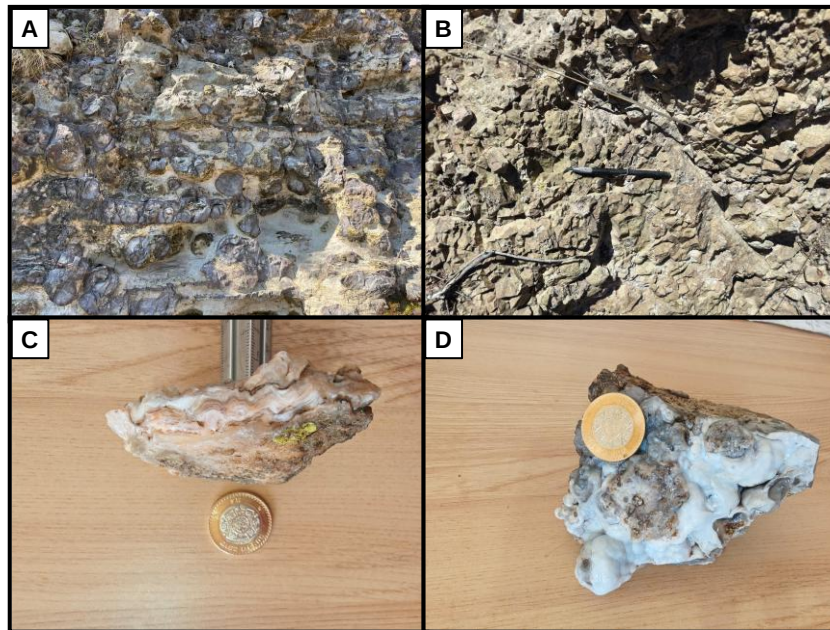


Figura 24. A) Fotografía de afloramiento de parches de litofíasas en la riolita San Miguelito. B) zona de reacción por contacto directo entre la fuente de emisión de la ignimbrita Panalillo miembro inferior y La brecha volcánica de disgregación, donde las arenas y arcillas de la brecha fueron “recocidas” en aspecto semejante a la cerámica. C) Muestra de mano de las fracturas de la riolita San Miguelito producto de la desvitrificación en donde se observa sílice coloidal bandeado con presencia moderada de óxidos en el interior del coloide. D) muestra de mano de la sílice botoidal de la riolita San Miguelito producto de la desvitrificación y también se encuentran rellenando fracturas.

La zona de reacción de los fluidos hidrotermales del emplazamiento de la unidad ignimbrita Panalillo miembro inferior es corta, utilizando las fallas secundarias de la falla Juachín para transportarse, fracturando las rocas menos permeables como la riolita San Miguelito y una argilización moderada de

las rocas permeables o más porosas producto de la desvitrificación como es el caso del dique de vidrio volcánico.

3.- Alteración hidrotermal profunda o propilítica, excluyendo el evento hidrotermal del domo riolítico existe un segundo hidrotermalismo cercano a la falla principal Juachín y dentro de la zona de fallas secundarias de la misma falla tipo cola de caballo, se observa un sílice hidrotermal botoidal más pequeño, su ocurrencia es diferente a la del sílice de desvitrificación y está emplazada en forma semicircular entre el domo riolítico y la falla Juachín, pareciera tener la apariencia de cuarzo *vuggy* y en las cercanías de este emplazamiento.

En los costados del talud de la carretera se observa esporádicamente venas y vetillas cloritizadas propias de la alteración propilítica, por lo cual se tiene la hipótesis por lo observado en campo que este tercer evento hidrotermal la fuente es más profundo y de otro evento ígneo que no se observa en la superficie y pudo aportar más argilización en la zona y fracturamiento que el ya mencionado por el emplazamiento de la ignimbrita panalillo.

2.4 Caracterización de los factores fundamentales.

Los factores que están involucrados son diversos por lo que generan un talud de comportamiento complejo, ya que involucran a más de un solo factor para detonar un deslizamiento, los factores en específico que tiene este talud son:

1. Factores hidrogeológicos. Este factor involucra las precipitaciones anuales, mensuales y diarias de lluvia que se han tenido registradas en la zona, siendo la más reciente en el verano del 2024. En un solo día se registró una precipitación de hasta los 7 mm de agua, (CONAGUA, 2024), el promedio medio anual de las lluvias es de 380 mm a 540 mm, pero en los últimos 5 años se han generado lluvias extraordinarias modificando el máximo de esta tasa hasta de 750 mm en el verano, (mayo a septiembre).

Este es uno de los factores más importantes, ya que el agua juega un papel determinante en los taludes con la mezcla de otro factor como es el estructural. Pueden detonar un flujo de deslizamiento

de roca que puede tener un mayor alcance, pudiendo afectar a la cortina de la presa y a la tubería que conduce el agua de la presa hacia la ciudad.

2. Factores antrópicos. El talud cuenta con el continuo disturbio por las obras antiguas de construcción de la cortina de la presa El Peaje y por el corte que se le realizó casi en el pie del talud para que pasara la carretera federal número 80.

Estas obras desestabilizaron el equilibrio del talud; las obras se realizaron sin un estudio geotécnico adecuado. Además, existe en la zona tráfico constante de vehículos y transporte de carga pesado que se infiere que puede influir de forma negativa en el talud por el simple paso de los vehículos y la cercanía del talud a la carretera se pueden estar produciendo vibraciones que estén desencadenando un futuro deslizamiento y/o aumentar la tasa de caídos en el talud.

3. Factor sísmico, el área donde está el talud a estudiar es una zona sísmica de baja magnitud, el Sistema Sismológico Nacional (SSN, 2024), tiene registrado en su catálogo que en el estado de San Luis Potosí han ocurrido 247 epicentros sísmicos desde 1976 al 2024, entre las zonas media, centro y antiplano del estado, siendo el de mayor magnitud el sismo de 2023 que fue de 5.2 grados Richter en el municipio de Matehuala.

Analizando los datos del Sismológico Nacional, en la región tenemos un promedio de 3.5 grados Richter con el antecedente mas cercano de un sismo de esa misma intensidad en la localidad de Bledos a 50 km de distancia en línea recta.

4. Factor litológico, este factor toma en cuenta las características litológicas de la zona y la alteración por efecto hidrotermal o intemperismo existentes, lo que nos genera una roca menos competente con mayor porosidad y más arcillosa, para nuestra zona de estudio la litología que rodea al talud es riolita San Miguelito que está constituida de varios derrames episódicos, con características mineralógicas que varían de un 15 a 20% de fenocristales de cuarzo, sanidina y biotita.

El tamaño de los fenocristales de las muestras de los derrames más antiguos es entre 3-4 mm, y en las más recientes el tamaño tiende a ser < 3 mm. El primer episodio se generó de los 32.7 a los 30.4 Ma; y posteriormente se encuentran eventos del vulcanismo riolítico entre el Oligoceno tardío y Mioceno a los 27.4 Ma; y 21.1 Ma; (Tristán-Gonzales *et al.*, 2009).

La riolita San Miguelito está localizada en las partes bajas de la zona a estudiar, en la base de la cortina de la Presa El Peaje en ambos lados se encuentra el miembro superior de la riolita Panalillo que está constituida de pómez y ceniza totalmente soldada; contiene de 5 a 10 % de fenocristales; la fase mineral es cuarzo > sanidina > plagioclasa (oligoclasa), con una edad isotópica de 28.9 Ma; (Tristán-Gonzales *et al.*, 2009).

5. Factor geológico estructural, está relacionado mayormente a nivel de fracturamiento que tienen los alrededores del talud y el mismo talud, junto con las zonas de fallamiento en la cercanía del talud. El sistema de fallas involucrado en esta porción es el San Luis–Tepehuanes, estas fallas se crearon por dos eventos principales de deformación en el Paleogeno.

El primero dio fallas normales con rumbo preferente WNW, y el segundo evento creó fallas normales de rumbo NNE, subsecuentemente hubo más eventos de deformación que fueron las reactivaciones de las fallas anteriormente mencionadas (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), el fracturamiento y estos sistemas de fallas son un factor de peligro para la estabilidad del talud, es evidente a simple vista que el fracturamiento que tiene actualmente el talud está generando caídos de grandes dimensiones hacia la carretera.

6. El factor de la vegetación en la zona se cuenta con una mínima densidad de vegetación dejando expuesta la roca a erosión por el agua y el viento, el talud es más susceptible a rodamientos y caídos de roca, este factor se considera para efectos de esta tesis como una condición secundaria superficial.

2.5 Secciones geológico-estructural-geotécnico.

En el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos fueron programadas 8 secciones las cuales fueron interpretadas geológicamente, estructuralmente y geotécnicamente para el estudio global del talud, se programaron mediante las reglas de perfiles y secciones con enfoque geotécnico.

Los perfiles y secciones deben ser programados de lo más bajo topográficamente a lo más alto en línea recta y con mayor escarpe geomorfológico para tomar en cuenta ese factor dentro del análisis de peligrosidad con los ángulos y alturas de las pendientes que se tienen en el talud y su cercanía a las obras de infraestructura crítica de la zona.

Por esa razón las secciones no están sistematizadas a una misma dirección y longitud, las 8 secciones aquí presentadas varían en dirección y longitud y fueron nombradas de la A-A' hasta la H-H', (Figura 25).

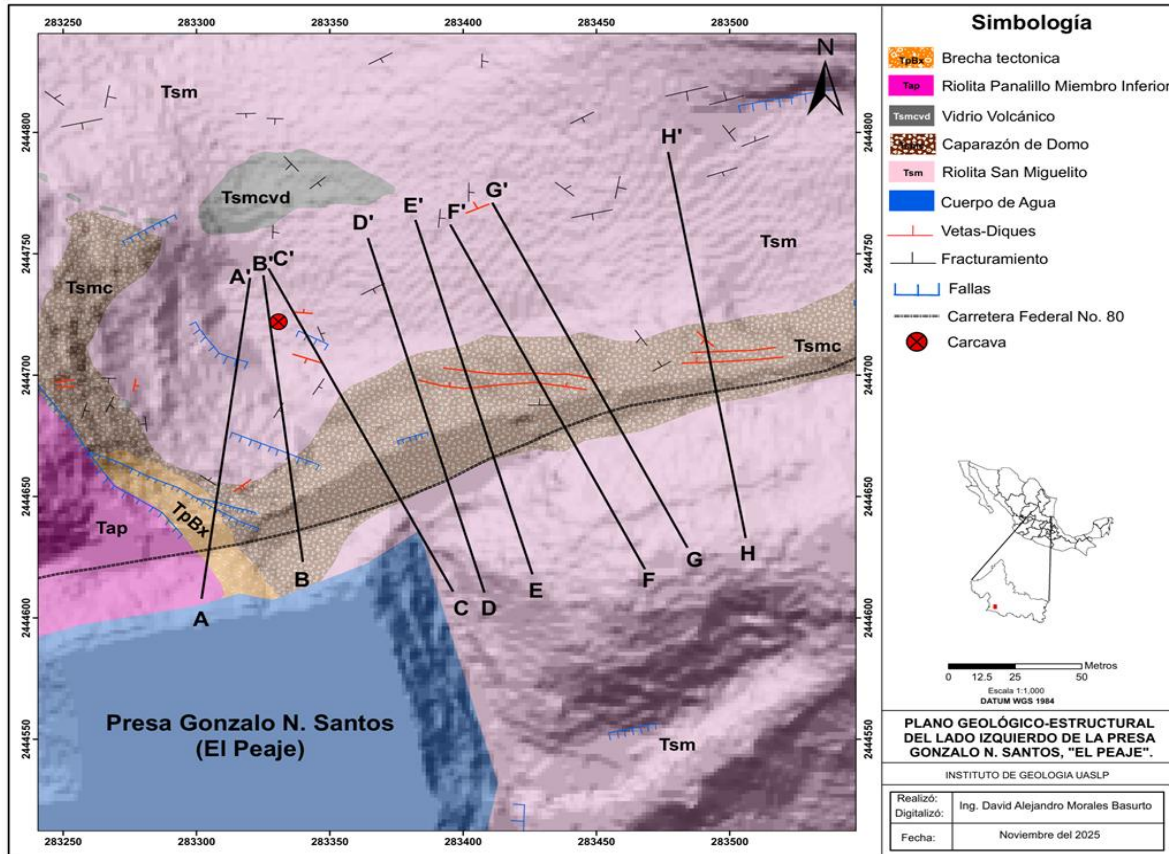


Figura 25. Plano geológico-estructural-geotécnico con las 8 secciones trazadas desarrolladas en el trabajo para analizar las zonas afectadas del talud y posibles nuevas zonas de peligro a considerar.

La sección geológica-estructural A-A', con coordenadas en el punto A de X= 283325, Y= 2444741 y en el punto A' X= 283302, Y= 2444608 con dirección S08°W-N08°E con vista al NW, esta sección cuenta con 3 unidades litológicas de sur a norte está la ignimbrita Panalillo junto a la brecha tectónica y la Falla principal Juachín cortando la carretera federal No. 80.

La riolita San Miguelito es la unidad dominante de la sección con alta presencia de fallas normales secundarias al fallamiento principal normal con componente derecho (fallamiento tipo cola de caballo), además de presentar un moderado fracturamiento relleno de Sílice amorfo, brotoidal y coloidal, (Figura 26).

La sección geológica-estructural B-B', con coordenadas en el punto B de X= 283326, Y= 2444740 y en el punto B' X= 283340, Y= 2444623 con dirección S83°E-N83°W con vista al SW, la unidad que predomina en la totalidad de la sección es la riolita San Miguelito pero presenta los 3 fases eruptivas con características geomecánicas diferentes por el tipo de material que está presente en las fases, aun se puede observar la influencia moderada a pervasiva del fallamiento tipo cola de caballo por la falla regional Juachín, (Figura 26).

La sección geológica-estructural C-C', con coordenadas en el punto C de X= 283327, Y= 2444744 y en el punto C' X= 283396, Y= 2444611 con dirección S27°E-N27°W con vista al SW, la sección está ubicada en la zona con mayor peligro de deslizamientos y caídos (ya existentes) por la geomorfología que presenta el talud ya que presenta en una porción del talud una saliente de roca con la base erosionada y una pared de casi 90° de inclinación aunado a esto, la zona aún tiene la influencia pervasiva a moderada de la zona de falla normales provocado por la falla regional Juachín.

El estilo de fallamiento tipo cola de caballo para la estabilidad de taludes es peligroso su presencia, provocando la presencia de fallas en menor distancia aumentado el fracturamiento y facilitando la permeabilidad de las aguas de lluvia promoviendo peso adicional al talud y una presión hidrostática adicional sobre las fallas y fracturamiento existentes, (Figura 26).

La sección geológica-estructural D-D', con coordenadas en el punto D de X= 283408, Y= 2444611 y en el punto D' X= 283364, Y= 2444756 con dirección S17°E-N17°W con vista al SW, la sección exhibe además de la unidad riolita Sa Miguelito, está el dique de vidrio volcánico producto de gases y fluidos residuales de la actividad volcánica del domo riolítico, se encuentra cortando la riolita San Miguelito además de estar con una argilización moderada.

La influencia de la zona de fallas es moderada en esta porción del talud, por la presencia del vidrio volcánico aumenta las fracturas rellenas de sílice amorfo y de litofísis por la desvitrificación, (Figura 26).

La sección geológica-estructural E-E', con coordenadas en el punto E de X= 283382, Y= 2444764 y en el punto E' X= 283426, Y= 2444618 con dirección S17°E-N17°W con vista al SW, en esta porción del talud en la sección se representa menor influencia de la falla principal Huachín y la zona de fallamiento, e incrementa el fracturamiento y las fracturas rellenas de sílice producto de las desvitrificación del vidrio volcánico, esta sección está ubicado en la parte central del primer derrumbe mayor que fue en el 2011. En campo se observa aun caída de pequeños fragmentos de roca y la disgregación del caparazón del domo por descompresión en arenas de color beige y ligeros tonos verdaseos, (Figura 26).

La sección geológica-estructural F-F', con coordenadas en el punto F de X= 283468, Y= 2444620 y en el punto F' X= 283395, Y= 2444762 con dirección S27°E-N27°W con vista al SW, en esta porción del talud la influencia de la zona de fallamiento es de moderado con fracturamiento asociados a los comportamientos de esfuerzos regionales.

La geomorfología del talud en esta porción indica un factor de peligrosidad ya que en la parte de pie a carretera el talud esta con una pendiente elevada mayor a 70° y con una altura aproximada de 20 metros, estas condiciones son factores importantes a considerar para el peligro potencial de la caída de bloques de pequeños a grandes bloques.

Considerando que el fracturamiento y la influencia del fallamiento es menor también en esta porción del talud el dique de vidrio volcánico está asociado con las litofías están acompañando al vidrio volcánico en aureola por la desvitrificación del mismo dique, (Figura 26).

La sección geológica-estructural G-G', con coordenadas en el punto G de X= 283484, Y= 2444629 y en el punto G' X= 283411, Y= 2444771 con dirección S27°E-N27°W con vista al SW, el talud presenta un mayor fracturamiento en la riolita San Miguelito y la presencia moderada de fallas normales que desplazan localmente y en menor medida las facies eruptivas de la unidad riolita San

Miguelito, siendo la más afectada el caparazón del domo y disminuye en esta porción considerablemente la desvitrificación, (Figura 26).

La sección geológica-estructural H-H', con coordenadas en el punto H de X= 283506, Y= 2444633 y en el punto H' X= 283477, Y= 2444792 con dirección S11°E-N11°W con vista al SW, en esta sección del talud disminuye la influencia aún más de la zona de fallamiento, también es esporádica la presencia de fracturamiento relleno de sílice y aumenta la presencia del fracturamiento afectando al flujo superior de la riolita San Miguelito, (Figura 26).

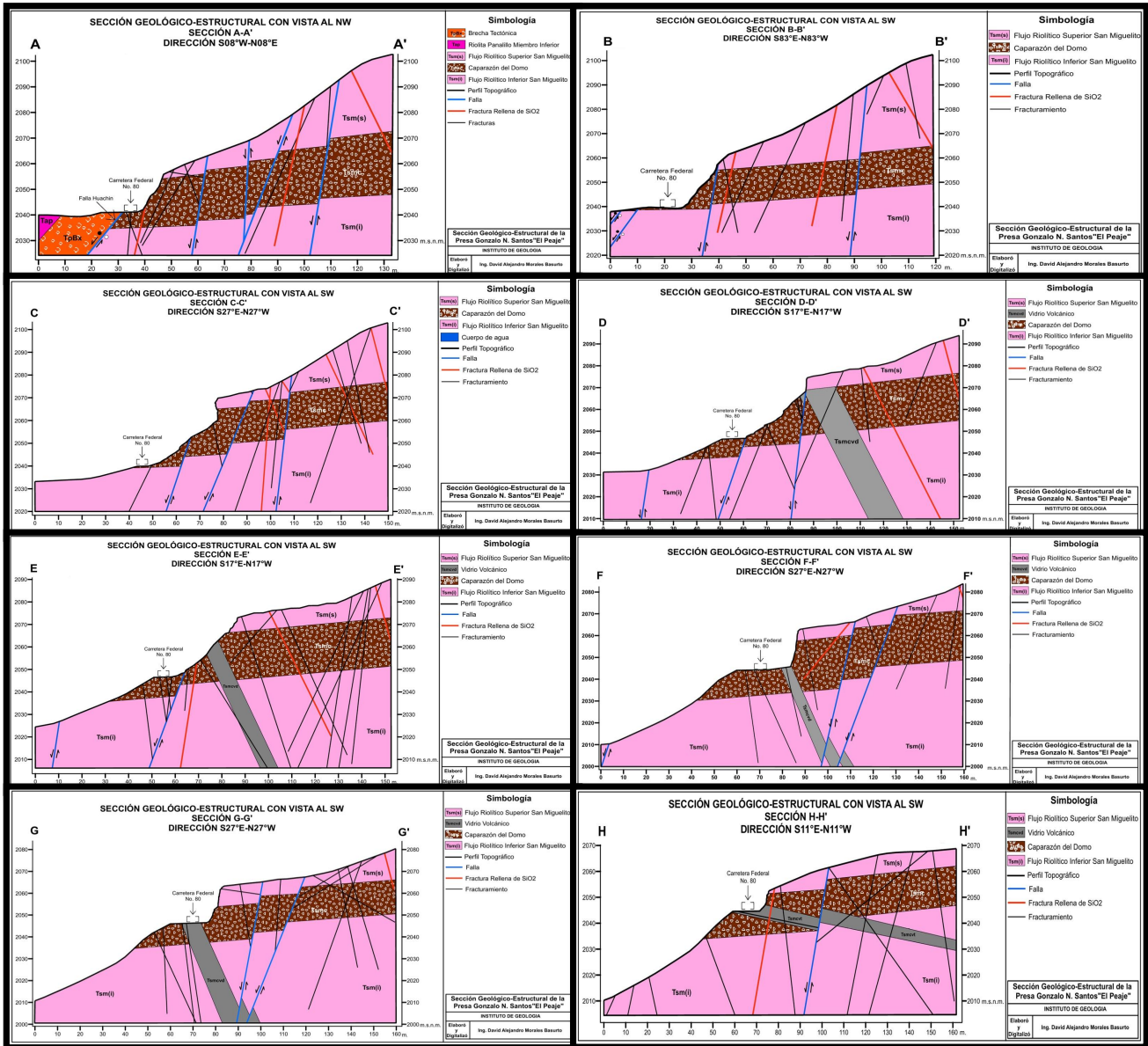


Figura 26. Secciones geológicas-estructurales-geotécnicas del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, imagen con ilustración de cada una de las interpretaciones de cada sección geológica en escala 1:1,000; ver en anexos.

Capítulo 3. Parámetros geomecánicos de las unidades geotécnicas.

En el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, fueron tomados los datos geotécnicos en campo para obtener los parámetros geomecánicos de las unidades que tiene el talud para este proceso fue útil apoyarnos con los datos que se recolectaron durante la cartografía para tener identificados los límites de las unidades y de las discontinuidades, y con esto tener un mejor criterio de que unidades y zonas medir en el talud.

El proceso para obtener los datos paramétricos finales, fue identificar con el apoyo de la cartografía que unidades geológicas se tiene en el talud junto con sus diferentes fases eruptivas, como fue el caso primordialmente de la riolita San Miguelito teniendo en claro los límites de cada unidad geológica dentro del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, después se midió con el martillo de *Schmidt* las unidades geológicas cercano al lugar de las caídas de bloques y del deslizamiento principal que ocurrió en el 2011.

El martillo de *Schmidt* es una herramienta con la cual mide el número de rebotes directamente en la roca para mediante una correlación empírica, se estimó la resistencia a la compresión uniaxial que tiene el material mediante la formula de Broch y Franklin, (1972).

$$\text{Log}_{10}(\text{UCS}) = 0.00088 * \gamma * R + 1.01$$

El número de mediciones en cada unidad fue de 50 por cada unidad litológica del talud para tener una mayor certeza estadística en el resultado, en el caso de los flujos de la riolita San Miguelito se tomaron las mediciones por zonas por la gran extensión que tenía esta unidad dentro del talud y variedad en las condiciones de la roca por el fracturamiento y la exposición al intemperismo.

Los datos recolectados en campo se ordenaron en una base de datos en Excel, aplicándole la fórmula para convertir el número de rebotes en una estimación de la resistencia al corte de cada unidad en mega Pascales (MPa) y posteriormente poder utilizar las fórmulas de Borselli, (2021, Figura 27) para estimar la mediana y el quinto percentil, (Figura 28).

$$X_{k,\text{inf}} = X_m (1 - k_N \text{COV})$$

Quantile 0.05 e percentil 5%

$$k_N = 1.645 \sqrt{\frac{1}{N} + 1}$$

Figura 27. Fórmula para calcular el quinto percentil en la unidad de roca media y formula para determinar la mediana estadística mediante el método clásico.

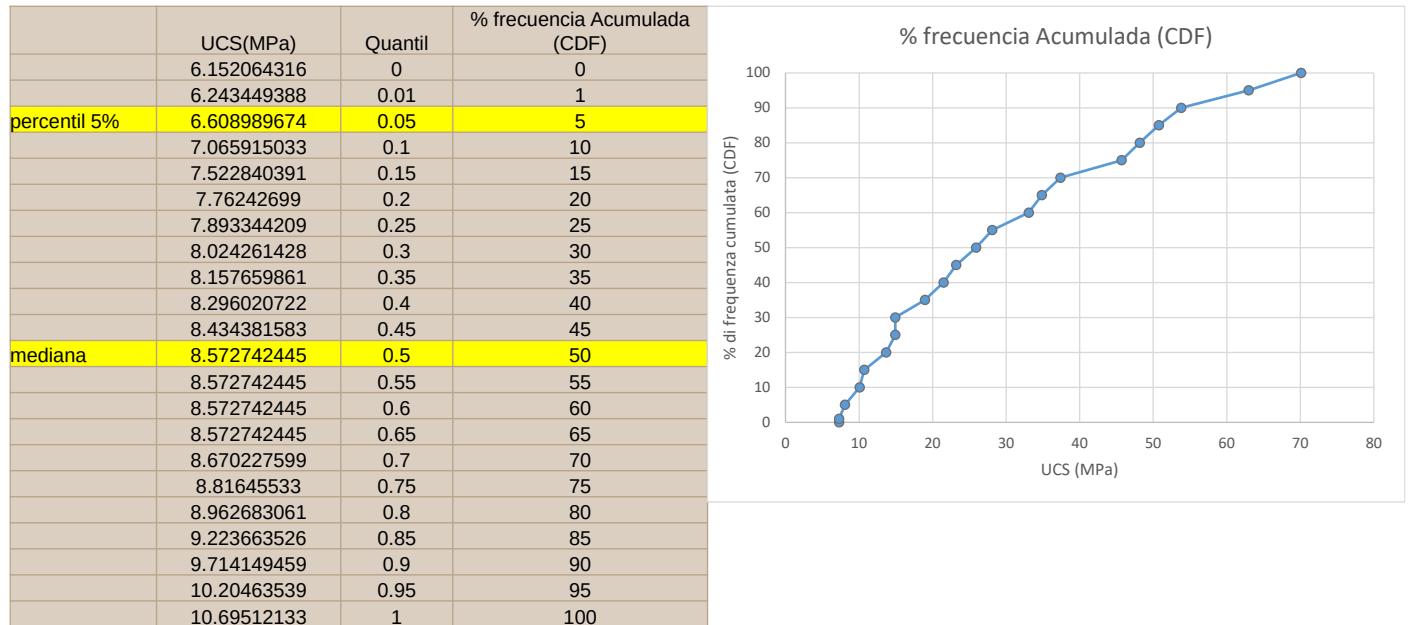


Figura 28. Análisis estadístico no paramétrico para determinar parámetros geomecánicos. La tabla corresponde a los datos del dique de vidrio volcánico y nos muestra la UCS en MPa de los datos tomados en campo y convertidos (Borselli, 2021) para determinar el quinto percentil y la mediana estadística con el método clásico, además de mostrar la gráfica de la frecuencia acumulada en porcentaje donde el punto que está en el 50% sería la mediana estadística de nuestros datos y el 5% representaría al quinto percentil.

Así obtener nuestros parámetros geomecánicos de resistencia al corte de cada una de las unidades litológicas que conforman el talud, (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de resistencia al corte (mediana) de las unidades volcánicas del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos y el quinto percentil que representa la parte superficial de la roca intemperizada y/o alterada.

Unidad	mediana	Percentil 5%
	MPa	MPa
Riolita Superior	17.17	5.22
Riolita Inferior	25.90	18.59
Dique Vidrio Talud	8.57	6.60
Brecha tectonica	13.34	9.47
Brecha Volcanica	10.69	6.15
Dique Vidrio derecho	33.33	4.30
Panalillo Inferior	46.32	23.39
Riolita Superior Derecha	72.09	32.33

Otros datos que también se pudieron obtener directamente en campo fue el nivel de disturbio que presenta el talud en los diferentes puntos de donde fueron programadas los perfiles, el nivel de disturbio es lo que nos indica alguna perturbación antrópica que hay del talud lo que puede ser un corte al talud, intervención de remediación, obras civiles directos en el talud o cercano y voladuras (explosiones) de porciones del talud que genera una serie de fracturamiento mecánico adicional a los preexistentes.

Los niveles de disturbio van de 0.00 que es sin disturbios hasta el 1.00 que es con mucha influencia antrópica continua en el talud, este dato es requerido por el software SSAP 2010 v. 6.1 (Borselli, 2026), e iniciar los modelamientos para obtener los factores de seguridad de los distintos perfiles.

También se recolecta de campo el análisis para obtener el GSI (Geological Strength Index) mediante el nivel de fracturamiento que presenta el afloramiento en el tope del talud, en base al nivel de fracturamiento que se puede observar en las distintas porciones del talud y de las unidades volcánicas dándole un valor numérico al factor de condición de trabajo (Jc) con el índice de heterogeneidad de las masas de rocas, (Marinos, 2017, Figura 29).

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Figura 29. Esta versión de la tabulación fue revisada y añadiendo criterios adicionales por Marinos (2017), para la clasificación geotécnica GSI para macizos rocosos heterogéneos tectónicamente perturbados.

Además, con el apoyo de la cartografía, obtuvimos la estimación de la constante litológica de cada una de las unidades al identificar qué tipo de roca volcánica tenemos en el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, utilizando la resistencia a la tracción de la roca intacta, (Hoek y Brown, 1997; Cai, 2010; Davarpanahet *et. al.* 2022, Figura 30) en combinación con la prueba uniaxial de

resistencia al corte de la roca que obtuvimos con el martillo de Schmidt es una metodología certera para obtener buenos parámetros geomecánicos sin tener que realizar numerosas pruebas triaxiales.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerate ^a (22 ± 3)	Sandstone (17 ± 4)	Siltstone (7 ± 2)	Claystone (4 ± 2)
			Breccias (19 ± 5)		Greywacke (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
						Marls (7 ± 2)
	Non-clastic	Organic	Chalks (7 ± 2)			
		Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestone (10 ± 2)	Micritic Limestone (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
Metamorphic		Evaporites		Gypsum (8 ± 2)	Anhydrite (12 ± 2)	
	Non-foliated		Marble (9 ± 3)	Homfels (19 ± 4)	Quartzites (20 ± 3)	
				Metasandstone (26 ± 6)		
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)		
	Foliated ^b		Gneiss (28 ± 5)	Schists (12 ± 3)	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)
Igneous	Plutonic	Light	Granite (32 ± 2)	Diorite (25 ± 5)		
			Granodiorite (29 ± 3)			
		Dark	Gabbro (27 ± 3)	Dolerite (16 ± 5)		
			Norite (20 ± 5)			
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Obsidian (19 ± 3)
				Andesite (25 ± 5)	Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Figura 30. Estimación de las constantes litológicas de las rocas, (Cai, 2010). Donde el +2 representa la cristalinidad de la roca, mientras más cristalina la roca se le puede otorgar el valor de +2 o mientras más alterada o arcillosa se le puede dar el valor inferior a -2, depende del estado de la roca en campo, estas medidas corresponden al apartado mi de los parámetros geomecánicos por su grado de cristalinidad.

Otros datos relevantes sobre cada unidad volcánica que está en el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos es el peso volumétrico, (kN/m³) de las rocas que componen el talud y corresponde al peso volumétrico en condiciones normales o secas, (Gamma) y condiciones de saturación de la roca, (GammaSat).

El peso volumétrico de las unidades volcánicas existentes en el talud más la resistencia al corte uniaxial, la resistencia a la tracción de roca intacta, la clasificación geotécnica GSI para macizos rocosos heterogéneos y nivel de disturbio del talud en conjunto nos da una tabla de parámetros geomecánicos (Tabla 2 al 9), .que usamos para obtener los factores de seguridad, (Fs) de forma

individual, (cada sección) y global generando un mapa de factor de seguridad para el talud a estudiar y determinar las zonas de peligro que deben tener intervención para estabilizarlo.

El orden de los datos en las tablas (Tabla 2 al 9), van en paralelo a como lo requiere el programa SSAP 2010 v. 6.1 (Borselli, 2026), con este software vamos a analizar nuestros factores de seguridad (Fs) y analizar las zonas de peligro en el talud.

Se ordeno la tabla en función al número de capaz o estratos que se tenía en la sección y si había un corte en los estratos por el dique de vidrio volcánico se dividía el estrato en porciones más pequeñas para que el análisis fuese más específico en cada porción, (Figura 31).

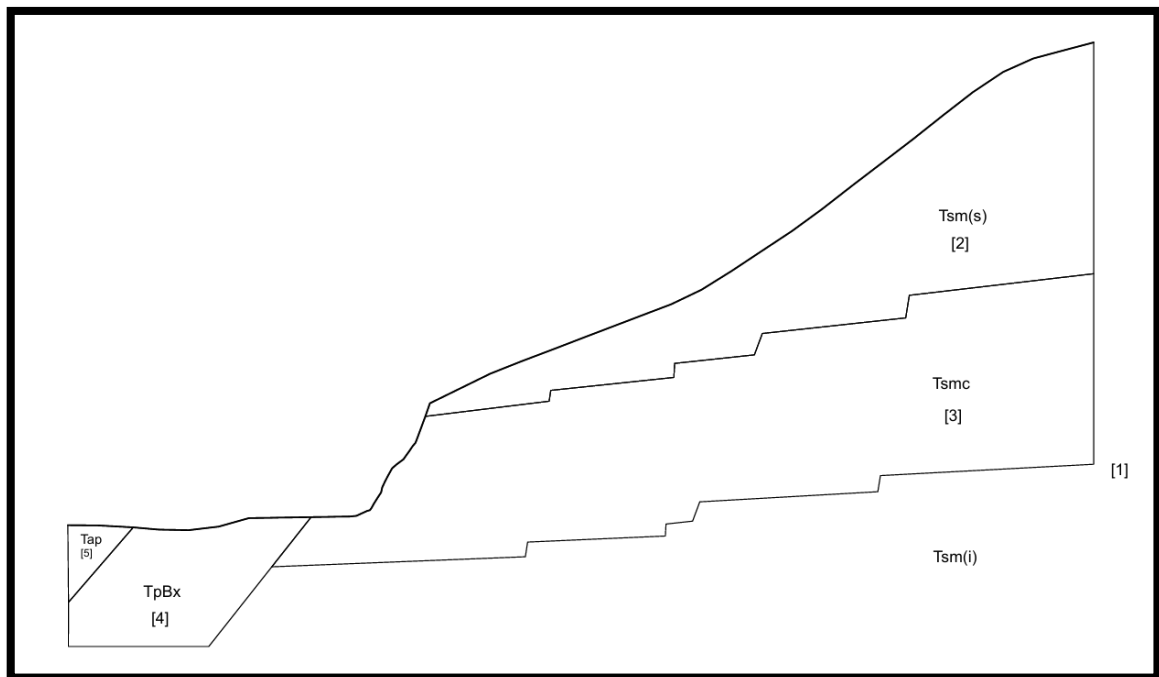


Figura 31. Sección geológica A-A' en formato CAD (Software QCAD), donde se muestra la numeración el ejemplo de la numeración los criterios de numeración para introducir los datos a SSAP 2010 v. 6.1; (Borselli, 2025).

El punto de partida en particular para este trabajo fue que el primer estrato fuese la superficie o el relieve topográfico de la sección y dejándolo abierto para tratar el resto de los estratos como grandes

lentes dentro de un estrato único sin afectar el resultado final porque cada porción de división en el estrato tiene sus propios valores permitiéndolo analizar al *software* de una manera óptima.

La sección A-A' (Tabla 2), está representada para su análisis en el SSAP 2010 v. 6.1. (Borselli, 2026), el estrato uno sería al flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(i)), con los parámetros en condiciones secas de 21 kN/m³ y saturado en 23 Kn/m³, el UCS de 25.90 MPa, GSI de 60, constante litológico de 25 y nivel de disturbio 0; el estrato dos corresponde al flujo superior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), el estrato tres es del caparazón del domo que es una brecha volcánica o brecha de desintegración (Tsmc), donde el UCS disminuye considerablemente por sus características litológicas.

El estrato cuatro es la brecha tectónica (TpBx), por donde pasa la falla Juachín y el estrato cinco es la ignimbrita Panalillo miembro inferior (Tap), que ocupa una pequeña porción en la sección del talud teniendo el UCS más elevado de las unidades volcánicas que aparecen en esta sección.

Tabla 2. Parametros geomecanicas completos de la sección A-A' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), brecha tectonica, (TpBx), ignimbrita Panalillo miembro inferior, (Tap).

SECCIÓN A-A'										
N	Litología	phi`	C`	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	17.17	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	18.00	20.00	10.69	40.00	19.00	0.50
4	TpBx	0.00	0.00	0.00	18.00	20.00	13.34	40.00	19.00	0.75
5	Tap	0.00	0.00	0.00	23.00	25.00	46.32	60.00	25.00	0.25

La sección B-B' (Tabla 3), que está representada para su análisis en el SSAP 2010 v. 6.1. (Borselli, 2026), el estrato uno sería al flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(i)), con los parámetros en condiciones iguales que en la sección anterior, el estrato dos corresponde al flujo superior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), el estrato tres es la brecha de desintegración (Tsmc), considerando los valores geomecánicos igual a la sección pasada lo que cambia considerablemente en este perfil y para su

análisis de peligrosidad para los deslizamientos y bloques caídos es la configuración de su topografía o el relieve del talud en esta porción que no se deben pasar de alto la geomorfología de los taludes.

Tabla 3. Parametros geomecanicas completos de la sección B-B' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc).

SECCIÓN B-B'										
N	Litología	ϕ°	C°	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	17.17	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	18.00	20.00	10.69	40.00	19.00	0.75

La sección C-C' (Tabla 4), el estrato uno es el flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(i)), el estrato dos es el flujo superior de la riolita San Miguelito, (Tsm(s)), el estrato tres es el caparazón del domo, (Tsmc) y el estrato cuatro es un bloque de aire ya que en esta sección en la parte central hay una saliente de roca que supera la pendiente de 90° y dejando la base socavada.

Fue necesario aplicarle el lente de aire en esta porción, ya que esta geomorfología del talud si tiene acción el aire y la gravedad que se ejerce en el cuerpo rocoso saliente del talud y es necesario considerar ese factor para que los datos arrojados por el *software* sean reales y aplicables en el talud, los parámetros geomecánicos del aire se dejan en un peso mínimo constante y que es 0.01, para utilizar estos datos en el software SSAP 2010 v. 6.1. del aire aún se tiene que aplicar en el peso seco y saturado tomando como referencia la constante de gravedad de 9.8 m/s² en valor correspondiente seria 9.81 kN/m³.

Tabla 4. Parametros geomecanicas completos de la sección C-C' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc).

SECCIÓN C-C'										
N	Litología	ϕ°	C°	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	17.17	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Aire	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

La sección D-D' (Tabla 5), esta porción es más compleja, cuenta con varios estratos, además de una estructura cortante que es el dique de vidrio volcánico, en el estrato uno es representado por el flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(i)); el estrato dos de igual manera corresponde al flujo superior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), el estrato tres es el caparazón del domo (Tsmc) que es la parte central de la riolita San Miguelito.

El estrato cuatro es la segunda mitad del caparazón del domo (Tsmc), este estrato está dividido por el dique de vidrio volcánico y se manejó como la continuación del estrato tres y tiene los mismos valores geomecánicos, el estrato cinco es también la segunda mitad del flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), igualmente siendo interrumpida por el dique, el estrato seis está representando al dique de vidrio volcánico (Tsmvd), cortando la secuencias de fases eruptivas de la riolita San Miguelito.

Tabla 5. Parametros geomecanicas completos de la sección D-D' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), dique de vidrio volcanico, (Tsmc vd).

SECCIÓN D-D'										
N	Litología	ϕ	C	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	17.17	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
5	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
6	Tsmc vd	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	8.57	50.00	19.00	0.25

La sección E-E' (Tabla 6), el estrato uno es el flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(i)); el estrato dos corresponde al flujo superior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)) en esta porción del talud cambia el parámetro de la resistencia al corte uniaxial o UCS, aumenta considerablemente que en el sector Oeste del talud haciendo la roca más competente al corte, el estrato tres es el caparazón del domo (Tsmc) que es la parte central de la riolita San Miguelito, el estrato cuatro es la segunda parte de Tsmc, el estrato cinco es la continuación del flujo inferior de la riolita San Miguelito (Tsm(s)), siendo interrumpida por el dique de vidrio volcánico.

El estrato 6 está representando al dique de vidrio volcánico (Tsmvd), cortando la secuencia de la riolita San Miguelito. Las condiciones del número de estratos son iguales a la sección anterior lo que cambia es la configuración del perfil topográfico y es donde varía los resultados entre secciones.

Tabla 6. Parametros geomecanicas completos de la sección E-E' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), dique de vidrio volcanico, (Tsmcvd).

SECCIÓN E-E'										
N	Litología	ϕ°	C°	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	PP	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	32.33	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
5	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
6	Tsmcvd	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	8.57	50.00	19.00	0.50

La sección F-F' (Tabla 7), del estrato uno al cinco tiene la misma representación que las dos secciones anterior dentro de la tabla el estrato seis es un pequeño fragmento del estrato uno y cinco que quedo aislado por el corte del dique y la deformación de las fallas normales que están presentes, quedo este fragmento a la base de la sección y el estrato siete es el dique de vidrio volcánico cortando la secuencia volcánica, también la morfología de la superficie topográfica cambia significativamente de las otras dos, siendo este el factor importante a analizar y condición cambiante y la mayor resistencia del flujo superior de la riolita San Miguelito.

Tabla 7. Parametros geomecanicas completos de la sección F-F' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), dique de vidrio volcanico, (Tsmcvd).

SECCIÓN F-F'										
N	Litología	ϕ°	C°	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	32.33	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	18.00	20.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Tsmc	0.00	0.00	0.00	18.00	20.00	10.69	50.00	19.00	0.75
5	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	23.00	25.00	25.90	60.00	25.00	0.00
6	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	23.00	25.00	25.90	60.00	25.00	0.00
7	Tsmcvd	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	8.57	50.00	19.00	0.50

La sección G-G' (Tabla 8), en esta porción en cuanto al orden de los estratos es igual a la sección E y datos paramétricos geotécnicos la variante seria la geomorfología del perfil y añadiendo también el nivel de fracturamiento y familias de fracturas coexistiendo en ambas porciones del talud por lo cual cambiaria el resultado del análisis de las zonas de peligro.

Tabla 8. Parametros geomecanicas completos de la sección G-G' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), dique de vidrio volcanico, (Tsmcvd).

SECCIÓN G-G'										
N	Litología	ϕ	C	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	32.33	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
5	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
6	Tsmcvd	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	33.33	50.00	19.00	0.75
7	Aire	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

La sección H-H' (Tabla 9), estos parámetros geotécnicos y el orden de los estratos sigue siendo los mismos ya que están muy cercanos entre sí, sin embargo, este perfil está en la parte del talud del Este que no a tenido aun deslizamientos ni caídas de rocas significativos pero las condiciones detonantes para que inicien los bloques caidos y deslizamientos y la zona de mayor afectación esta justo alado.

Tomando en cuenta que en años recientes en el talud la magnitud de la zona afectada por caidos de bloques a crecido poniendo este sector en el foco de atención ya que pueden ser la continuación de nuevos bloques caidos y deslizamientos justo a un metro al costado de la carretera federal No. 80, por lo que su análisis de peligro fue fundamental para los alcances de este trabajo.

Tabla 9. Parametros geomecanicas completos de la sección G-G' para graficar en el SSAP 2010 v. 6.1, (Borselli, 2025), flujo riolitico inferior, (Tsm(i)), flujo riolitico superior (Tsm(s)), caparazón del domo, (Tsmc), dique de vidrio volcanico, (Tsmcvd).

SECCIÓN H-H'										
N	Litología	phi`	C`	Cu	Gamma	GammaSat	sgci	GSI	mi	D
..	..	deg	KPa	KPa	kN/m3	kN/m3	MPa	..	..	..
1	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
2	Tsm(s)	0.00	0.00	0.00	19.00	21.00	32.33	40.00	25.00	0.50
3	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
4	Tsmc	0.00	0.00	0.00	17.00	19.00	10.69	50.00	19.00	0.75
5	Tsm(i)	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	25.90	60.00	25.00	0.00
6	Tsmcvd	0.00	0.00	0.00	21.00	23.00	33.33	50.00	19.00	0.75

Capítulo 4. Análisis de estabilidad de taludes.

El talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, fue analizado con el *software* libre SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), para crear secciones de factor de seguridad del talud (Fs) en el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos y se complementó con el *software* CSSAP (Borselli, 2026), que utilizó el resultado de las secciones creadas con SSAP para configurar un mapa Fs (Factor de Seguridad) global del talud izquierdo de la presa.

Para realizar este análisis se siguió una metodología para crear con éxito las secciones y mapas de Fs los pasos a seguir fueron:

En la página oficial de INEGI se investigó el nombre de la carta topográfica del lugar escala 1:50,000 que es F14 A83 de nombre Tepetate con esto adicionalmente se investigó la existencia de imágenes de alta resolución 1.5 metros en INEGI, las imágenes de alta resolución que se descargaron fueron F14 A83 b1, F14 A83 b2, F14 A83 b3, F14 A83 b4, F14 A83 c1, F14 A83 c2, F14 A83 c3, F14 A83 c4, F14 A83 e1, F14 A83 e2, F14 A83 e3, F14 A83 e4, F14 A83 f1, F14 A83 f2, F14 A83 f3 y F14 A83 f4.

Estas imágenes de alta resolución son fragmentos en mosaicos de la misma extensión que la carta topográfica Tepetate, por lo que se procedió a reproyectar las coordenadas a *UTM WGS 84* para que coincidiera con los archivos del proyecto en *ArcMap 10.8.1* para finalmente unir todas las imágenes de alta resolución satelital en uno solo.

Al finalizar la unión con esa imagen satelital de alta resolución unificada se creó un *Hillshade* (Figura 32), para crear una nube de puntos de las alturas de los pixeles del *Hillshade* y posterior de revisar que no tenga errores en la nube de puntos se creó el mapa topográfico propio para el área de estudio (Figura 33).

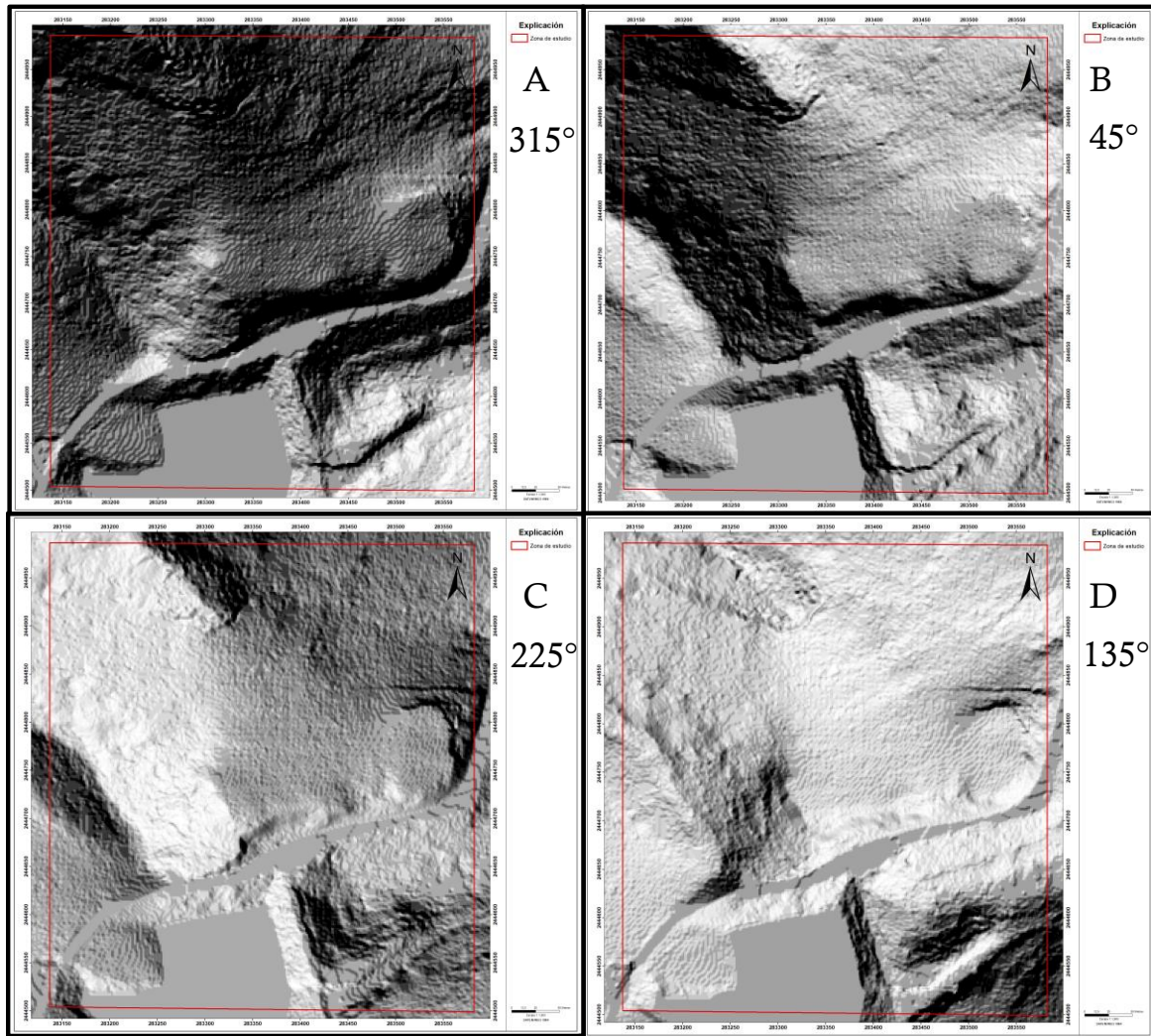


Figura 32. *Hillshade* del área de estudio con diferentes ángulos de incidencia del sol. A) *Hillshade* con ángulo de incidencia del sol a 315° azimutales, B) *Hillshade* con ángulo de incidencia del sol a 45° azimutales, C) *Hillshade* con incidencia del sol a 225° azimutales, D) *Hillshade* con incidencia del sol a 135° azimutales.

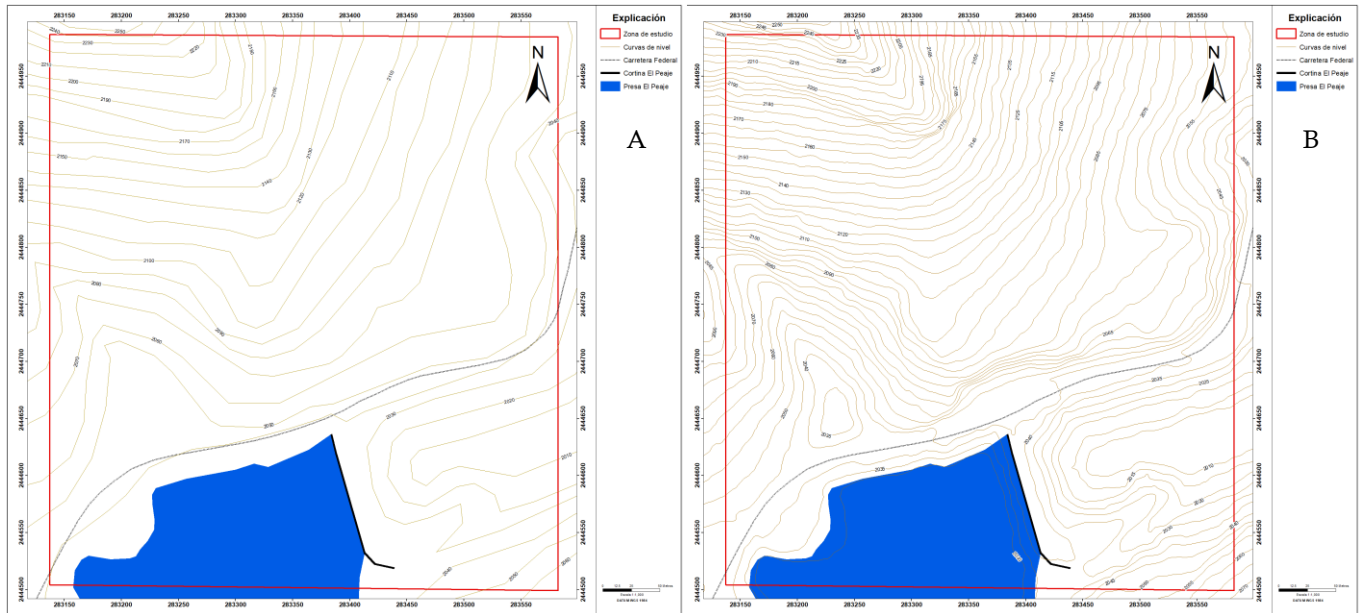


Figura 33. Contraste entre mapa topográfico realizado por INEGI vs mapa topográfico propio a partir de imágenes satelitales de terreno de alta resolución. A) mapa topográfico obtenido de INEGI del área de estudio, B) mapa topográfico obteniendo la base de imágenes satelitales con resolución a 1.5 metros y corregidos.

Posteriormente con el *Hillshade* sin errores se creó el mapa de conectividad hidrológica en el *software* ArcMap 10.8.1 (Figura 34), donde se analizó el comportamiento del escurrimiento del agua sobre y en el talud, los datos resultantes de la imagen son que en la parte central del talud a estudiar y al este del mismo hay mucha conectividad hidrológica ya que cuenta con poca infiltración del agua de lluvia y corre sobre la superficie del terreno del talud y en el extremo oeste del talud (parte izquierda), presenta poca conectividad hidrológica lo cual nos indica que hay infiltración del agua de lluvia en ese sector del talud.

Estos datos de conectividad hidrológica son de gran utilidad porque son indicadores de cuáles son los posibles detonantes de un futuro deslizamiento y nos ayudan a localizar zonas de mayor peligrosidad y actuar con anticipación antes de que ocurra alguna afectación para nuestro caso de estudio la zona coincide con los resultados del mapeo geológico-estructural en donde está la zona de fracturamiento relacionada a la falla regional Juachín, lo cual ya nos está determinando zonas de peligrosidad a poner atención para erradicar y evitar que se continúe deslizando la zona.

Después se procedió a recolectar información geológico-estructural previamente detallado en el presente trabajo y con la información geológico-estructural y la configuración topográfica se programaron secciones geotécnicas (Figura 25), una vez definido estas 8 secciones geotécnicas se procedió a crear los perfiles topográficos con los límites litológicos, (Figura 31) para generar las tablas de los parámetros estructurales de las 8 secciones con mediciones de campo, (Tablas 2-9), estos parámetros con el formato de las tablas previamente descritos en el capítulo 3 son los que insertaran en el software SSAP 6.1 (Borselli 2026).

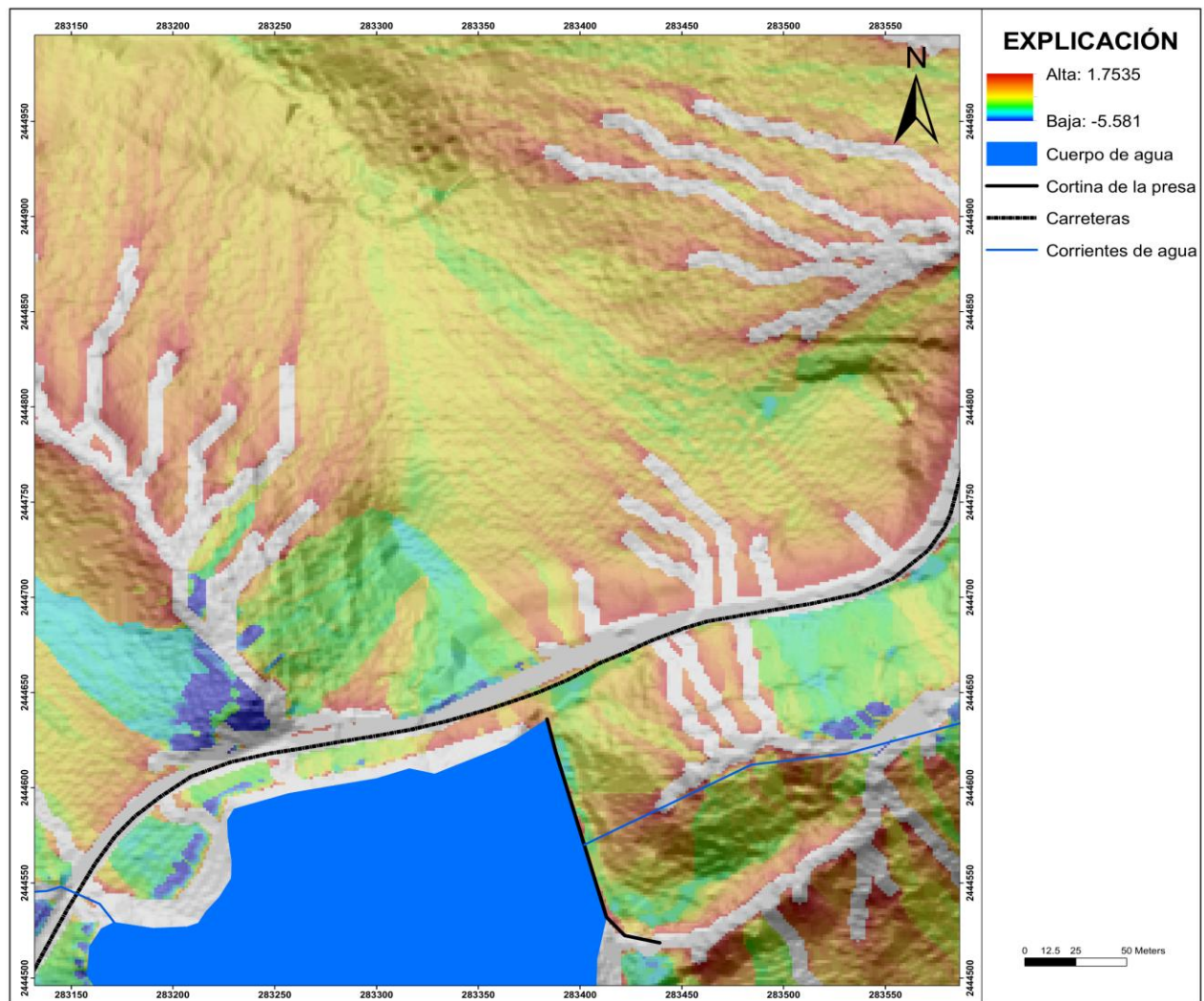


Figura 34. Mapa de conectividad hidrológica del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, donde el color rojo muestra alta conectividad en donde el agua de lluvia no se infiltra al subsuelo y corre superficialmente que es el 90% del talud de la presa, el color verde es media conectividad en esta área se satura de agua el subsuelo y empieza a correr superficialmente el agua y el color azul fuerte a azul turquesa son donde el agua de lluvia se infiltra en el subsuelo y se corta la conectividad superficial del agua.

Las tablas de parámetros geomecánicos son importantes ya que ahí se inserta todos los valores numéricos calculados y recolectados en campo de nuestro talud a estudiar y con ayuda del software libre SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), nos genera resultados gráficos de cada una de nuestras secciones proporcionándonos en coloración las zonas menores a 1.0 en factor de seguridad en tonos cálidos (gana de anaranjado a rojos y violación) que son las zonas de peligro propensa a un deslizamiento o caída de bloques.

Para obtener el número de discontinuidades que agregaremos en nuestras tablas de parámetros geomecánicos nos apoyamos de las secciones geológicas que se realizaron en campo para identificar las diferentes discontinuidades que aparece en las diferentes unidades volcánicas de nuestra zona de estudio.

En la tabla 10 tenemos 8 discontinuidades (fallas, fracturamiento, vetilleo y planos de pseudoestratificación) identificadas en la sección geológica contenidas en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)) y central (Tsmc; brecha volcánica de disgregación) y la brecha tectónica (TpBx), también tenemos que identificar cada discontinuidad y litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD para que el software vaya enlazando los datos espacialmente de una forma correcta sobre la sección.

También agregamos el coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), este dato también fue medido directamente y estandarizar la rugosidad de cada unidad para poderlo aplicar en esta tabla para la rugosidad de la brecha tectónica tenemos un JRC de 12, para la riolita San Miguelito central es una menor rugosidad de 6 y la rugosidad de la riolita San Miguelito superior es de 12 similar a la brecha tectónica.

Tabla 10. Datos de las discontinuidades de la sección A-A' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	SECCIÓN A-A'					
					phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	TpBx	4	12	9.47	30	0.3	2	25	10	25
2	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	8	5	20
3	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	83	10	20
4	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	84	10	20
5	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	77.5	10	20
6	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	65	10	20
7	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	52	5	20
8	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	29	5	20

Este resultado es obtenido mediante la medición del desnivel promedio que hay en los planos de las unidades volcánicas entre los picos más altos y más bajos, el resultado obtenido en milímetros se multiplica por 10 para obtener el coeficiente de rugosidad.

El JCS, son el resultado de nuestras mediciones con el martillo de Schmidt que es la resistencia al corte uniaxial que determinamos en campo en megapascuales explicado previamente con el resultado obtenido para cada unidad volcánica, PhiR son los grados del corte que se genera al superar la ruptura de cada unidad volcánica que para nuestra zona de estudio fue estandarizado en 30° para cada unidad geológica.

L0 es la distancia de la discontinuidad medida en campo en este caso y para todas las tablas se midió 30 cm de cada discontinuidad y L es el máximo mínimo que debe tener de continuidad la discontinuidad geológica para ser aplicada, los grados beta son la dirección de cada discontinuidad y el delta-beta es el ángulo de buzamiento que tiene cada discontinuidad medida en campo.

También se considera el porcentaje de puente de roca que existe en el macizo rocoso, este parámetro nos auxiliamos de manera visual y estadística por la constancia que nos aparecía una misma discontinuidad dentro de la misma unidad volcánica y se pondera un porcentaje para que se pueda considerar la roca intacta que existe entre discontinuidades de forma estandarizada para esta zona de estudio.

Tabla 11. Datos de las discontinuidades de la sección B-B' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN B-B'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	52	10	20
2	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	85	5	20
3	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	8	2	20
4	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	77.5	10	20
5	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	81.5	10	20
6	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	67.5	5	20
7	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	31	2	20
8	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	52	5	20

En la tabla 11 tenemos 8 discontinuidades identificadas en la sección geológica que están en 2 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)) y central (Tsmc), y la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla tenemos un JRC de 12 para la riolita San Miguelito superior y la riolita san miguelito central es una menor rugosidad de 6.

Tabla 12. Datos de las discontinuidades de la sección C-C' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN C-C'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsm(i)	1	12	18.59	30	0.3	2	83	10	25
2	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	75	10	15
3	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	67	10	20
4	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	77	10	20
5	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	85	10	20
6	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	52	5	20
7	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	31	3	20

En la tabla 12 tenemos 7 discontinuidades que están en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) e inferior (Tsm(i)), y la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla tenemos un JRC de 12 para la riolita San Miguelito superior, la riolita san miguelito central es una menor rugosidad de 6 y la riolita San Miguelito inferior es también de 12. La diferencia entre ambas litologías en los parámetros geomecánicos

es el porcentaje de puente de roca que existen, en la riolita San Miguelito inferior es de 25% y en la superior es de 20%, además que en la riolita San Miguelito central tiene un menor porcentaje de puente de roca que da 15%.

Tabla 13. Datos de las discontinuidades de la sección D-D' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN D-D'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsm(i)	5	12	18.59	30	0.3	2	77	10	25
2	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	83	10	20
3	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	14	2	20
4	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	75.5	10	20
5	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	65	5	20
6	Tsm(s)	2	6	5.22	30	0.3	2	83	10	20
7	Tsm(s)	2	6	5.22	30	0.3	2	66.5	5	20
8	Tsm(s)	2	6	5.22	30	0.3	2	71	10	20
9	Tsm(s)	2	6	5.22	30	0.3	2	48	5	20

En la tabla 13 tenemos 9 discontinuidades que están en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) e inferior (Tsm(i)), y la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla cambia el coeficiente de rugosidad para la riolita San Miguelito superior siendo de 6, la riolita San Miguelito central continua igual con 6 y la riolita San Miguelito inferior es de 12.

Tabla 14. Datos de las discontinuidades de la sección E-E' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN E-E'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsm(i)	5	12	18.59	30	0.3	2	25	10	25
2	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	79	10	20
3	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	69	5	20
4	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	29	2	20
5	Tsmc	3	6	6.15	30	0.3	2	86.5	10	20
6	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	12	2	20
7	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	70	10	20
8	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	50	5	20

En la tabla 14 tenemos 8 discontinuidades que están en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) e inferior (Tsm(i)), y la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla cambia nuevamente a los valores de las primeras secciones, el coeficiente de rugosidad para la riolita San Miguelito superior es de 12, la riolita San Miguelito central continua igual con 6 y la riolita San Miguelito inferior es de 12, lo que cambio en esta sección además de beta y delta-beta que son siempre variables en cada sección es el puente de roca en la riolita San Miguelito central que paso de tener 15% en las secciones anteriores a elevarse a 25%, este cambio es correspondiente a una mayor compactación litostática que tiene esa unidad y menor nivel de erosión y disgregación.

Tabla 15. Datos de las discontinuidades de la sección F-F' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN F-F'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsm(i)	5	12	18.59	30	0.3	2	84.5	10	25
2	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	82	10	20
3	Tsmcvd	7	6	6.6	30	0.3	2	66	5	20
4	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	79	10	20
5	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	10	2	20
8	Tsm(s)	2	12	5.22	30	0.3	2	66.5	5	20

En la tabla 15 tenemos 6 discontinuidades que están en 4 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) e inferior (Tsm(i)), además del vidrio volcánico (Tsmcvd) y la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla los valores del coeficiente de rugosidad para la riolita San Miguelito superior es de 12, la riolita San Miguelito central es de 6, la riolita San Miguelito inferior es de 12 y el vidrio volcánico es de 6.

Tabla 16. Datos de las discontinuidades de la sección G-G' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN G-G'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	87	10	20
2	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	66	5	20
3	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	14	2	20
4	Tsmcvd	6	6	4.31	30	0.3	2	53	5	15
5	Tsm(s)	2	12	32.33	30	0.3	2	74	10	25
6	Tsm(s)	2	12	32.33	30	0.3	2	55.5	5	25
7	Tsm(s)	2	12	32.33	30	0.3	2	39	4	25

En la tabla 16 tenemos 7 discontinuidades que están en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) y el vidrio volcánico (Tsmcvd), la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla los valores de las primeras secciones, el coeficiente de rugosidad para la riolita San Miguelito superior es de 12, la riolita San Miguelito central es de 6, la riolita San Miguelito inferior es de 12 y el vidrio volcánico es de 6. El puente de rocas en esta sección cambia considerablemente que en la sección anterior por sus características observadas en campo que tiene una mayor argilización en la sección anterior y conforme analizamos a la derecha del talud los diques de vidrio están más compactos y menos argilizados.

Tabla 17. Datos de las discontinuidades de la sección H-H' para el análisis de estabilidad de talud en SSAP. Con datos obtenidos de campo.

SECCIÓN H-H'										
No. Discontinuidades	Litología	No. Estrato	JRC	JCS (Mpa)	phiR (grados)	L0 (m)	L(m)	Beta (grados)	deltabeta (grados)	% Rock bridges
1	Tsm(i)	5	12	18.59	30	0.3	2	64.5	5	25
2	Tsm(i)	5	12	18.59	30	0.3	2	76	10	25
3	Tsmc	4	6	6.15	30	0.3	2	66	5	20
4	Tsm(s)	3	12	32.33	30	0.3	2	62	5	20
5	Tsm(s)	3	12	32.33	30	0.3	2	52	5	20
6	Tsm(s)	3	12	32.33	30	0.3	2	81.4	10	20
7	Tsm(s)	3	12	32.33	30	0.3	2	28	3	20

En la tabla 17 tenemos 7 discontinuidades que están en 3 unidades litológicas que son la riolita San Miguelito superior (Tsm(s)), central (Tsmc) e inferior (Tsm(i)), la litología esta con el número de estrato que se le asigno en la sección digitalizada en CAD.

El coeficiente de la rugosidad de cada discontinuidad (JRC), para esta tabla los valores de las primeras secciones, el coeficiente de rugosidad para la riolita San Miguelito superior es de 12, la riolita San Miguelito central es de 6, la riolita San Miguelito inferior es de 12.

En el software libre SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), para que finalmente sea creada las secciones de factor de seguridad es necesario integrar el modelo del talud (secciones) con las divisiones de los estratos correctamente generadas, las tablas de parámetros geomecánicos, las tablas de los datos de las discontinuidades, las coordenadas precisas del punto de inicio y fin de cada una de las secciones trabajadas.

Las coordenadas precisas de cada sección son para colocar en un lugar espacial real y se puedan referenciar con cualquier plano topográfico o imágenes de satélite de cualquier tipo y agregarle el nivel de agua (acuífero), para el caso de estudio de esta zona y del talud utilizamos el análisis de conectividad hidrológica para determinar la existencia de la escorrentía superficial y con esta información agregarlo a los requerimientos que necesita el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), para un análisis optimo del talud y poder tener variables de análisis.

Los colores naranja, rojo y violeta en las secciones y planos de factor de seguridad indican valores inferiores a 1 que se traduce en lugares de mayor peligrosidad ya que el valor 1 es el punto de equilibrio entre las fuerzas deslizando con las fuerzas de equilibrio, el cual representa un peligro elevado para los vehículos que transitan sobre la carretera a un costado del talud a estudiar.

El color amarillo son las zonas que están en el factor 1 y con potencial peligro para un deslizamiento ya que su condición está comprometida a que no haya cambios de ninguna naturaleza en el talud.

Los colores verdes y azules en las secciones y planos de factor de seguridad nos indican valores superiores al valor 1, lo cual nos indican zonas de buena estabilidad con las condiciones que actualmente existen en el talud.

El método utilizado en el SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), es el de Morgentern y Price, (1965); con este método se utilizó dos motores de análisis que fueron *sniff random search* y *mixed engines search* para contrastar los resultados, el primero calcula con las fórmulas convencionales, pero en el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), tiene mayor sensibilidad a los datos que otros softwares, lo que la vuelve más estricta en sus análisis de peligrosidad de los macizos rocosos.

El análisis de *mixed engines search* aparte de ser estricta como el primer análisis, se auxilia de geotécnicos para condiciones diferentes específicas haciéndola más flexible en los resultados y ajustando el resultado al tipo modelo geotécnico, ya que estos modelos son variables y no hay un estandar sobre un macizo roco natural, la vuelve una fuerte herramienta de análisis optimo en el cálculo de factores de seguridad.

Las condiciones usadas bajo la metodología y análisis descrito fueron las siguientes; condición estática, estática con *tension cracks*, saturada y sísmica (sismos de equivalencia regional de 3.5 grados *Richter*), esto se realizó para simular las condiciones críticas que desestabilizan a los macizos rocosos y que se pueden aplicar en el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos y tener resultados de las zonas críticas a estabilizar y dar herramientas para un futuro trabajo de estabilización del talud estudiado en este trabajo de tesis.

El análisis en *sniff random search* en condiciones estáticas (normales) el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, tiene una estabilidad global (Anexo 10–11) pero con movimientos de tracción internas local aun en esta condición (Figura 35), exceptuando en la parte central que aun en condiciones estáticas nos indica el cálculo de caída de rocas y deslizamientos a pequeña escala activa (Anexo 10–11).

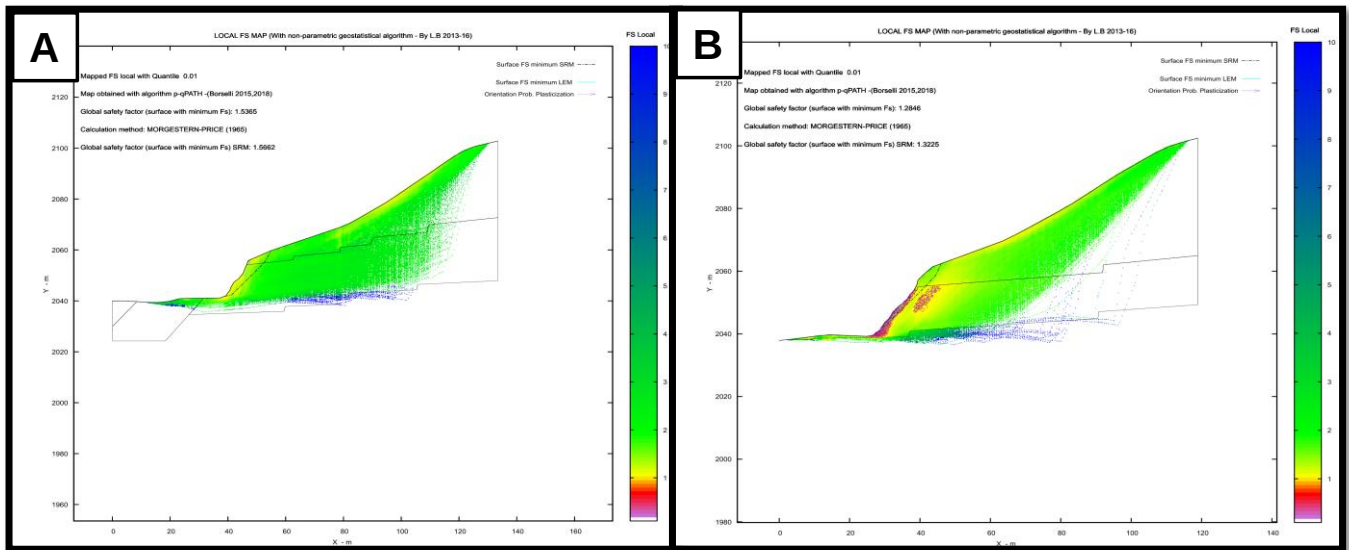


Figura 35. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *sniff random search* en condición estática A) Sección A-A' de factor de seguridad en condiciones estáticas donde el resultado en estas condiciones globales es buenas en la estabilización del talud aunque la caída de pequeños y medianos fragmentos en la parte frontal del talud; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas donde el resultado global indica una inestabilidad clara en la parte frontal del talud y tracción deslizante en la parte interna frontal del talud.

El análisis en *sniff random search* en condiciones estáticas con tension cracks (involucrando el efecto de las fracturas), se observa un resultado similar a la condición anterior con la variante de que hay mayor movimiento de tracción interna en el talud (Figura 36 y Anexos 12-13), que hay que considerar para deslizamientos y caída de bloques sin la necesidad de que ocurra un sismo u ocurra una gran lluvia en la localidad del talud y creando una zona de peligro constante, además de definir zonas de corte en la parte superior del talud que indican la caída de grandes bloques a la carretera federal No. 80 (Anexos 12-13).

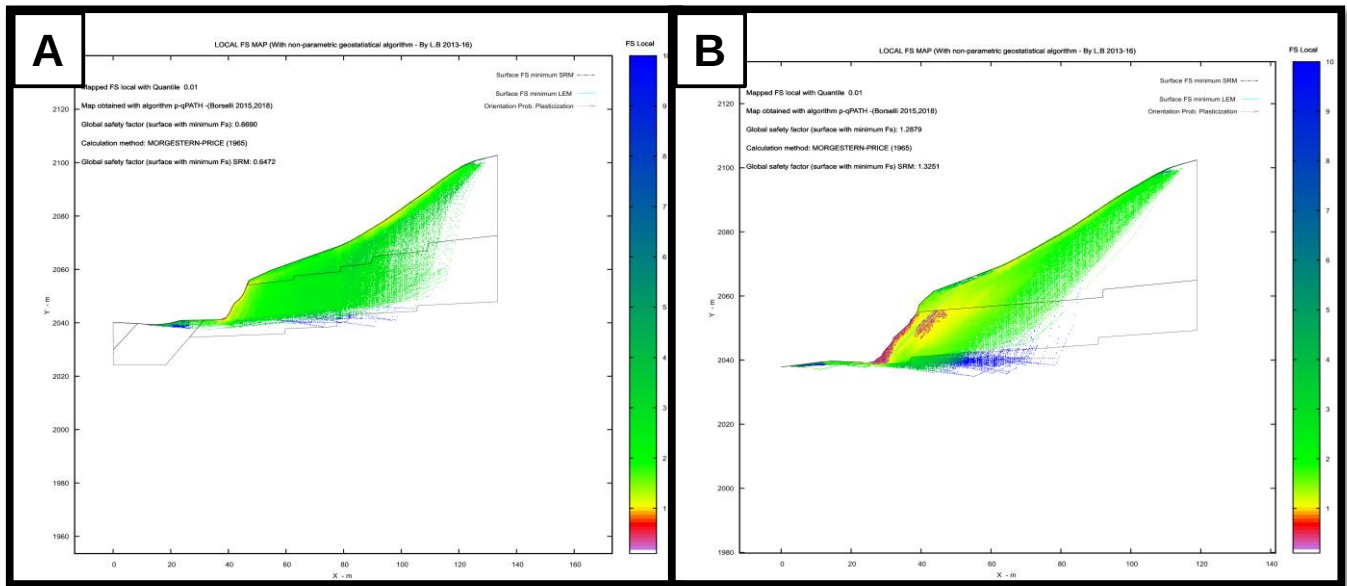


Figura 36. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *sniff random search* en condiciones estáticas con *tensión cracks* A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas con *tensión crack* donde el resultado en estas condiciones globales es buenas en la estabilización del talud aunque permanece la caída de pequeños y medianos fragmentos en la parte frontal del talud; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas con *tensión crack* donde el resultado global aun nos indica la inestabilidad clara en la parte frontal del talud y tracción deslizando en la parte interna frontal del talud ampliándose la zona mostrando potencial peligro para un gran deslizamiento de rocas nuevamente en ese sector.

El análisis en *sniff random search* en condiciones saturadas (fuertes lluvias que saturan el subsuelo y las discontinuidades existentes), exhibe resultados críticos de la condición de estabilidad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, decae severamente el factor de seguridad en esta condición (Figura 37), prácticamente toda la parte frontal del talud está en situación de inestabilidad (Anexo 14-15), dando como resultado posibles deslizamientos en grandes masas (avalancha de rocas y lodo), caídas de roca de grandes dimensiones que pondrían en peligro la infraestructura carretera, hidráulica de la presa (tuberías, cortina) que abastece de agua a la zona metropolitana, cultivos de peces y distribución eléctrica de CFE. Además de poner en peligro las vidas humanas que transitan sobre la carretera federal No. 80, este modelo con esta condición muestra que es posible otro deslizamiento de igual o mayor magnitud de lo que ya a ocurrido con anterioridad por lo que es necesario tomar en cuenta este estudio bajo esta

condición para poder realizar una intervención de estabilización del talud y prevenir daños a futuros que pudieran ascender a varios millones de pesos en reparaciones y reacondicionamientos.

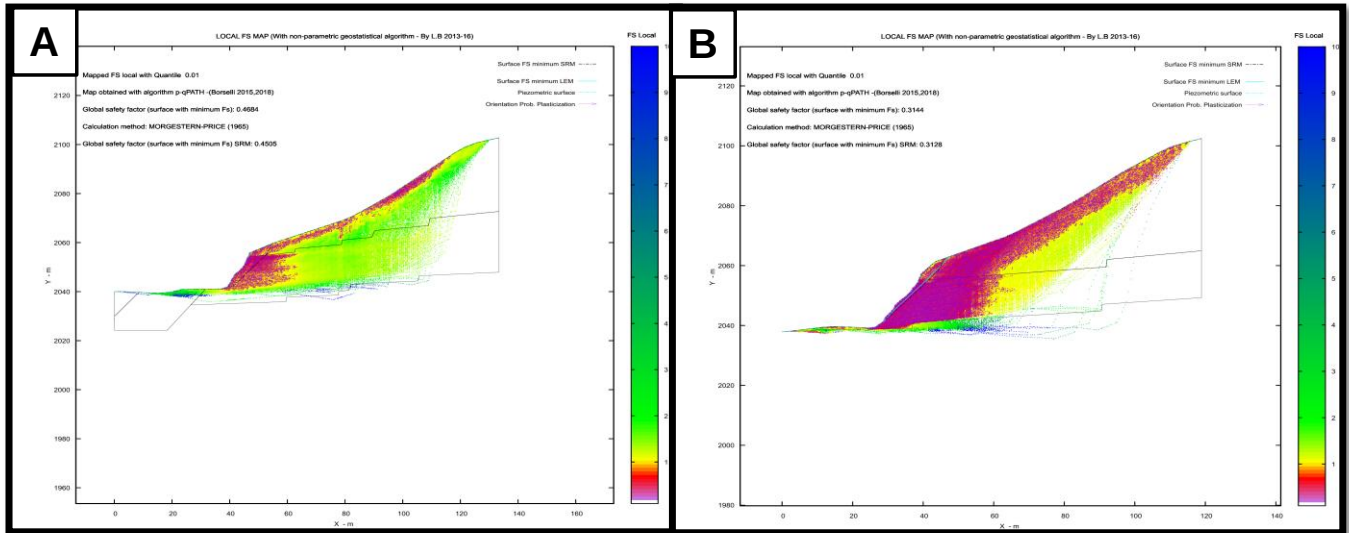


Figura 37. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *sniff random search* en condiciones saturadas A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones saturadas donde el resultado en estas condiciones globales cambia totalmente y exhibe una inestabilidad del talud con la presencia de agua de lluvia en saturación lo que provocaría un deslizamiento de gran magnitud; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones saturadas donde el resultado global aun nos indica la inestabilidad clara en el talud, bajo estas condiciones pesimistas prácticamente esa porción del talud se deslizaría.

El análisis en *sniff random search* en condición sísmica dio como resultado inestabilidad en la ladera del talud con posibles caídas de material y deslizamiento a baja y mediana escala (Figura 38; Anexo 16 y 17), que podrían derivar en cierres parciales de la carretera federal No.80, aunque se ve que hay mayor tracción dinámica activa dentro del talud (Anexo 16-17), que es peligroso ya que puede derivar a deslizamientos y caída de bloques de mayor magnitud hasta ser una movilización de grandes masas de escombros que pueden tener mayor impacto en el lugar, para poder recrear estas condiciones fue necesario la investigación del historial sísmico de la región (Servicio Sismológico Nacional, SSN., 2025) se estableció con una intensidad promedio de 3.5 grados Richter.

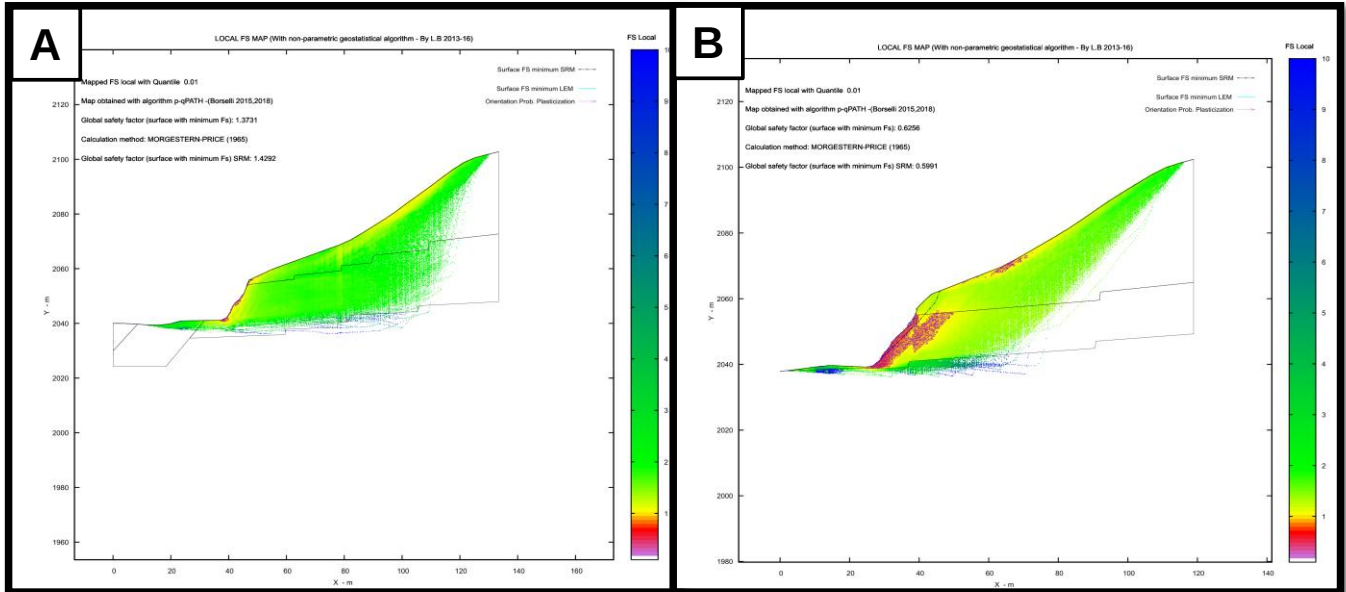


Figura 38. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *sniff random search* en condiciones sísmica A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones sísmicas donde el resultado en estas condiciones globales se mantiene con buena estabilidad del talud en este sector solo con la caída de bloques medianos a grandes en la base del talud a la orilla de la carretera; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones sísmicas donde el resultado global nos indica la inestabilidad del talud mostrándonos que en la parte interna de la porción frontal de esta zona hay mucha tracción dinámica que bajo las condiciones sísmicas y en la parte central superior también existe esa tracción sísmica.

El análisis en *mixed engines search* en condición estática, exhibe una mayor definición de las áreas de peligro y de la tracción dinámica interna del talud (Figura 39) reduce y engloba para optimizar la sección de factor de seguridad, bajo esta condición y criterio de análisis en forma global el talud tiene buena estabilidad con excepción de las laderas del talud que presenta deslizamientos y caída de escombros y bloques localmente, además de los talud de mayor pendiente mostrar en la cima mayor tracción dinámica en forma de corte, (Anexo 18 y 19).

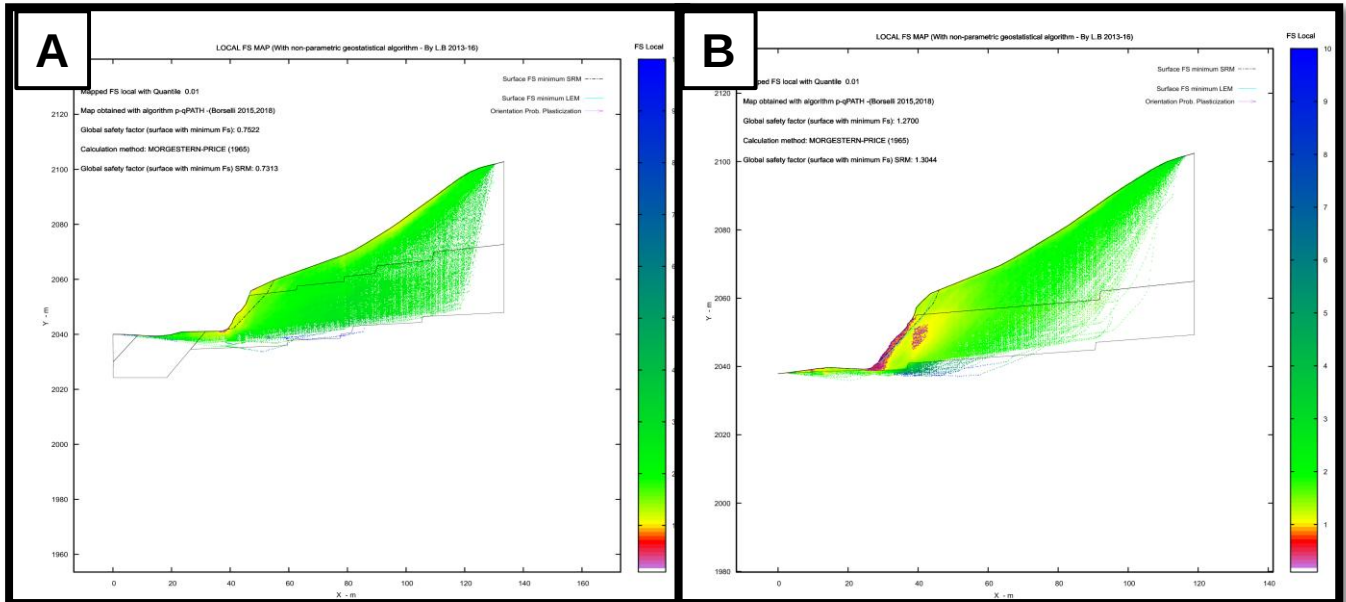


Figura 39. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *mixed engines search* en condiciones estáticas A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas donde el resultado en estas condiciones globales se mantiene con buena estabilidad del talud en este sector; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas donde el resultado global nos indica la inestabilidad del talud mostrándonos que en la parte interna de la porción frontal de esta zona hay tracción dinámica activa.

El análisis en *mixed engines search* en condición estática con *tension cracks* el modelo de las secciones de factor de seguridad muestra una buena estabilidad global del talud de la presa (Figura 40), sin embargo, sigue estando presente en rojo los deslizamientos en las laderas con caída de bloques y escombros, además de indicar de forma local la actividad de tracción dinámica dentro del talud (Anexo 20 y 21) puede ser considerado para futuros trabajos de intervención a dicho talud.

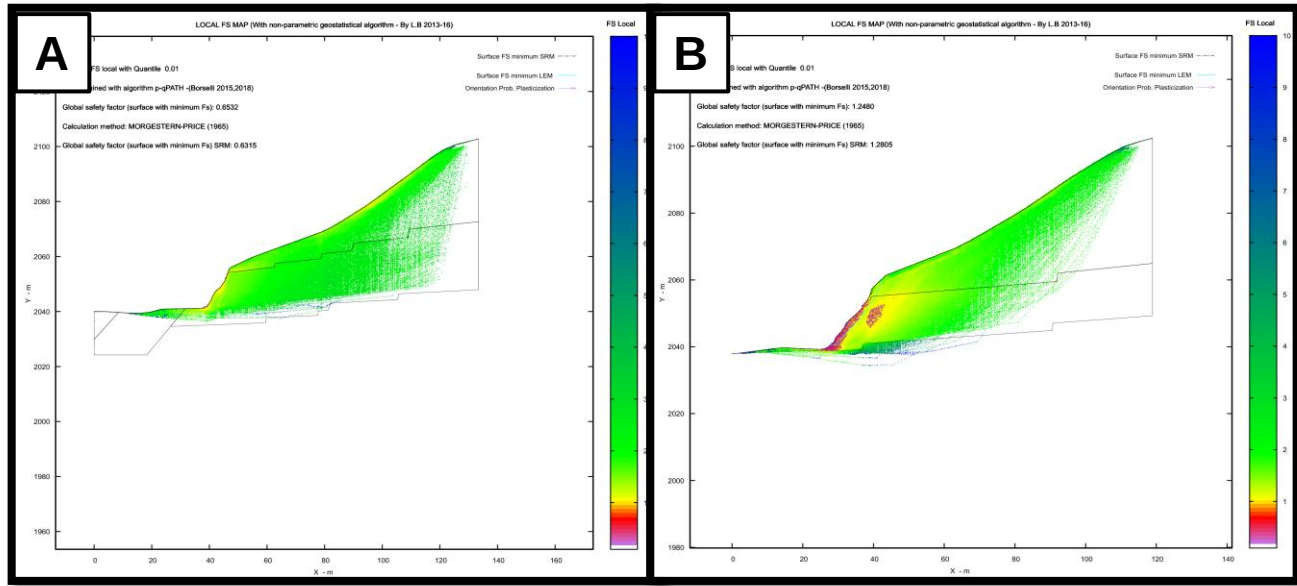


Figura 40. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *mixed engines search* en condiciones estáticas con *tension cracks* A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas con *tension cracks* donde el resultado en estas condiciones globales se mantiene con buena estabilidad del talud en este sector; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones estáticas con *tension cracks* son similares al de condiciones estática solo con mayor efecto de movimiento dinámico activo puntual en el interior del talud.

El análisis en *mixed engines search* en condición saturada, con este método a diferencia del otro, define mas lo que es la tracción dinámica interna del talud (Figura 41), porque en ambos análisis en la superficie es igual, casi todo el plano superficial del talud es inestable, también coinciden que ambos análisis establece condiciones de peligrosidad critica para la zona, esto se debe al fracturamiento del talud, el fallamiento que tiene, los diques alterados y además, el material de algunos de sus estratos (brecha tectónica y brecha volcánica), si observamos en Anexo 22 y 23, vemos claramente mas inestabilidad y posibles deslizamiento y avalanchas de escombros de la sección A-A' a D-D' que representan la porción central y poniente del talud izquierdo de la presa estudiada, claramente hay una relación entre factor geológico-estructural, factor hidrológico y factor antrópico, para generar esta zona de peligro crítico, comprometiendo infraestructura, comercio y vidas humanas de la región.

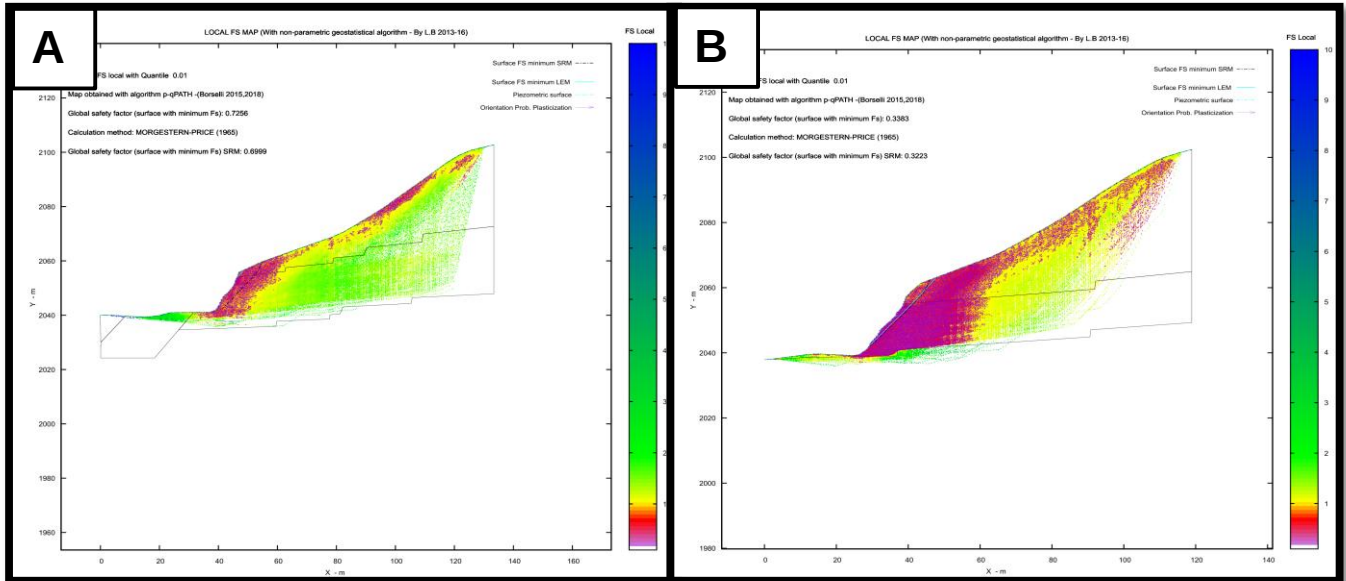


Figura 41. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *mixed engines search* en condiciones saturadas A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones saturadas donde el resultado en estas condiciones globales cambia y se vuelve el talud inestable con mucha tracción dinámica dentro del talud y en la parte superficial; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones saturada el talud se vuelve muy inestable en esta zona, prácticamente con el suelo saturado de agua de lluvia todo el talud es inestable con una muy alta tasa de movimiento interno y externo para potenciales caída de grandes bloques y deslizamientos a grandes escalas.

El análisis en *mixed engines search* en sísmica, con esta criterio y condición nos muestra con mejor detalle las zonas de peligro en el frente de nuestro talud (Figura 42), y en la zonas altas del talud con pendiente mayores a 60° nos da en color rojo zonas del corte de posibles deslizamiento de roca además de marcar en el interior del talud las zonas de tracción dinámica entre estratos (Anexos 24 y 25), que a diferencia del primer análisis con este marca pequeños deslizamientos y tracción dinámica en la continuación del talud inferior que esta por debajo de la carretera creando peligro de corte de carretera total bajo esta condición, cabe mencionar que la condición sísmica se dio en base a la media regional del historial de sismos ocurridos que es 3.5 grados *Richter*.

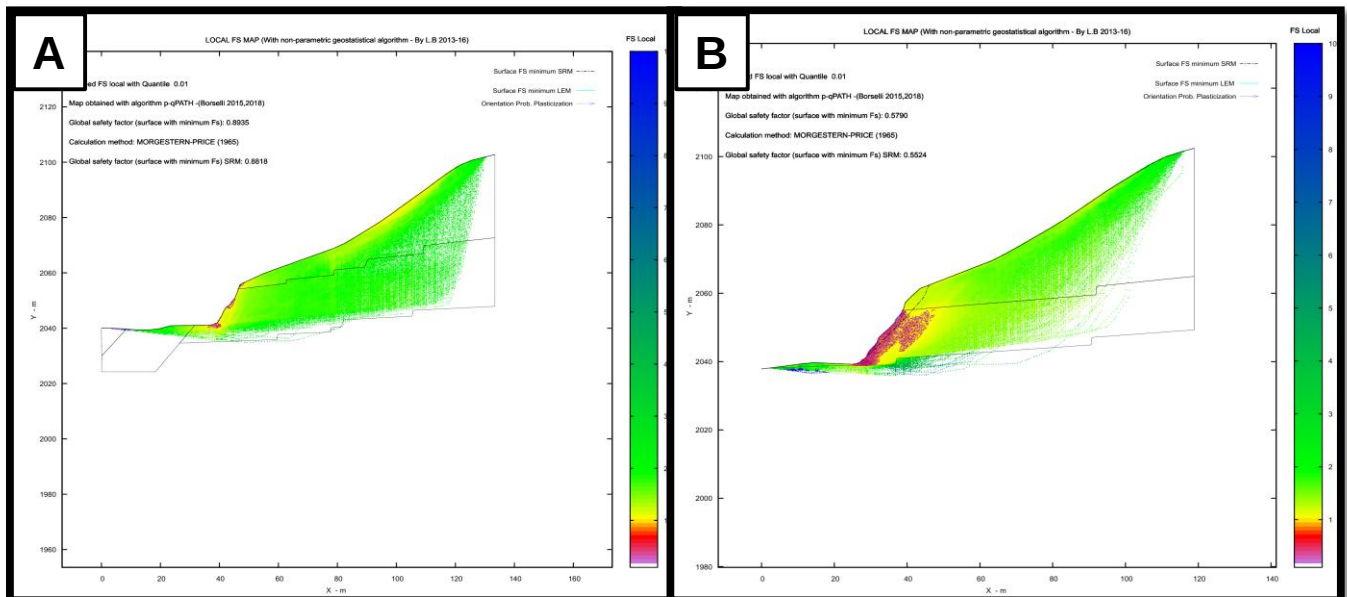


Figura 42. Secciones de factor de seguridad creadas en SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con *mixed engines search* en condiciones sísmicas A) Sección A-A' de factor de seguridad bajo condiciones sísmicas donde el resultado en estas condiciones globales es inestable en la parte frontal exterior del talud en esta porción que pueden causar el desprendimiento de bloques y su caída libre a la orilla de la carretera; B) Sección B-B' de factor de seguridad bajo condiciones sísmicas el talud tiene más movimiento de dinámico interno lo que puede generar un gran deslizamiento bajo esta condición.

Después de analizar y terminar de crear todas las condiciones mencionadas con anterioridad con esa información se crearon planos de factor de seguridad (Fs) utilizando el *software CSSAP* (Borselli, 2026) con los criterios utilizados en el SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), con el de Morgentern y Price, (1965); y los análisis de *sniff random search* y *mixed engines search* (Figuras 43 y 44; Anexos 26 a 33), para contrastar los resultados, pero ahora en planta.

Para ambos análisis observamos las relaciones entre el factor geológico-estructural, hidrológico y antrópicos, ya que nuestro plano de factor de seguridad el que representa mayor peligro es en la condición saturada (Figura 43 y 44), pero obedeciendo un sentido y forma que es mandada por la geología estructural y la antrópica (carretera federal No. 80), aun así en los otros 3 factores aunque baja las zonas de peligrosidad y son en puntos más localizados siguen el patrón de las fallas y diques donde ya ocurren actualmente deslizamientos y caída de rocas.

Para el plano de factor de seguridad (Fs) analizado con *sniff random search* en condiciones estáticas (Figura 42 A), observamos que las condiciones de peligro estan a lo largo de la carretera y en toda la lareda del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos en la parte oeste vemos que además de correr paralelamente a la carretera se desprende en dirección a la falla regional Juachín.

En el plano analizado bajo las mismas condiciones, pero agregando *tension cracks* observamos que se reduce la zona de peligro en el talud (Figura 43 B) y se enfocan en la zona oeste y en donde estan las discontinuidades estructurales como son las fallas, zona de fracturamiento y contacto entre el dique volcánico y la brecha volcánica del domo.

En condiciones saturadas es cuando el talud izquierdo de la presa está en condiciones críticas (Figura 43 C), observamos que el factor hidrológico si es condicionante directo para deslizamientos y caída de bloques, y dando el resultado que en el futuro puede ocurrir deslizamientos de igual o mayor magnitud de los que ya han sucedido en el pasado reciente, poniendo en peligro el comercio local, logística e infraestructura sensible para la zona metropolitana de San Luis Potosí y vidas humanas que transiten por el lugar, los daños ocurridos podrían ascender a varios millones de pesos si no se previene y hay una intervención de estabilización del talud.

En las condiciones sísmicas bajo el mismo criterio de análisis anterior vemos que la zona de peligrosidad es la misma que en las 3 condiciones anteriores aun se incrementa la zona de inestabilidad (marcada en rojo) pudiendo ocurrir caída de grandes bloques afectando al flujo de la carretera además, de tener afectación por debajo de la carretera en esta condición sísmica exhibe que también hay deslizamientos y caída de bloques por debajo de la carretera, ya que dicha carretera esta construida en la parte central del talud.

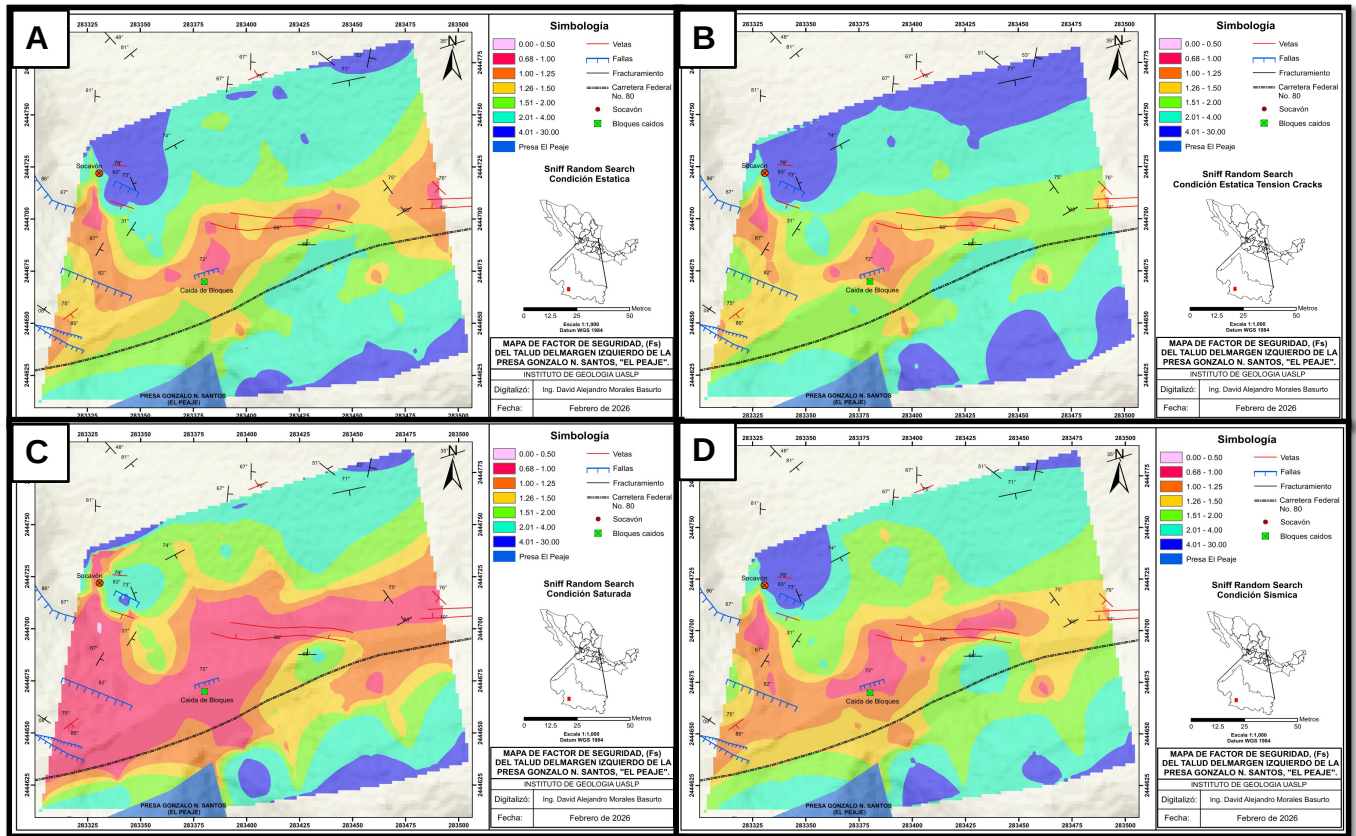


Figura 43. Planos de factores de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el *software* CSSAP (Borselli, 2026) analizado con *sniff random search* A) Plano de factor de seguridad en condiciones estáticas del talud donde nos muestra que la parte central es la más afectada con peligro de continuar con caída de bloques de deslizamientos de rocas; B) Plano de factor de seguridad en condiciones estáticas con *tension cracks* exhibe un mayor estabilidad superficial del talud; C) Plano de factor de seguridad en condiciones saturadas donde nos muestra un gran cambio y que la gran mayoría del talud está en condiciones inestables en terreno saturado; D) Plano de factor de seguridad en condiciones sísmicas, muestra que se amplía la zona de peligro por deslizamientos y caída de bloques generalizándolo prácticamente a lo largo de la carretera y pone en peligro esa vía bajo esta condición.

Para el plano de factor de seguridad (Fs) analizado con mixed engines search en condiciones estáticas, estáticas con tension cracks y sísmica; (Figura 44), el resultado es muy similar con el análisis de sniff random search las diferencias entre ambos cálculos son este análisis salió mas detallado las zonas de peligro y no tan extensas (Anexos 30 a 34), están más localizada en las partes en las zonas que en campo si se observan con mayor caída de bloques y deslizamiento al momento de la creación de esta tesis, este análisis nos permite analizar mas detalladamente las zonas inestables y también detalla mas los movimientos internos del talud, señalándonos donde puede ocurrir o está ocurriendo tracción dinámica y

poder actuar antes de que supere su limite de deformación y ocurra una ruptura causando deslizamiento o flujos de escombros.

Para el plano de factor de seguridad con el análisis de mixed engines search en la condición saturada si nos muestra un incremento de la zona de peligrosidad por inestabilidad del talud que en el análisis anterior y se extiende a lo largo del trazo de las discontinuidades estructurales (fallas y diques), además de correr a todo lo largo de la carretera federal No. 80; este plano nos advierte que puede llegar a ocurrir deslizamientos de gran magnitud igual o mayor a las del pasado cercano comprometiendo economía, logística e infraestructura regional.

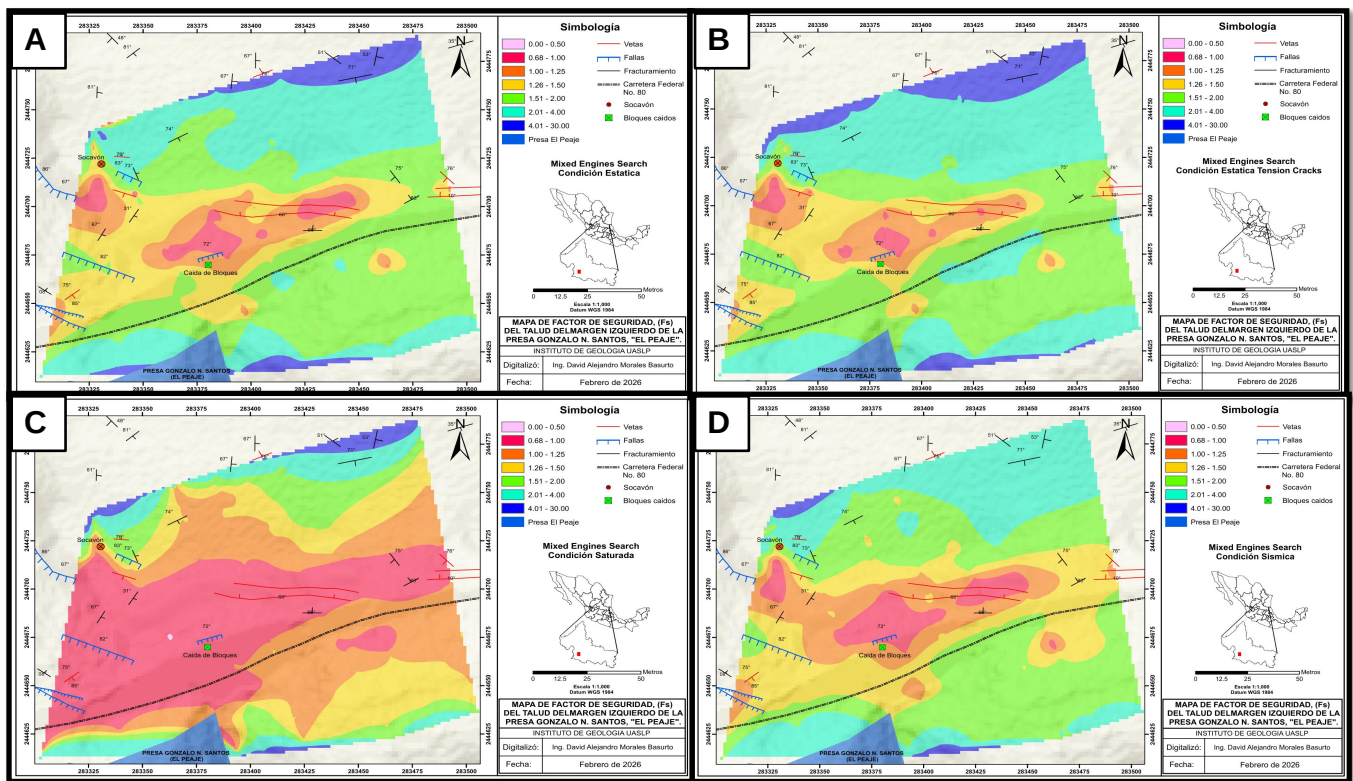


Figura 44. Planos de factores de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software CSSAP (Borselli, 2026) analizado con mixed engines search; A) Plano de factor de seguridad en condiciones estáticas del talud donde nos muestra que de la parte central al poniente del talud hay peligro de caídas de bloques continuos e inestables B) Plano de factor de seguridad en condiciones estáticas con *tension cracks*, se aprecia una reducción de la zona de peligrosidad en el talud pero ofrece una mayor definición para localizar mejor las zonas inestables y que se pueden intervenir; C) Plano de factor de seguridad en condiciones saturadas donde se muestra un gran cambio y que la gran mayoría del talud está en condiciones inestables en terreno saturado; D) Plano de factor de seguridad en condiciones sísmicas, muestra que se amplía la zona de peligro por deslizamientos y caída de bloques generalizándolo prácticamente a lo largo de la carretera y pone en peligro esa vía bajo esta condición además, de la infraestructura de la presa.

Conclusiones.

Se analizó la estabilidad del talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos dada la peligrosidad que representan taludes en estos macizos rocosos se aplicaron los *softwares* CSSAP 6.1 y SSAP 6.1 (Borselli, 2026).

Las secciones y planos de factor de seguridad tuvieron coherencia y los trabajos de conectividad hidrológica y el plano geológico-estructural, al analizar todos los datos recolectados junto con dichos planos descubrimos las causas que permiten la desestabilización del talud de la presa, existe dos unidades litológicas que sin la compactación litológica natural, tienden a erosionarse muy rápidamente con los agentes erosivos naturales dichas unidades son la base del talud con la carretera y sostienen en la parte superior a la unidad riolita San Miguelito superior que son flujos de riolita de gran volumen, con la erosión se quedan sin sujeción la unidad superior tendiendo a caer por acción de la gravedad a un costado de la carretera sin la necesidad de lluvias torrenciales ni sismos.

Las fallas laterales con componente normal que se desprende de la estructura principal dando el fallamiento de flor o cola de caballo que son conocidas como zonas muy fracturadas y falladas, Además, de la inclinación de las capas de los pseudoestratificación de la riolita que están con inclinación en dirección a la carretera de 20° a 25° con el corte de la carretera federal No. 80, se estima que pudieron reactivar localmente el movimiento de esas fallas, al quitarle estabilidad en parte baja del talud.

Lo que inicio gradualmente la desestabilización en el talud, también en dejar los cortes carreteros muy inclinados (entre 70° y 90° de inclinación), generando un desequilibrio natural para el talud ya que ese tipo de pendientes con el nivel de fracturamiento de la zona el efecto de tension crack aumenta generando caída de bloques al costado de la carretera

Con los múltiples análisis que se hicieron en los *softwares* CSSAP 6.1 y SSAP 6.1 (Borselli, 2026) y apoyo del análisis de conectividad hidrológica de la zona, mostro que la geología estructural, el corte

de la carretera e hidrología están estrechamente relacionados para detonar futuros deslizamientos de igual o mayor magnitud e incluso flujos de escombros por las características litológicas de las brechas y un aporte extraordinario diario de agua de lluvia pudieran generar ese panorama.

Con estos factores conjugados en el talud con mayor peligro de deslizamientos y caída de bloques continuo es la parte central e izquierda del talud (que ya existen bloques caídos y material deslizado) y la porción donde hay mayor fallamiento y fracturamiento, por consecuencia también hay mayor infiltración del agua generando presión hidrostática entre las rocas y liberando la presión en dirección al corte de la carretera, deslizándose y cayendo fragmentos de roca en dicha carretera.

Las secciones C-C' Y D-D' muestra claramente que bajo las condiciones saturadas la zona tiene un potencial peligro de deslizamiento y teniendo de referencia el récord histórico de las caídas de bloques y deslizamientos se mantiene año con año caídas y deslizamientos de bajas a escalas porque se cumplen con las condiciones simuladas parcialmente y no generan un gran daño a la carretera por el momento pero el efecto que tiene ese talud en específico en la carretera es un movimiento lento pero constante en dirección a la carretera federal (parecido al movimiento de los glaciares).

También con ayuda del análisis de los *softwares* CSSAP 6.1 y SSAP 6.1 (Borselli, 2026), las secciones de factor de seguridad, mostró que existe tracción dinámica en el interior del talud que pueden llegar a ser peligroso si llegan al límite de ruptura con alguna de las condiciones hidrológicas y sísmicas auxiliándonos en dar una imagen clara de la profundidad y magnitud de posibles deslizamientos.

La elaboración de esta tesis aporta información valiosa para futuros estudios de intervención de estabilidad al talud y evitar la caída de los grandes volúmenes calculados con el *software* SSAP 6.1 (Borselli, 2026) y mitigar los potenciales peligros del talud y asegurar la zona para que no ocurrieran daños a la infraestructura crítica que rodea al talud y a la logística de la región.

Si llegaran a ver condiciones críticas en el talud como las calculadas y modeladas por los *softwares* CSSAP 6.1 y SSAP 6.1 (Borselli, 2026), los posibles deslizamientos a futuro pueden igualar o rebasar

la magnitud de años pasados provocando daños en la infraestructura crítica que rodea al talud y la logística de la región.

El potencial peligro que se calcula y modela en este trabajo de tesis de maestría pudiera pasar a un riesgo crítico para las infraestructuras más distales, como es la cortina de la presa Gonzalo N. Santos, tuberías de distribución de agua de la misma presa, daños a comunidades cercanas como el poblado de Escalerillas y potencial riesgo de daños secundarios a otras presas que interconectan la red hídrica de la ciudad de San Luis Potosí y el riesgo lejano de daños de la infraestructura directa de la zona metropolitana de San Luis Potosí.

Recomendaciones

Se recomienda que el talud del margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, tenga la intervención de estabilidad del talud y poder mitigar las caídas de bloques y pequeños deslizamientos que se tienen continuamente año con año, además, de eliminar los movimientos internos del talud que pudieran causar una ruptura a futuro con las condiciones de lluvia (saturada) o sísmica.

Las medidas preventivas inmediatas que se pueden implementar en el talud seria la creación de un canal de desfoje de agua superficial para mantener un control temporal y no absoluto de la saturación del talud.

Acompañado de esta medida, también se puede complementar con la realización de obras en el talud como es el escalonamiento del talud para reducir su altura y mitigar la caída de bloques, además de implementar anclajes y malla de acero reforzado sobre el talud con tubos de escurrimiento de agua para drenarlo que son cálculos reservados al estudio de remediación y estabilización del talud.

Además de complementar con trabajos geofísicos (sondeos eléctricos) para detallar mejor las unidades volcánicas a profundidad y también el comportamiento de las fallas en el interior del talud, además de proporcionar información del nivel freático del talud, crucial para una mejor definición del modelo geotécnico.

Dichos trabajos pueden ser modelados y calculados en el software *SSAP 6.1* (Borselli, 2026) para ver los efectos y condiciones de estabilidad del talud con la intervención y al momento de la ejecución de los trabajos que se optimo los métodos de intervención y asegurar la durabilidad del trabajo realizado, posterior a esto, recomendaría utilizar el software *CSSAP 6.1* (Borselli, 2026) para actualizar los mapas de factor de seguridad del talud de margen izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos.

Así, aseguramos en tener el talud sin saturación (condiciones drenadas), y asegurado para evitar caídas y deslizamientos de bloques en condiciones estáticas, sísmicas (normales para la zona) y saturadas, manteniendo a salvo la infraestructura critica que rodea al talud y la logística de la región.

Bibliografía.

- Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, A. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende S y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, GRANDES FRONTERAS TECTÓNICAS DE MÉXICO, CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO* (1), 65-82.
- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C., & Luhr, J. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 59-71.
<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2000v53n1a3>.
- Borselli, L. (2021). www.lorenzo-borselli.eu, versión 1.4.1.
- Borselli, L. (2026). <https://www.ssap.eu/>, SSAP 2010, PROGRAMA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES, versión 6.1.
- Broch, E. & Franklin, J. A. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(6), 669–67.
- Brown, E. T. (2008). Estimating the mechanical properties of rock masses. In *Proceedings of the 1st southern hemisphere international rock mechanics symposium: SHIRMS* (Vol. 1, pp. 3-21).
- Cai M (2010) Practical estimates of tensile strength and Hoek–Brown strength parameter m_i of brittle rocks. *Rock Mech Rock Eng* 43:167–184. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0053-1>.
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051. <https://doi.org/10.1139/e83-094>.

- Francisco Nieto-Samaniego, Á., Alicia Alaniz-Álvarez, S., & Camprubí í Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: Estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica.
- Davarpanah, S. M., Sharghi, M., Vásárhelyi, B., & Török, Á. (2022). Characterization of Hoek–Brown constant mi of quasi.isotropic intact rock using rigidity index approach. *Acta Geotechnica*, 17(3), 877-902.
- INEGI. (1986). Provincias Fisiográficas de México (p. 23) [Geográfico]. INEGI. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221034-2/702825221034-2_2.pdf.
- INEGI. (2008). Mapa de las Provincias Fisiográficas de México (2008.a ed.) [Geografía]. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html>.
- José Isabel Blanco Briones & Rodolfo Rodríguez Ríos. (1997). Tepetate [Geológicos].
- Labarthe-Hernández, G., & Jimenez-Lopéz, L. S. (1992). Características físicas y estructura de las lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P. Folleto técnico, 1(114), 36.
- Labarthe-Hernández, G., & Jimenez-Lopez, L. S. (1993). Folleto técnico 117. Geología del Domo Cerro Grande, Sierra de San Miguelito, S.L.P., Folleto Técnico (117), 28.
- Labarthe-Hernández, G., & Tristán González, M. (1978). Cartografía Geológica Hoja San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1(59), 70.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán González, M., & Aranda-Gómez, J. (1982). Revisión Estratigráfica del Cenozoico de la Parte Central del Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico, 1(85), 213.
- López Loera, H., & Tristán González, M. (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: Implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 137-156. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a11>.

- Marinos, V. (2017). Un sistema revisado de clasificación geotécnica GSI para macizos rocosos heterogéneos tectónicamente perturbados. como el flysch. Boletín de Ingeniería Geológica y Medio Ambiente, 1-14.
- Morán-Zenteno, D., Urrutia-Fucugauchi, J., Campos-Madrigal, E., Silva-Romo, G., Caballero-Miranda, C., Uribe-Luna, J., & Cabral-Cano, E. (1985). Geología de la Republica Mexicana. UNAM.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). El análisis de la estabilidad de superficies de deslizamiento generales. Geotécnica, 15(1), 79-93.
- Nieto-Samaniego, A. F., & Alaniz-Álvarez, S. A. (1997). La deformación cenozoica post laramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 14(1), 13-25.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Alaniz-Álvarez, S., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Nieto-Samaniego, A. F. y Morán-Zenteno, D. J., 1991, Geological provinces of México. A new proposal and bases for their definition: Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología; Universidad Autónoma de Hidalgo, Instituto de Investigación en Ciencias de la Tierra; Sociedad Geológica de Mineralogía; y Secretaría de Educación Pública, Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica, Convención sobre la Evolución Geológica y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hidalgo, Memoria, p.p. 143-144.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A. y Nieto-Samaniego, A. F., 1992, Carta de las provincias geológicas de la República Mexicana, Quinta Edición, Escala 1:2 000 000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales.

Rodríguez Rodríguez, N. (2026) Evaluación del peligro por inestabilidad de taludes en los márgenes izquierda y derecha de la Presa de San José, San Luis Potosí., (Tesis Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Serna Bafún, J. H. (2018). Control estructural para explicar el emplazamiento del volcanismo final en el norte del Complejo Volcánico de la Sierra San Miguelito, S.L.P. [Tesis]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Servicio Sismológico Nacional, SSN. (s.f.). Recuperado 3 de agosto de 2025, de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>.

Sosa Dávila, V. V. (2019). Caracterización Geomecánica para Averiguar el Grado de Estabilidad de Taludes Margen Izquierda y Derecha de la Cortina de la Presa «El Realito» San Luis de la Paz, Guanajuato. [Geotecnia]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Suarez-Díaz. (2012). Deslizamientos tomo I- análisis geotécnico. www.erosion.com.co.

Torres-Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., Gómez-Anguiano, M., & Mata-Segura, J. L. (2006). The pyroclastic dikes of the Tertiary San Luis Potosí volcanic field: Implications on the emplacement of Panalillo ignimbrite. *Geofísica Internacional*, 45(4), 243-253. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2006.45.4.161>.

Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Cruz-Márquez, J., García-Arreola, M. E., Bellon, H., Fransetti, M., & Labarthe-Hernández, G. (2015). Características geoquímicas y significado tectónico del complejo de diques y domos félsicos del Paleoceno-Eoceno de La Tesorera, Zacatecas, en la Mesa Central, México. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLOGICAS*, 32(3), 455-474.

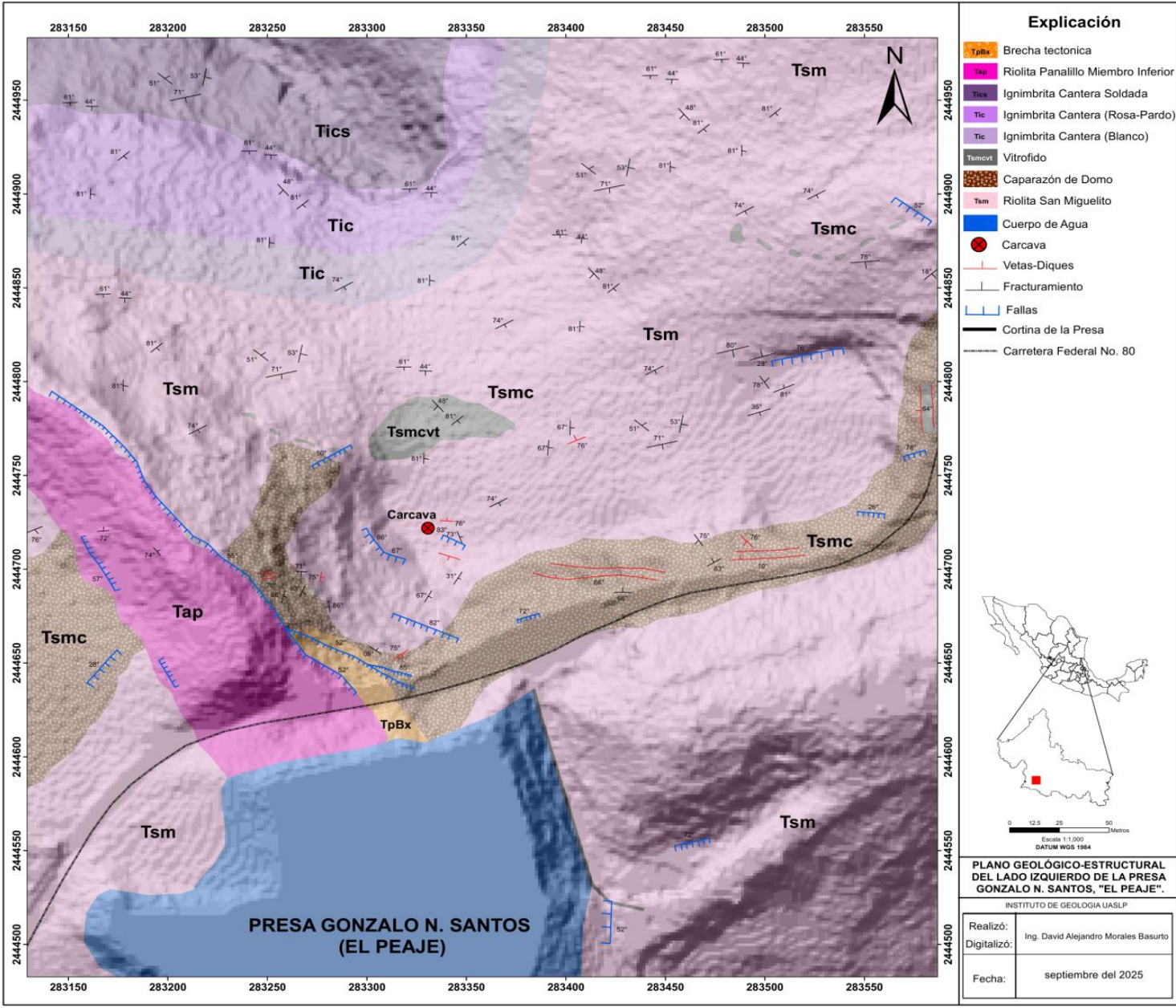
Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., & Labarthe-Hernández, G. (2009). Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de*

la Sociedad Geológica Mexicana, 61(3), 287-303.

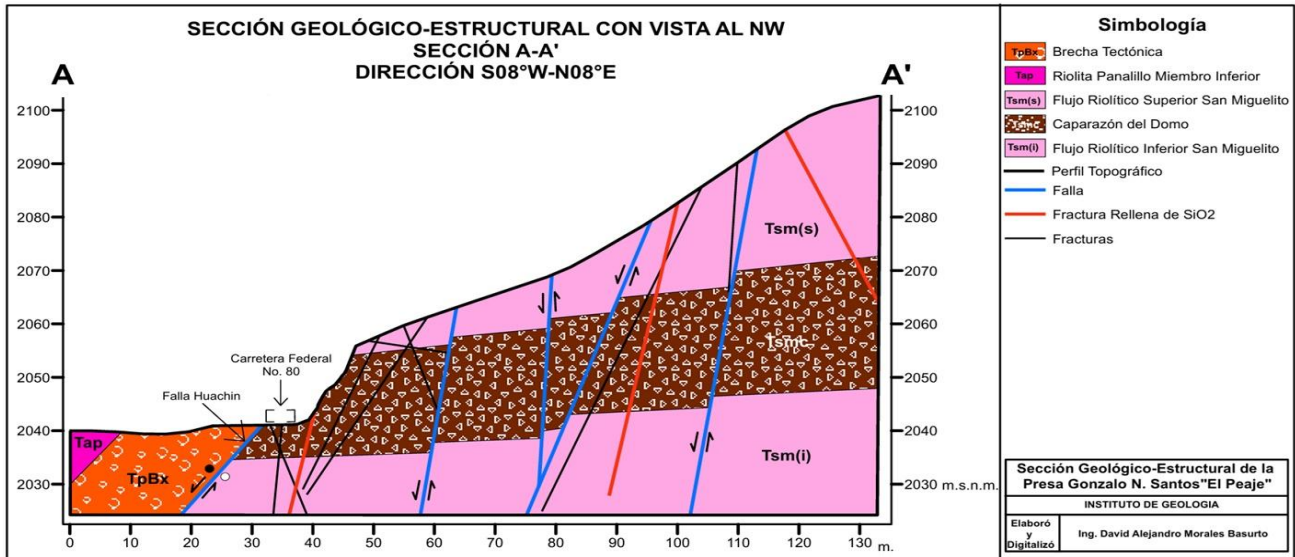
<https://doi.org/10.18268/BSGM2009v61n3a1>.

Vélez-Basurto, J. M. (2006). Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio de Villa de Reyes, S.L.P. (p. 111) [Minero]. Servicio Geológico Mexicano.

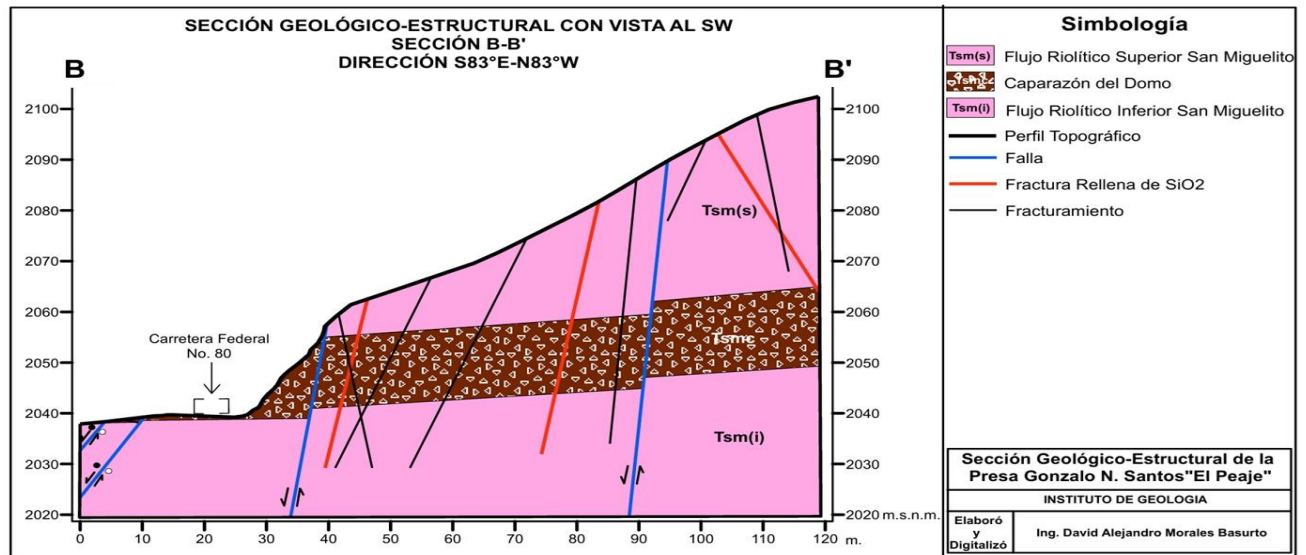
ANEXOS



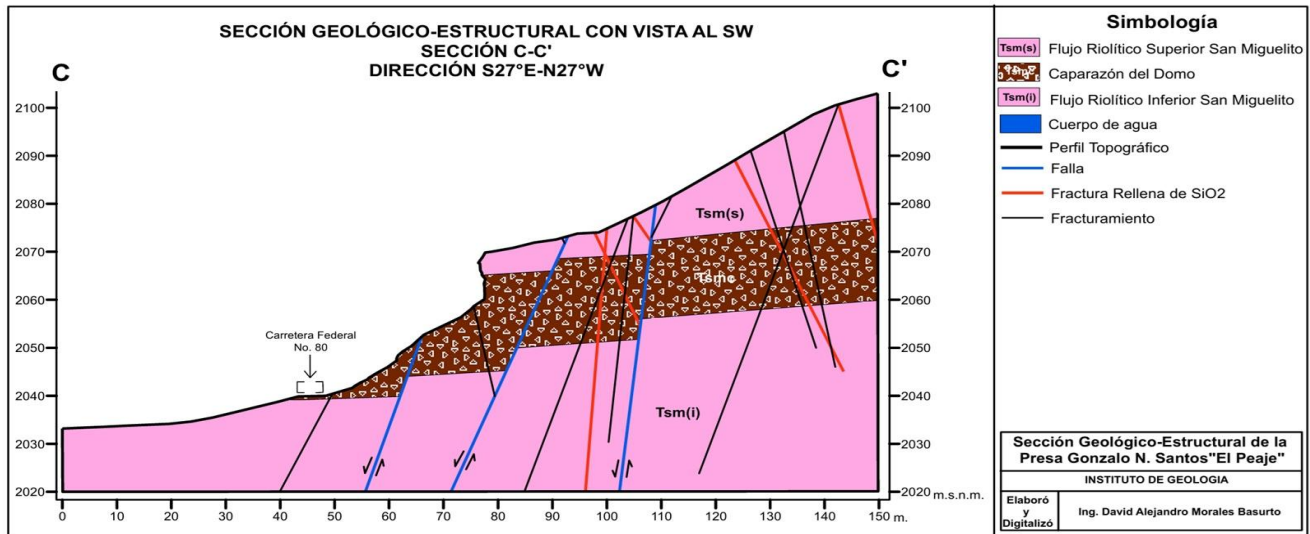
Anexo 1. Plano geológico-estructural-geotécnico del talud de la margen izquierda de la presa Gonzalo N. Santos, ("El Peaje").



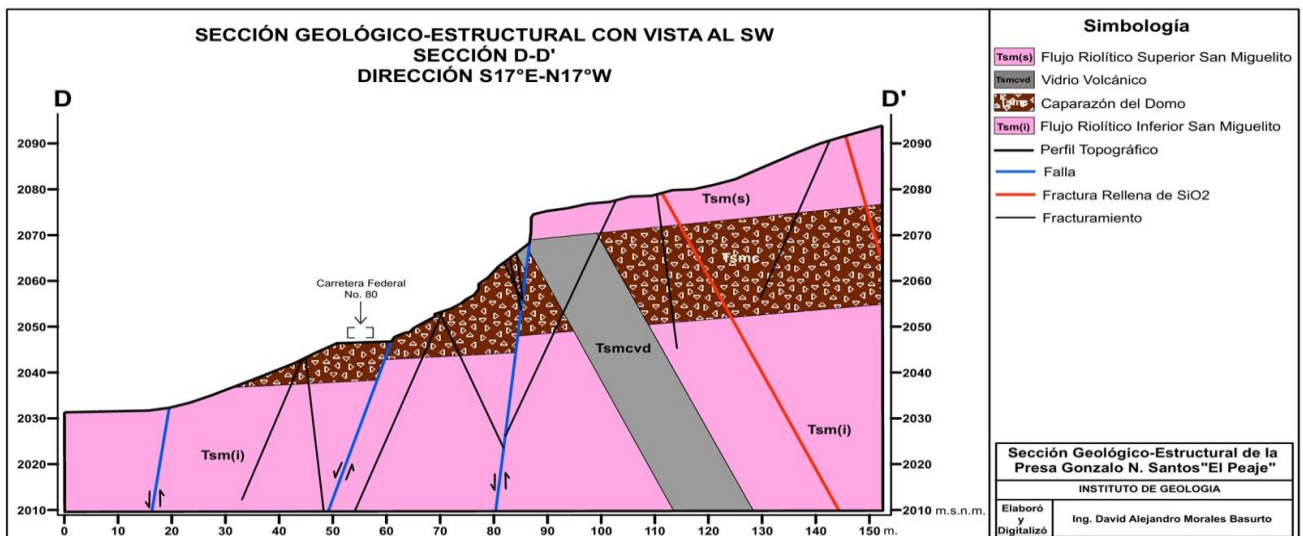
Anexo 2.- Sección A-A' geológico-estructural, mostrando la proyección de la falla principal Huachín y las fallas secundarias asociadas a la principal haciendo un fallamiento estilo cola de caballo.



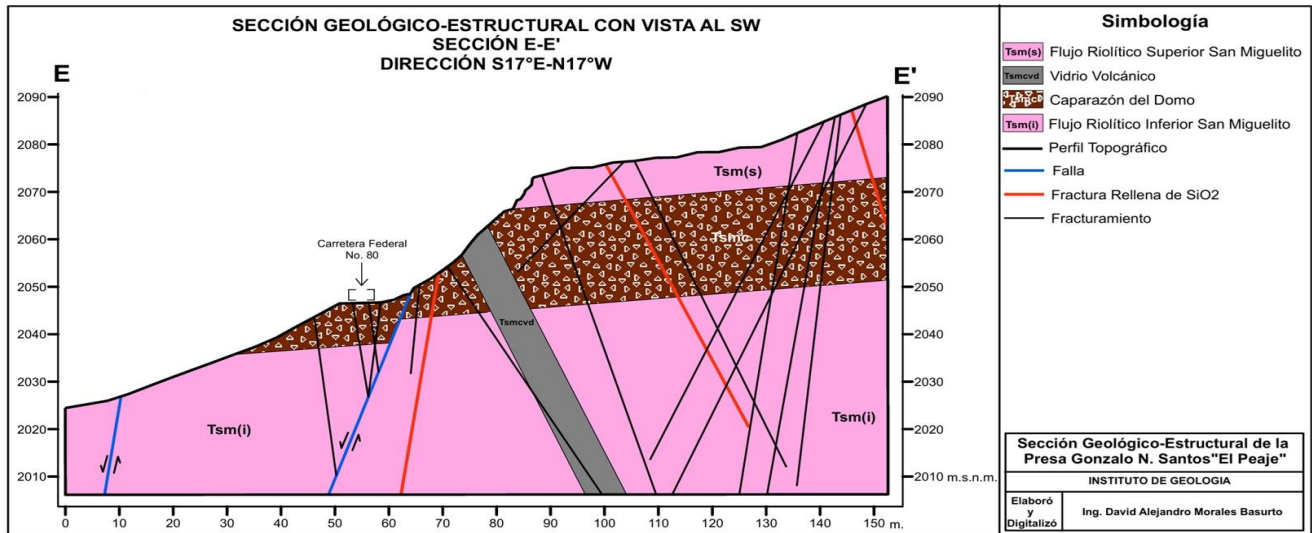
Anexo 3.- Sección B-B' geológico-estructural, exhibiendo parte de la zona de fallamiento, son la mayoría fallas normales del Paleogeno, que afectan estructuralmente a la estabilidad del talud a estudiar.



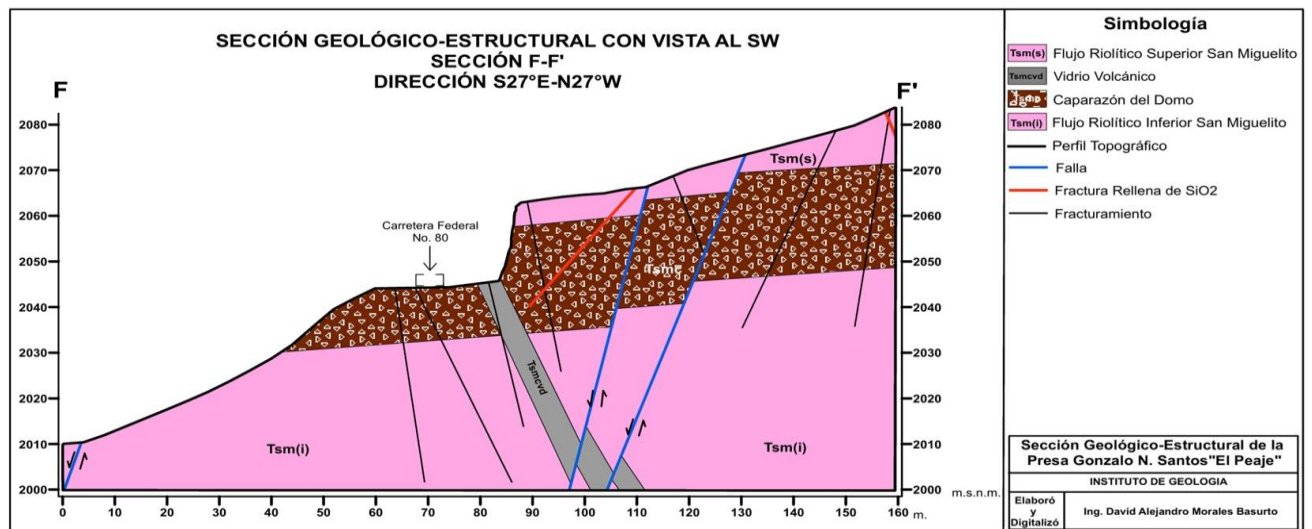
Anexo 4.- Sección C-C' geológico-estructural, mostrando la parte mas afectada del talud, con las proyecciones estructurales son por las fallas normales paralelas que existen y son las fallas secundarias asociadas a la falla principal Huachín, además de exhibir salientes de rocas sobre la superficie lo que morfológicamente lo que también inestabiliza esta porción del talud.



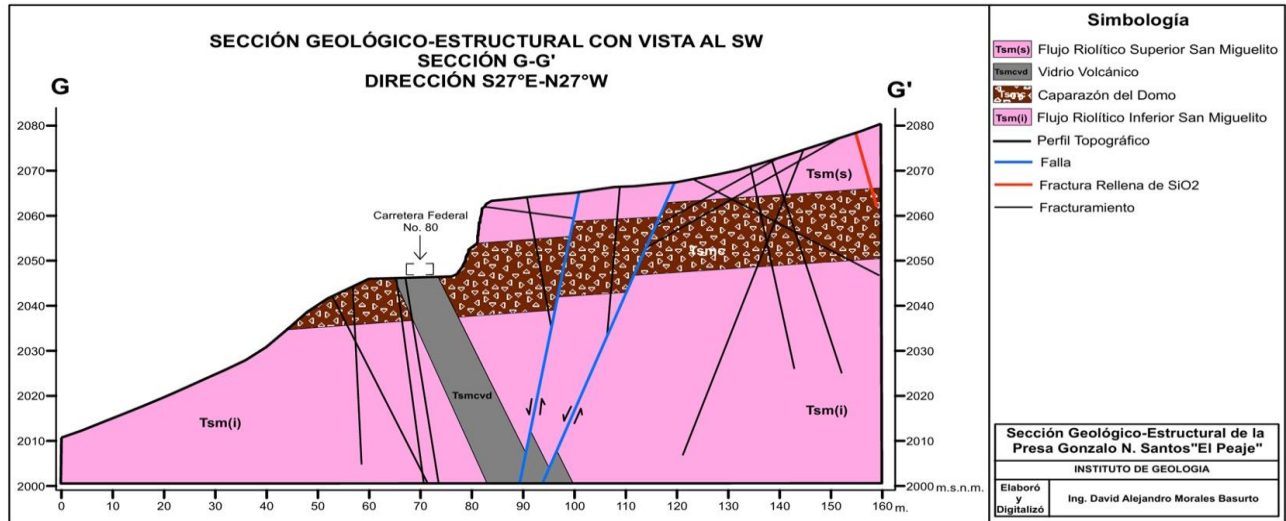
Anexo 5.- Sección D-D' geológico-estructural, porción del talud con afectación considerables en el talud, además de tener un dique de vidrio volcánico producto de los últimos pulsos eruptivos residuales del domo ríolítico el dique de vidrio volcánico esta desvitrificado, parcialmente argilizado.



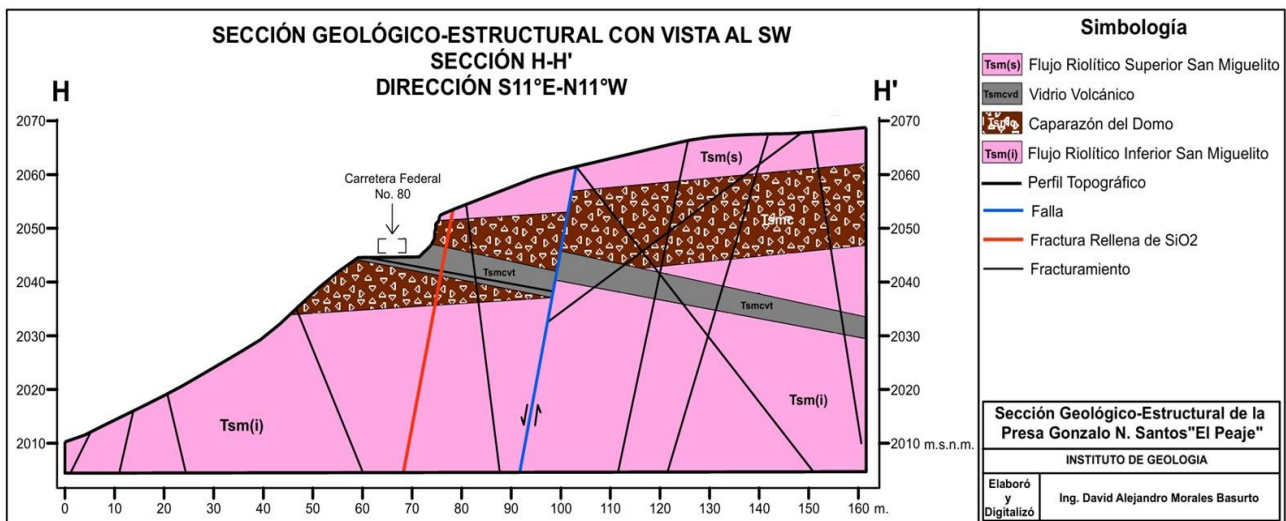
Anexo 6.- Sección E-E' geológico-estructural, en esta porción del talud se interpreta que hay mayor fracturamiento y con mas fracturas rellenas de sílice afectando la parte superior de la riolita San Miguelito, además de estar en la parte central de talud el dique de vidrio volcánico y fracturamiento a la base del talud asociado a las fallas normales.



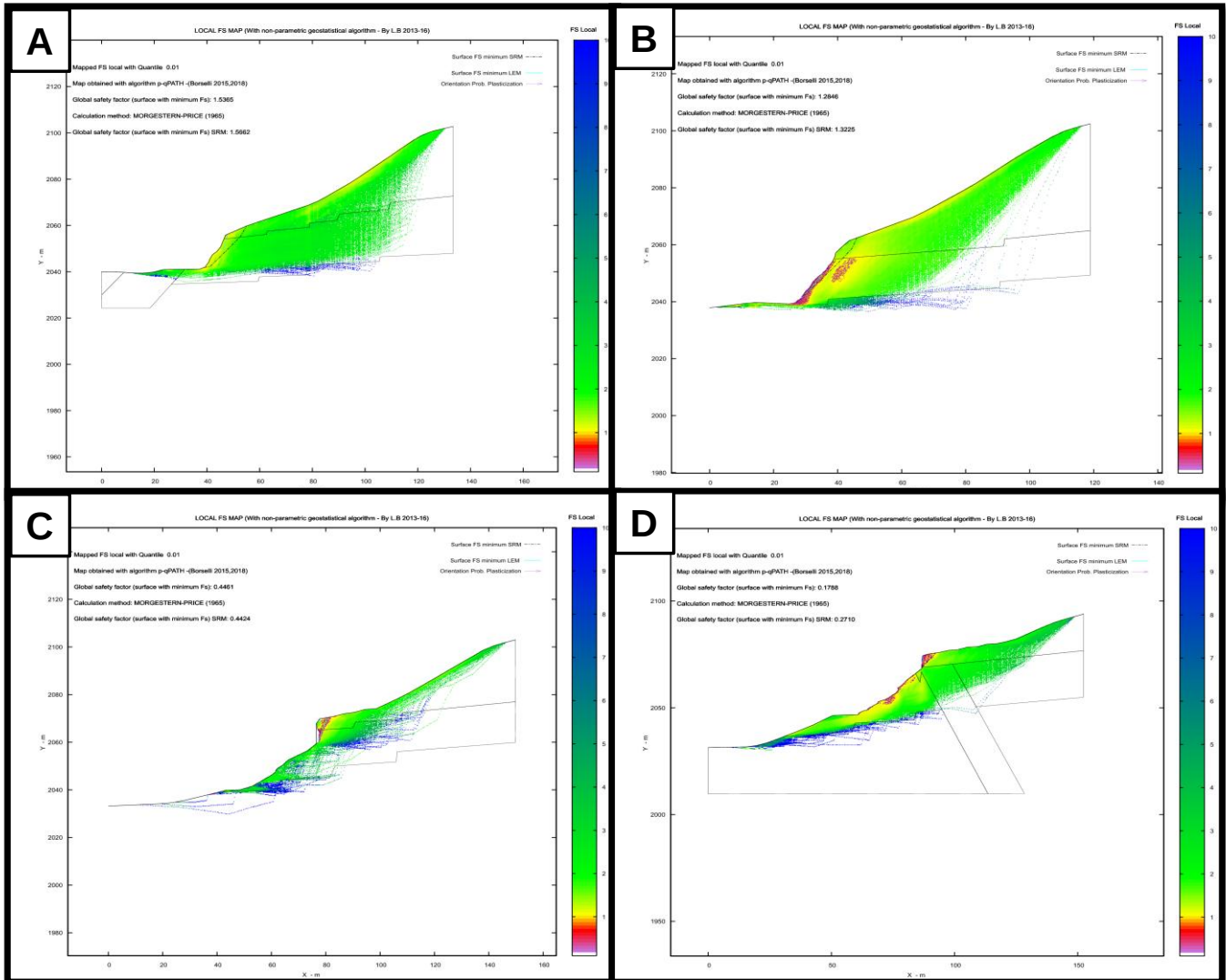
Anexo 7.- Sección F-F' geológico-estructural, exhibiendo un par de fallas normales que se desprenden de la falla principal hay una disminución de la densidad de fracturamiento y el relleno de fracturas por sílice esta relacionada al dique de vidrio volcánico, la riolita san miguelito esta siendo deformada por el efecto de este fallamiento.



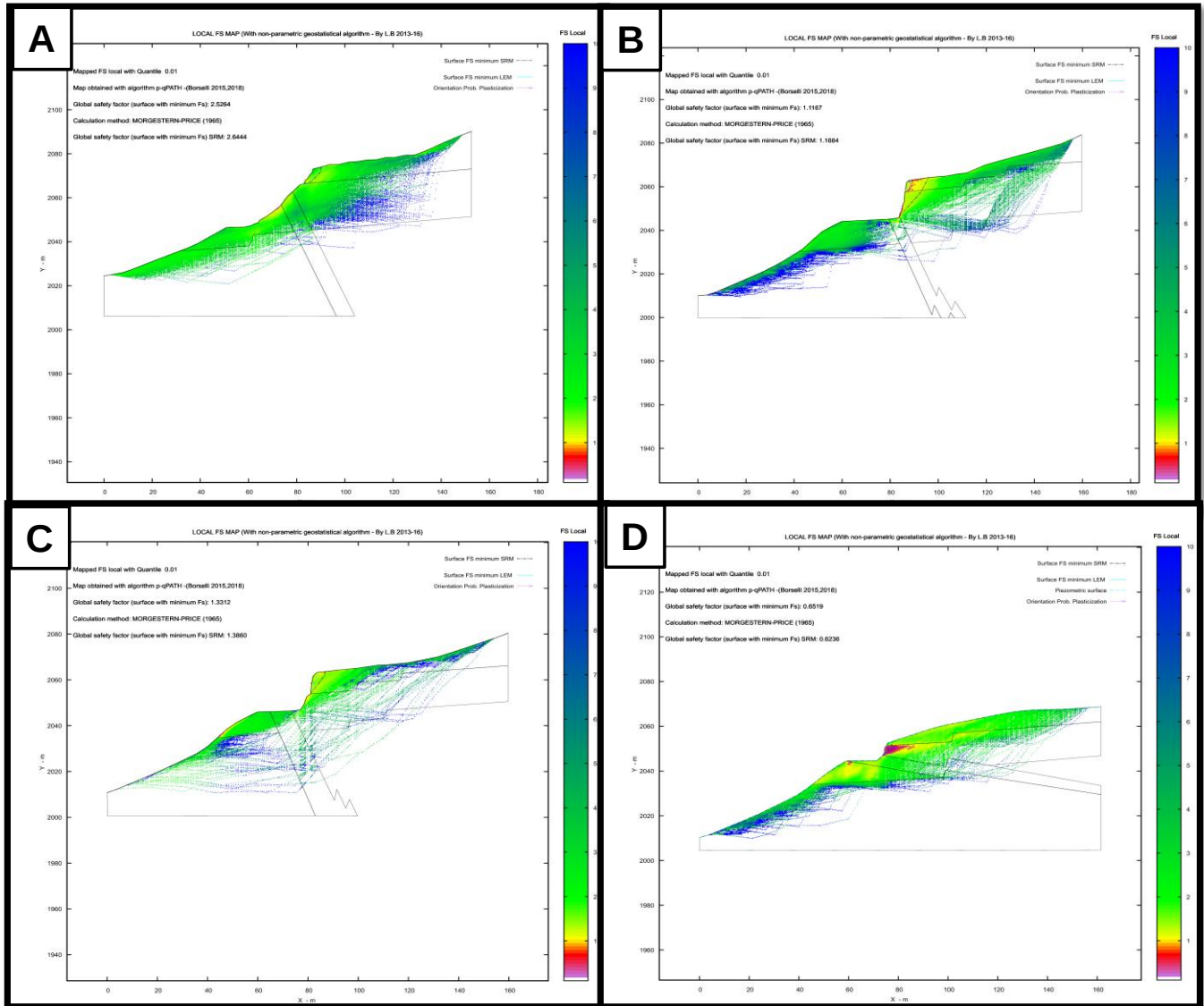
Anexo 8.- Sección G-G' geológico-estructural, exhibiendo fracturamiento asociado a las fallas normales que deforman la riolita San Miguelito y al dique de vidrio volcánico, además en esta porción se intensifica el fracturamiento en la parte del flujo suprior de la riolita San Miguelito y disminuye considerablemente las fracturas rellenas de sílice.



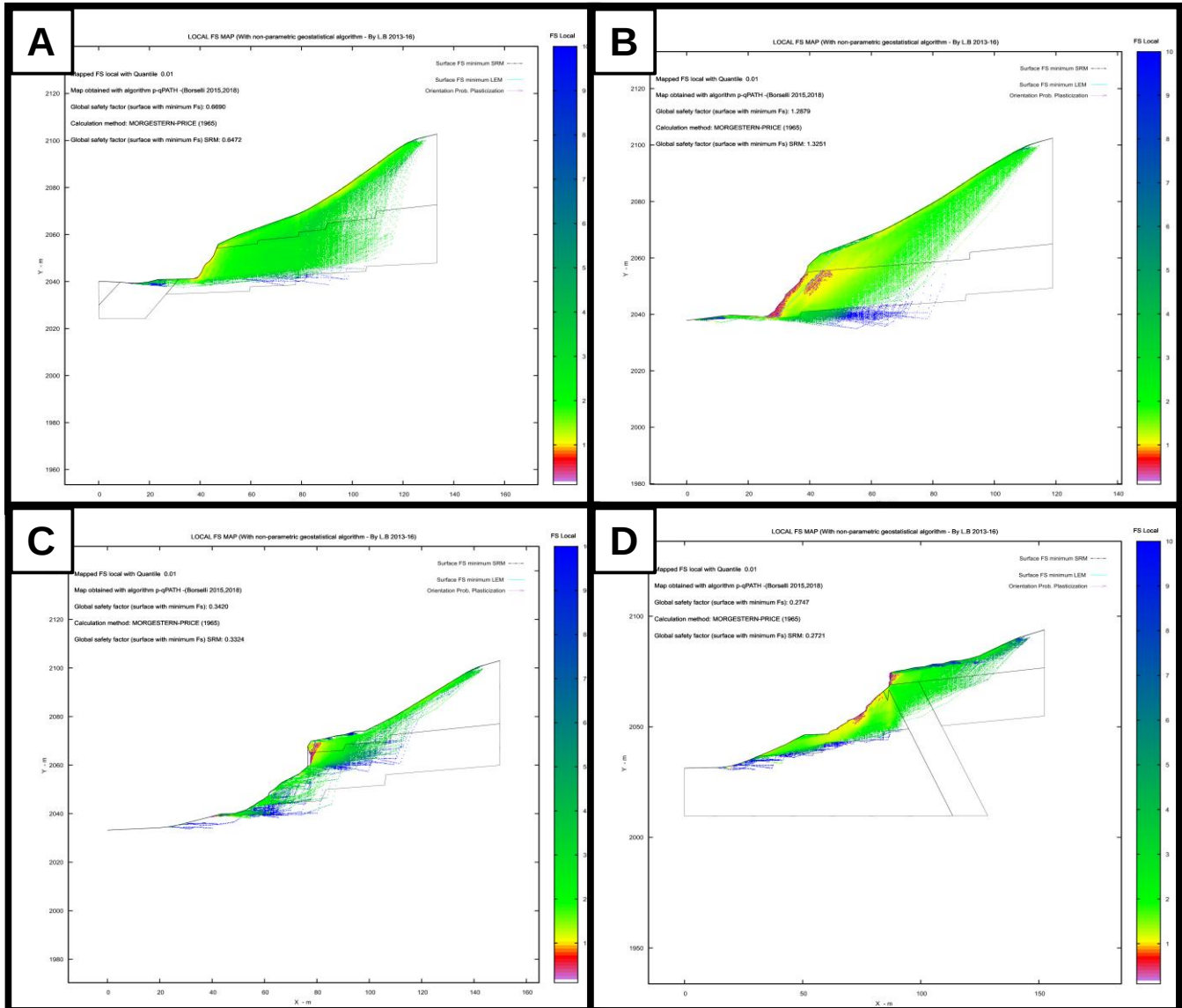
Anexo 9.- Sección H-H' geológico-estructural, mostrando un fracturamiento moderado y mas distribuido entre todas las facies eruptivas del la riolita San Miguelito además de estar el dique de vidrio volcánico en la carreta y aun la influencia de la zona de fallas afectando a toda la unidad riolita San Miguelito.



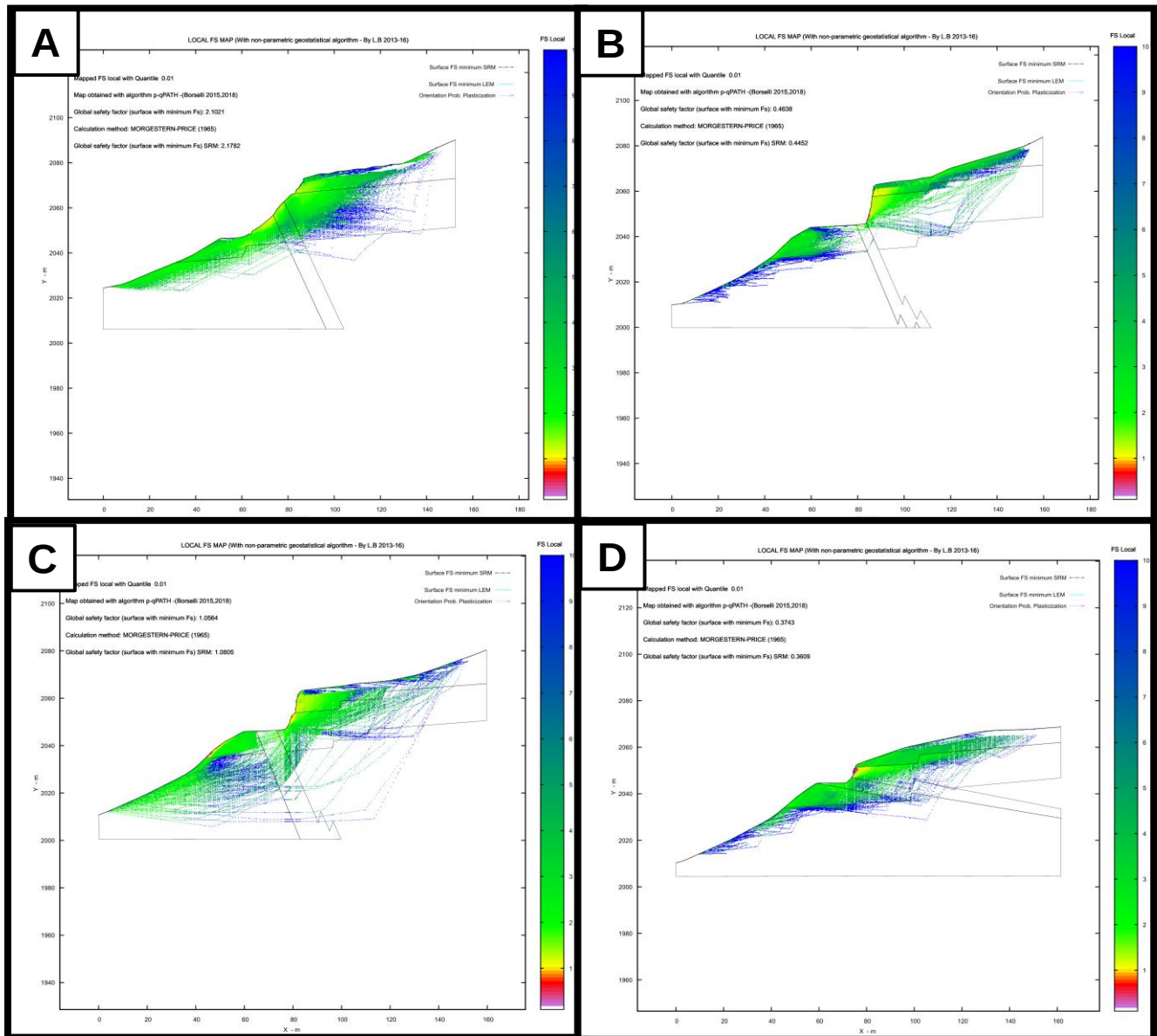
Anexo 10. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el *software* SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones estáticas; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 1.5365, tiene buena estabilidad en este sector del talud; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior del talud y tiene de Fs mínimo de 1.2846 que son condiciones de estabilización pero hay que considerar el movimiento interno que se esta calculando; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad en esta porción del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye mucho para su inestabilidad, lo que está generando una caída de bloques continuo en este sector el rango Fs es de 0.4461; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad local alta el Fs mínimo es de 0.1788 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud lo cual es un peligro constante para los automovilistas y transportistas que recorren la carretera federal libre San Luis Potosí-Guadalajara.



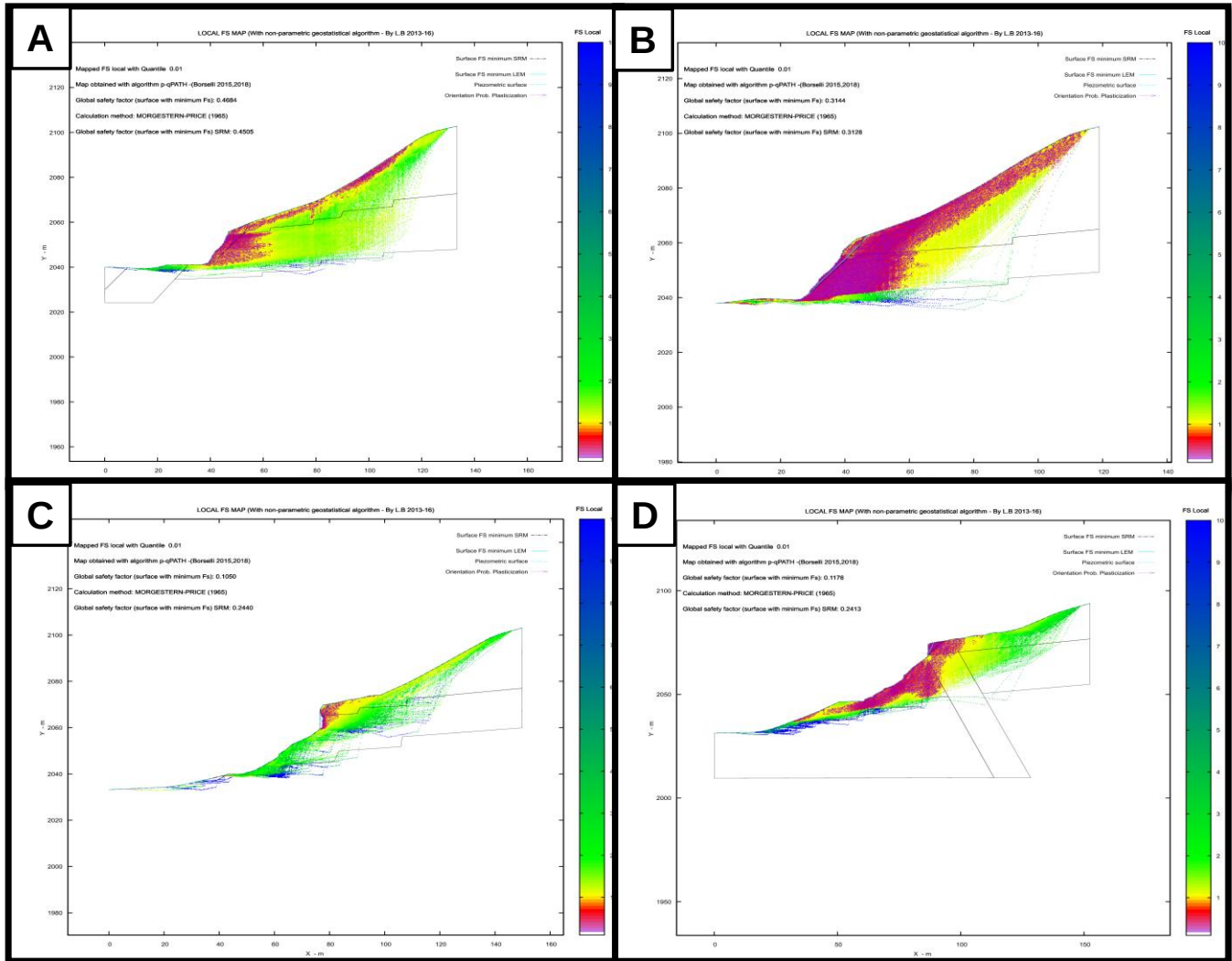
Anexo 11. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones estáticas; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 2.5264, tiene buena estabilidad en este sector del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad en la base del talud a la orilla de la carretera en la parte superior muestra que tiene tracción dinámica activa en el interior del talud por lo que se analiza que se está desprendiendo pequeños guijarros en la base y en la cima hay peligro que empiece a ocurrir desprendimiento y caída de bloques el Fs mínimo es de 1.1167; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de estabilidad en esta parte del talud con Fs mínimo de 1.3312; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local alta el Fs mínimo es de 0.6519 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud lo cual es un peligro constante para los automovilistas y transportistas que recorren la carretera federal libre San Luis Potosí-Guadalajara esta parte del talud al extremo oriental es de las más próximas a la carretera.



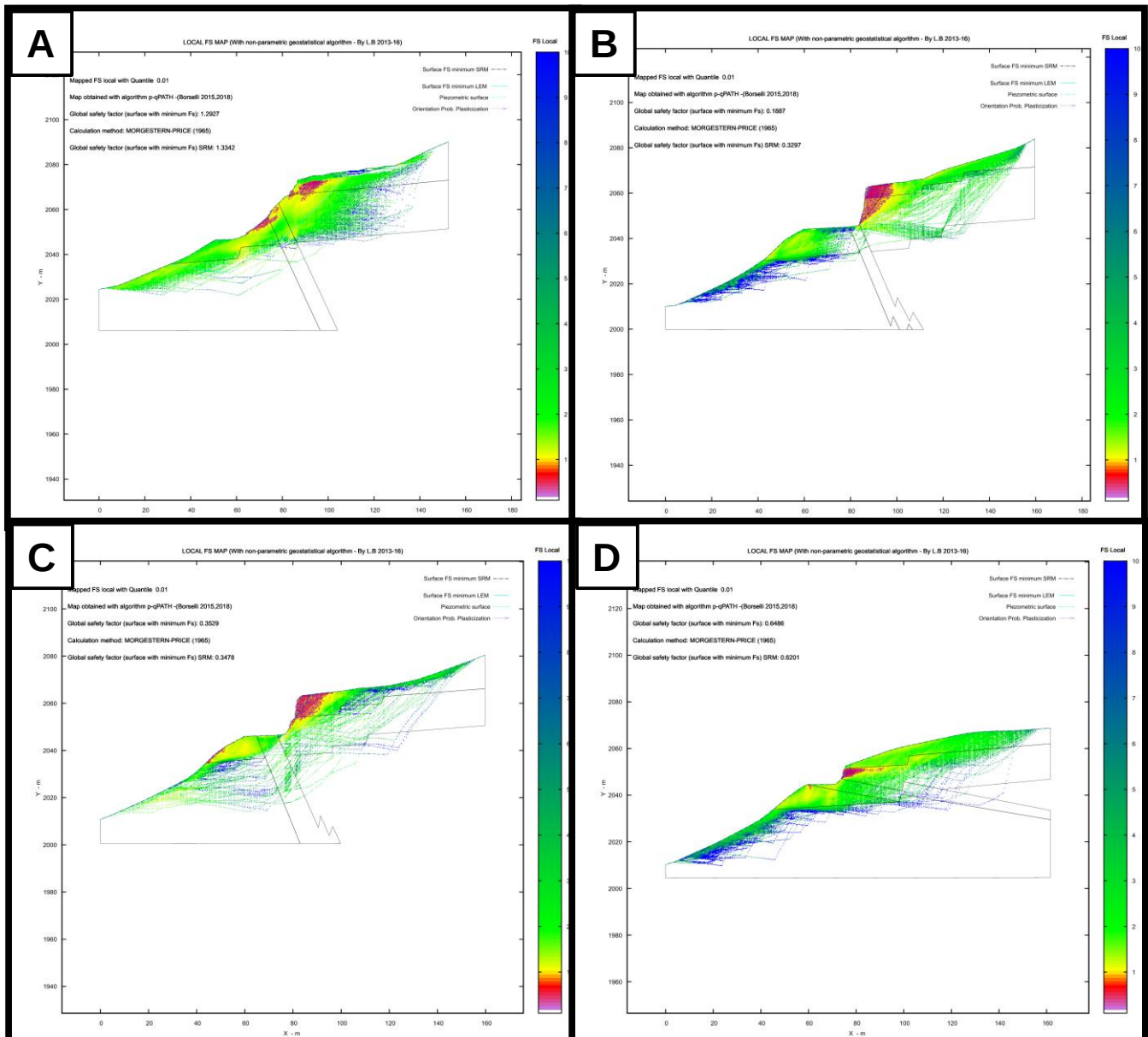
Anexo 12. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones estáticas con *tension cracks*; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 0.6690, tiene buena estabilidad global en este sector del talud el resultado mínimo de factor de seguridad es por la parte frontal externa del talud que considera los caídos de rocas pequeñas y deslizamientos de las zonas arenosas de la brecha volcánica; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior del talud más definidas y también define la zona de caídas de bloques pequeños y medianos; tiene un Fs mínimo de 1.2879 que son condiciones de estabilización pero hay que considerar el movimiento interno que se está calculando en ambos análisis; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad en esta porción del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo que está generando una caída de bloques continuo en este sector el rango Fs es de 0.3420 que es un rango aún más bajo que las condiciones estáticas y define la zona del corte para posible deslizamiento y caída en masa de todo el bloque superior de esta porción del talud; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad Fs mínimo es de 0.2747 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud lo cual es un peligro constante para los automovilistas y transportistas que recorren la carretera federal libre San Luis Potosí-Guadalajara con este análisis de tension crack se define mejor las zonas de peligro y además muestran en la parte media de la lareda en la parte interna tracción dinámica activa lo que sigue provocando pequeños deslizamientos y que a pie de carretera tengamos arenas y fragmentos provenientes del talud.



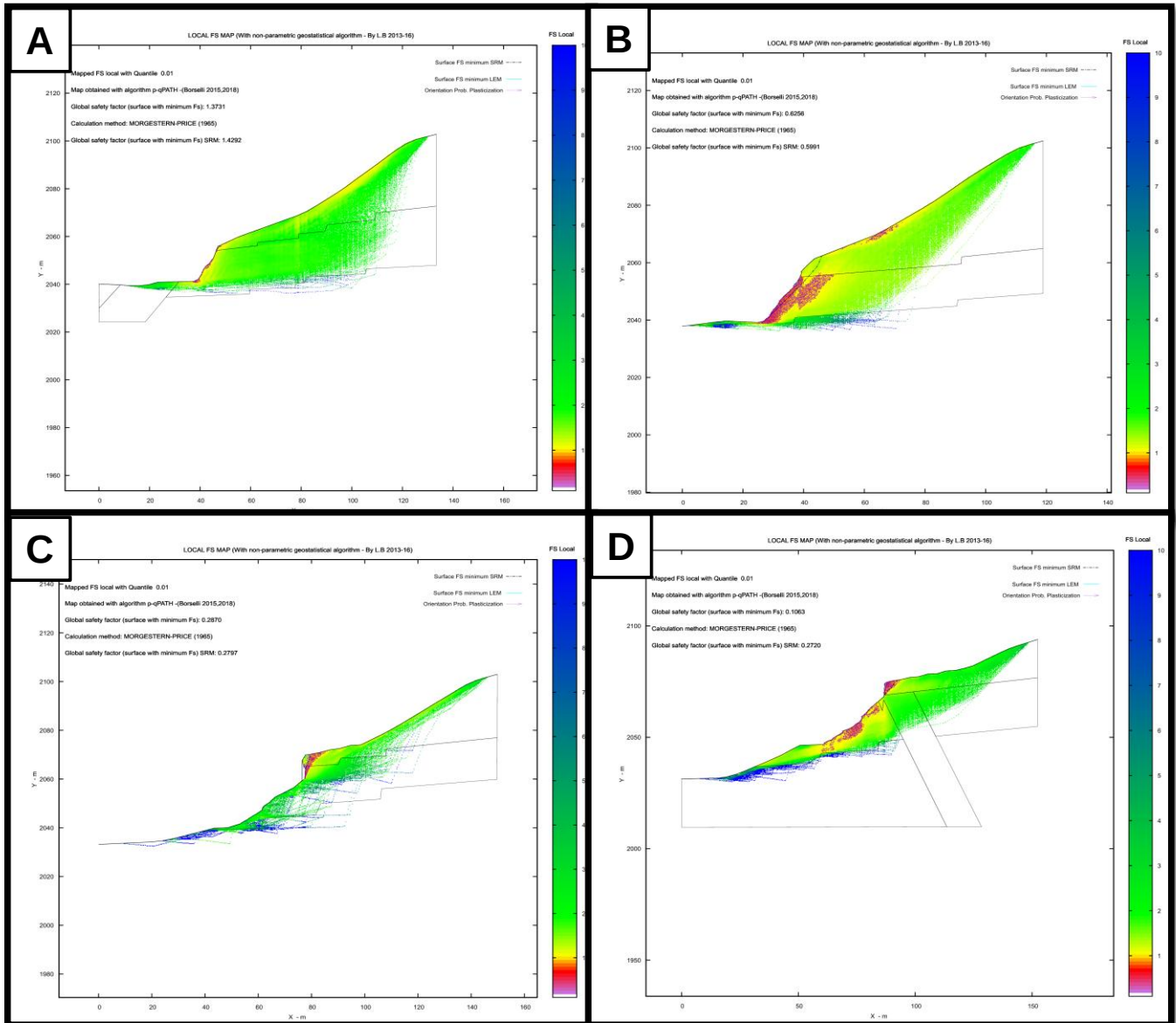
Anexo 13. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones estáticas *tension cracks*; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 2.1021, tiene buena estabilidad en este sector del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad localmente, en la base del talud a la orilla de la carretera en la parte superior el Fs mínimo es de 0.4638 deslizamientos de fragmentos de la brecha volcánica; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de estabilidad en esta parte del talud con Fs mínimo de 1.0584 indicando caída de bloques al arroyo Escalerillas; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local el Fs mínimo es de 0.3743 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud.



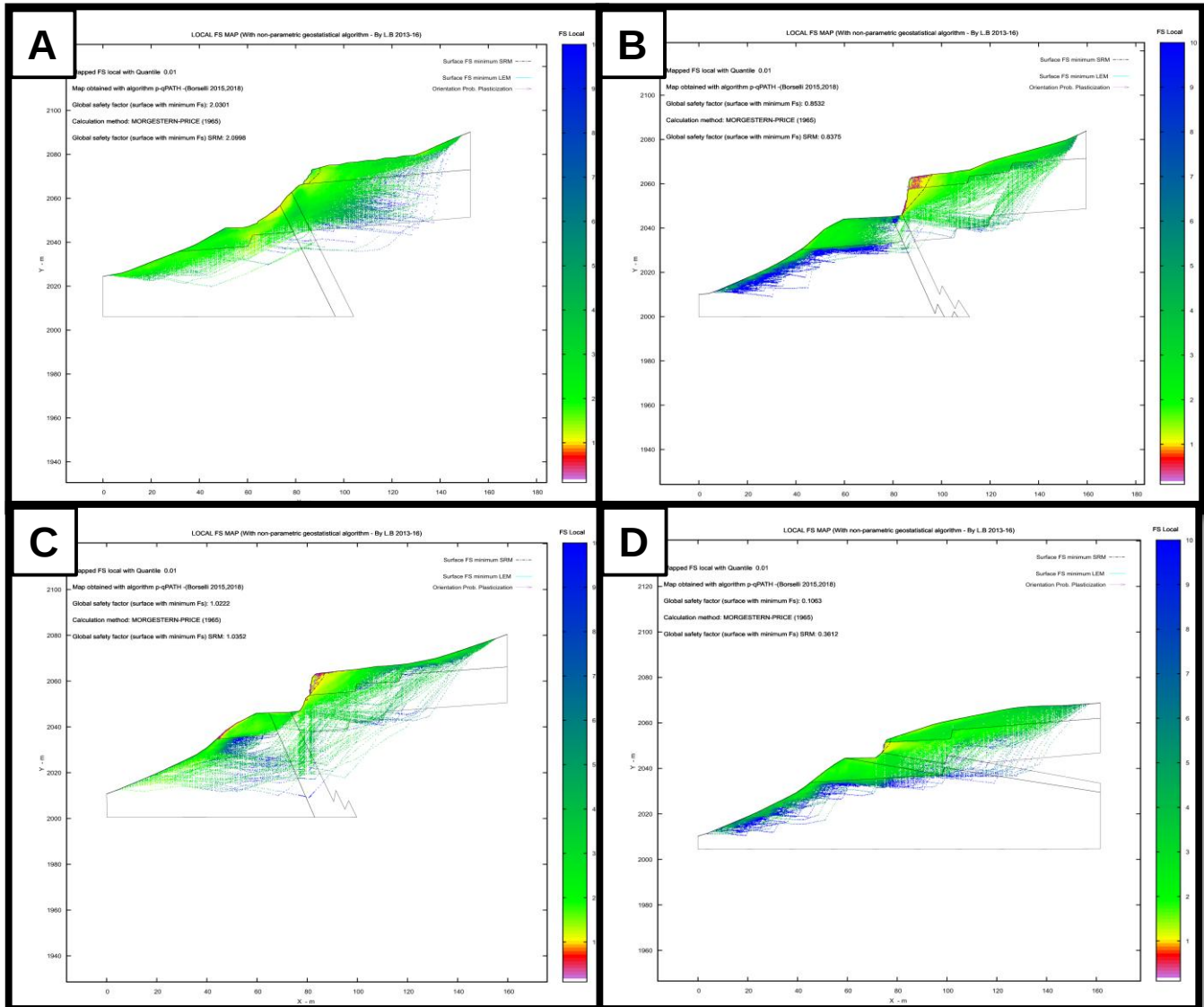
Anexo 14. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones saturadas; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de inestabilidad del talud un Fs mínimo 0.4684, cambia la estabilidad en la zona por inestabilidad y prácticamente el 90% de la superficie se vuelve inestable y todo el frente del talud; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior de todo el talud altamente inestable crítica y un gran peligro para la infraestructura de la carretera y de la presa el Fs es 0.3144; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad la porción alta del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo generaría una caída de bloques continuo en masa en este sector el Fs es de 0.1050 condiciones críticas para el talud y la seguridad de la zona; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad crítica Fs mínimo es de 0.1176 aquí el movimiento tanto interno del talud como externo es generalizada en esta condición por lo cual si se requiere intervención de estabilización de taludes inmediata para no generar mayor peligro en la zona.



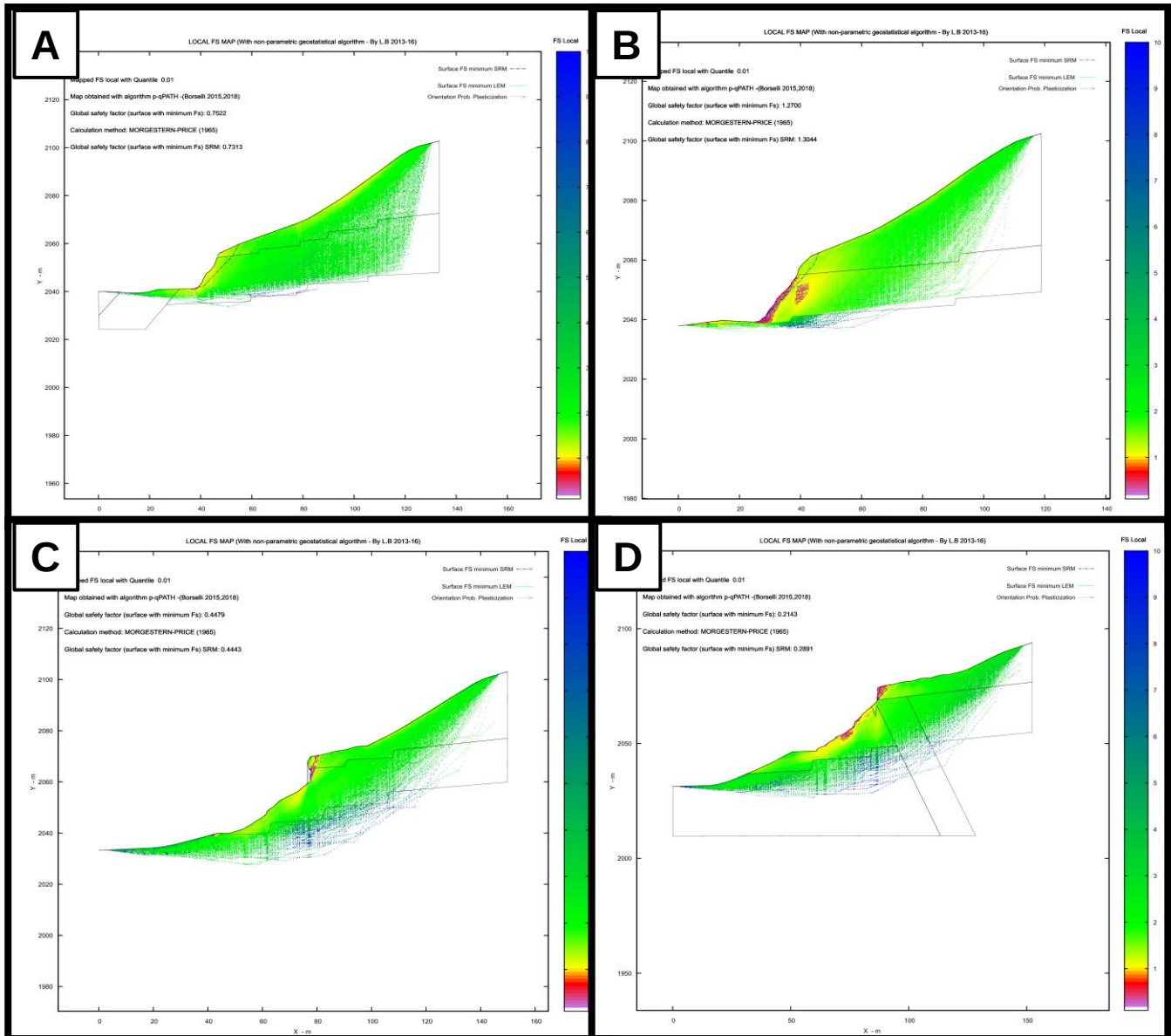
Anexo 15. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones saturadas; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones inestables internas y en la lareda del talud tiene un Fs mínimo 1.2927, baja considerablemente la estabilidad del talud en esta condición y hay que tomar en cuenta la tracción dinámica que está ocurriendo dentro del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad, la parte frontal del talud, tiene el Fs mínimo es de 0.1887 prácticamente en esta condición todo el frente del talud tiene inestabilidad crítica y con movimientos internos en el talud; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de inestabilidad en la parte inferior del talud con Fs mínimo de 0.3529 indicando caída de bloques al arroyo Escalerillas; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local, el Fs mínimo es de 0.6486 lo que indica que bajo estas condiciones tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud y tracción dinámica en el interior del talud en ese punto.



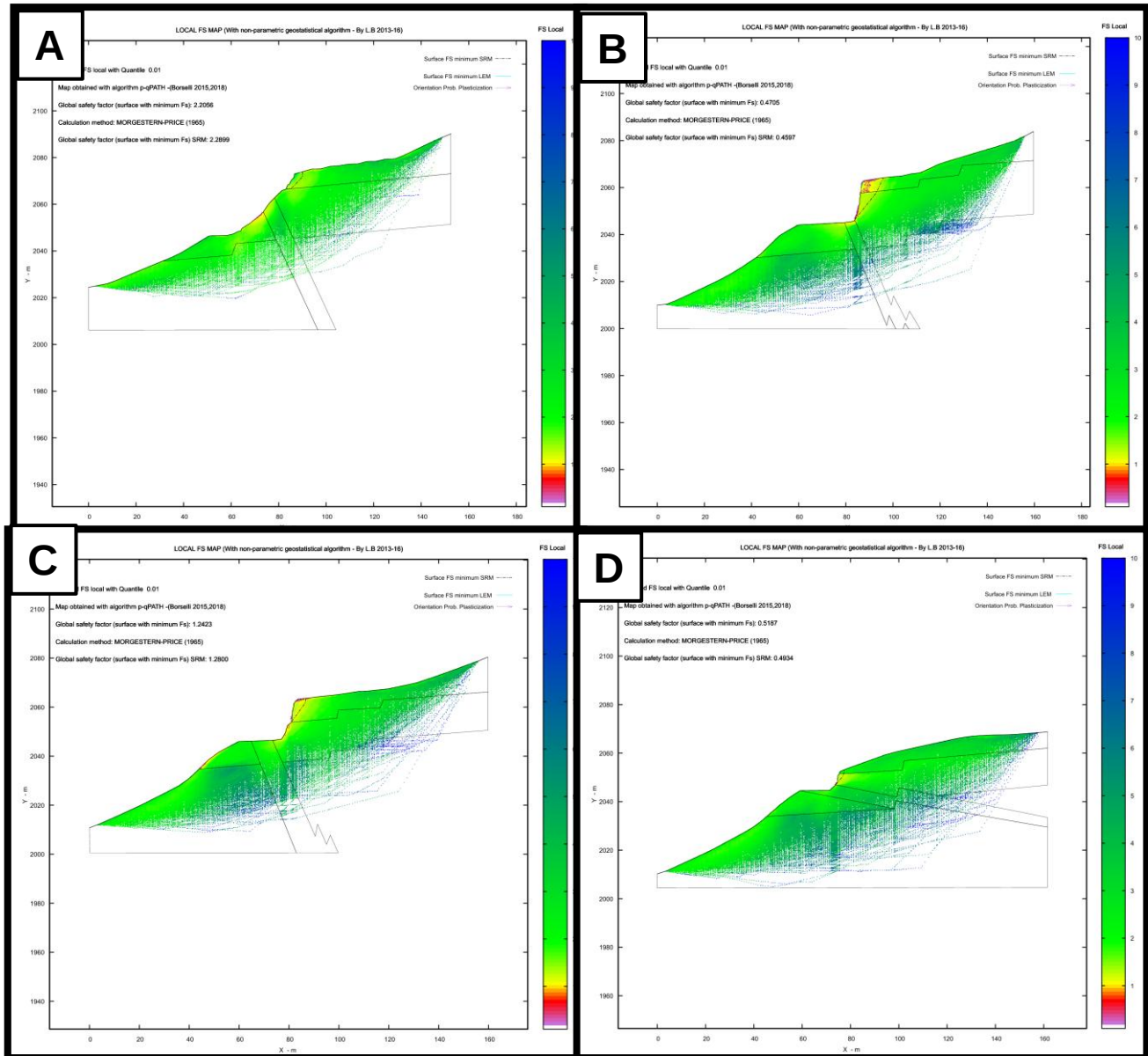
Anexo 16. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones sísmicas; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 1.3731; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior de todo el talud y un peligro para la infraestructura de la carretera, el Fs es 0.6256; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad la porción alta del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo generaría una caída de bloques continuo en masa en este sector el Fs es de 0.1050 condiciones críticas para el talud y la seguridad de la zona; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad critica Fs mínimo es de 0.2870 aquí el movimiento tanto interno del talud como externo es de caída de bloques y cortante deslizando lo cual promueve un potencial de deslizamiento de una gran masa de rocas.



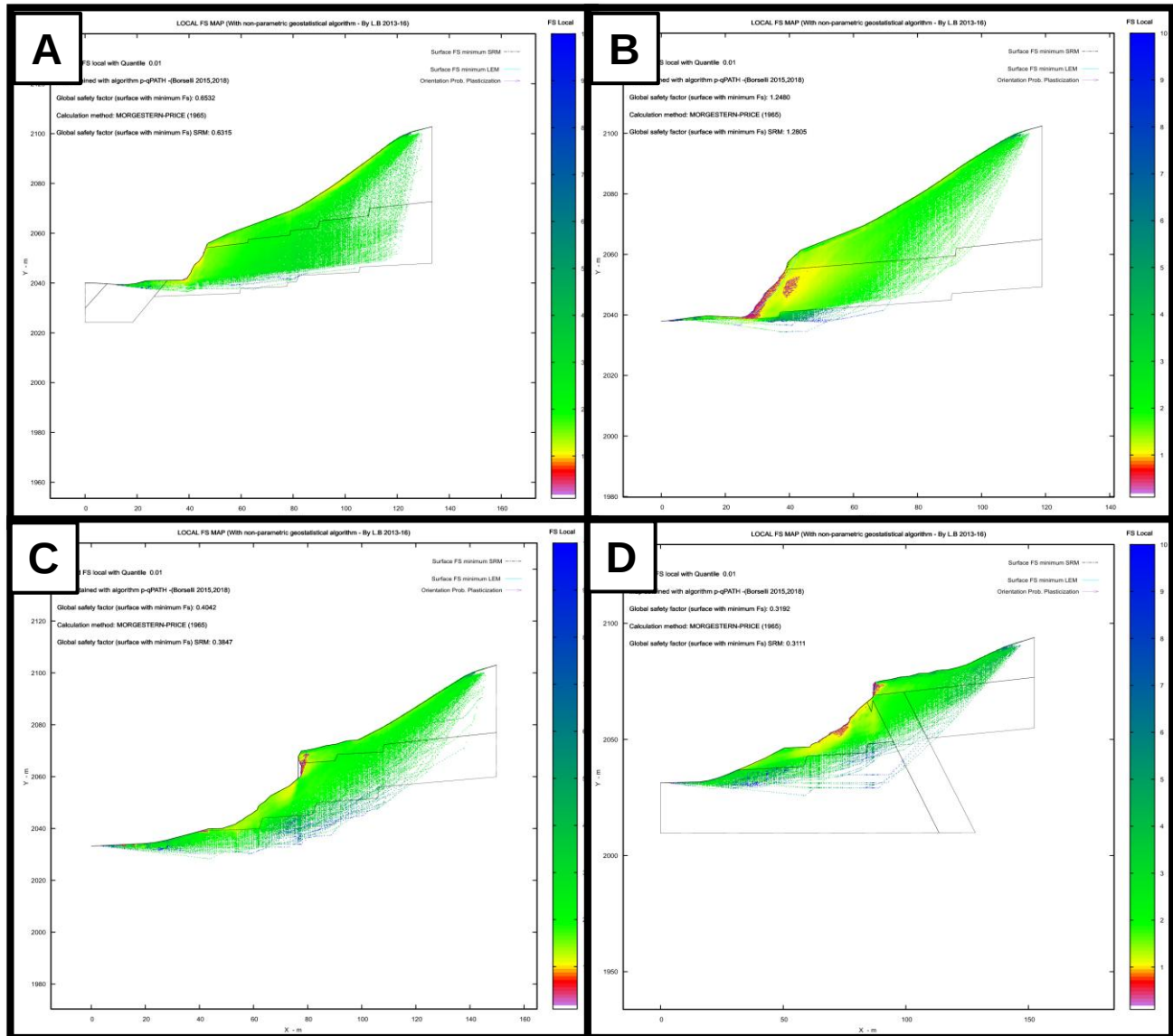
Anexo 17. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *sniff random search* en condiciones sísmicas; A) Sección E-E' bajo estas condiciones se muestra esta porción del talud estable con Fs 2.0301; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad, la parte alta del talud, tiene el Fs mínimo es de 0.8532 lo que estaría generando caída de bloques bajo esta condición; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de inestabilidad en la parte inferior y superior del talud con Fs mínimo de 1.0222 indicando caída de bloques al arroyo Escalerillas y a la carretera bajo esta condición y de manera global permanecería estable el resto del talud; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local, el Fs mínimo es de 0.1063 lo que indica que bajo estas condiciones tiene estabilidad global el talud y el indicador mínimo de factor de seguridad se refiere a bloques o fragmentos que están en la lareda del talud con pendientes superior a los 60° lo cual con el movimiento sísmico y la gravedad provocaría su caída con afectación en el talud de forma local.



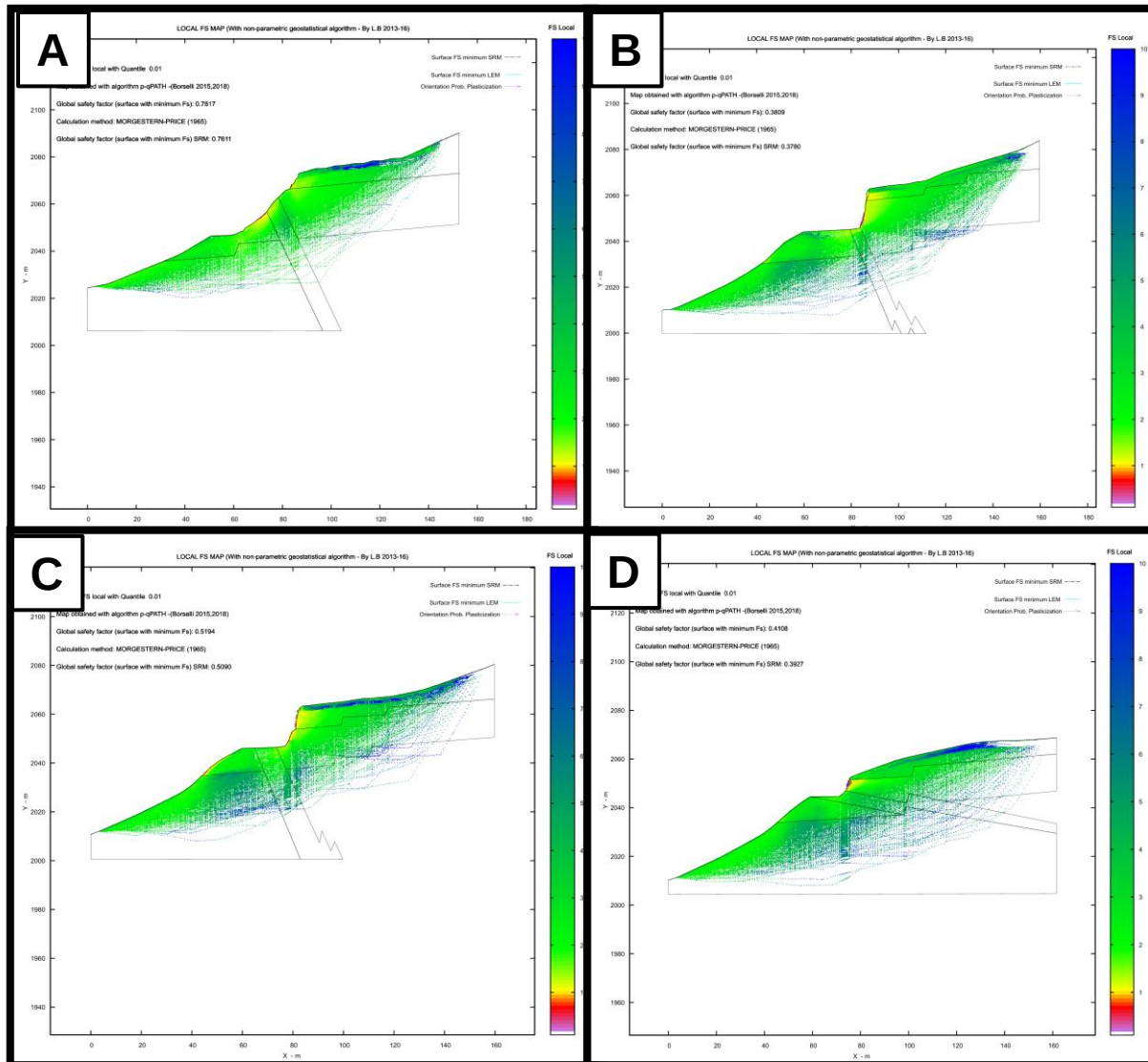
Anexo 18. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones estáticas; A) Sección A-A' nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 0.7313, generando un removimiento de material en la base del talud junto a la carretera y de forma global el talud tiene buena estabilidad en este sector; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior del talud y tiene de Fs mínimo de 1.2700 que son condiciones de estabilización pero hay que considerar el movimiento interno que se está calculando; y la caída de bloques y deslizamientos de la brecha volcánica; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad local en la parte superior del talud con un efecto cortante para un desprendimiento de bloque que no tiene base y solo se detiene de la pared, el Fs es de 0.4479; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad local alta el Fs mínimo es de 0.2143 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud lo cual es un peligro constante para los automovilistas y transportistas que recorren la carretera federal libre San Luis Potosí-Guadalajara.



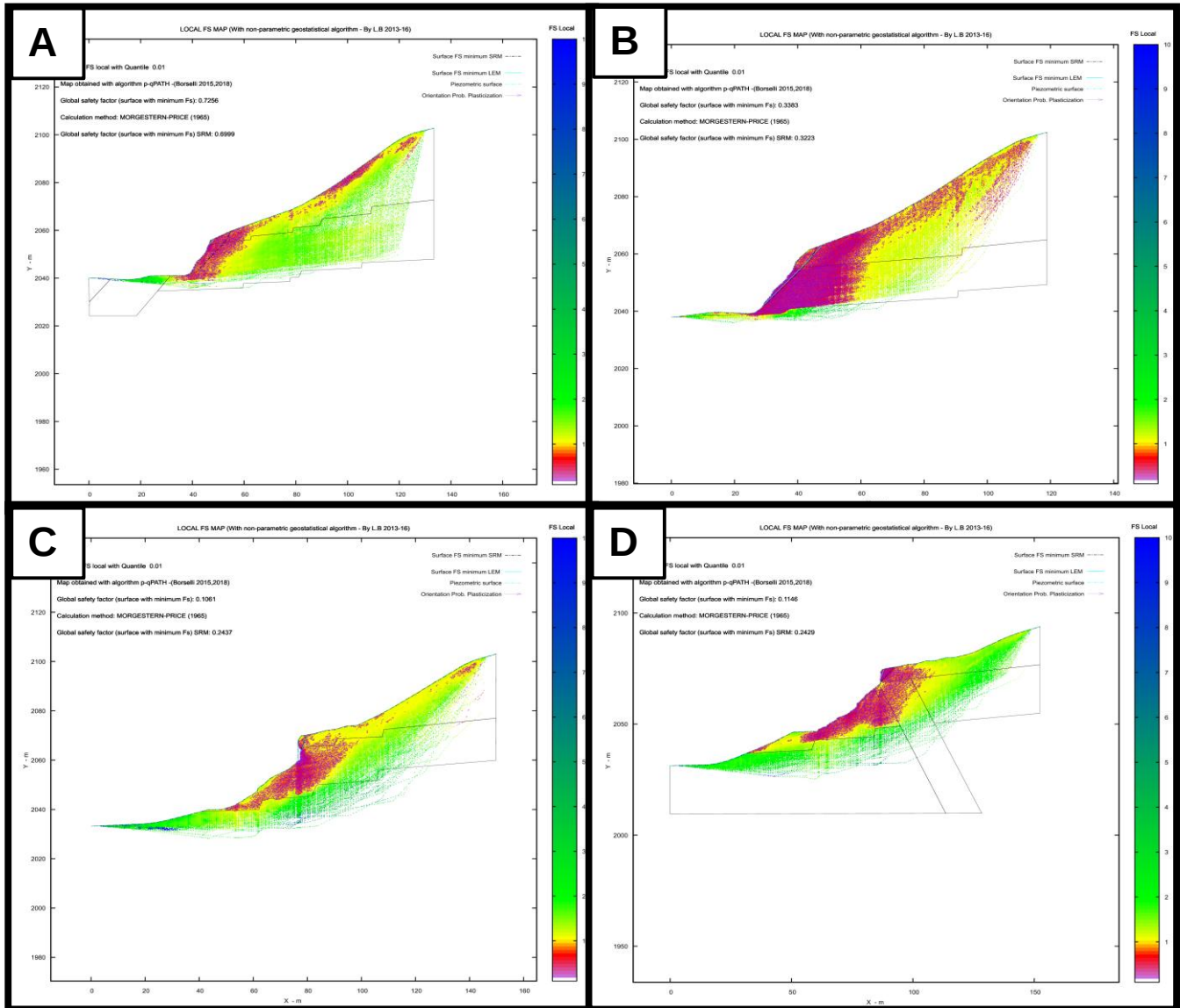
Anexo 19. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones estáticas; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 2.2056, tiene buena estabilidad en este sector del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad en la base del talud a la orilla de la carretera en la parte superior muestra que tiene tracción dinámica activa en el interior del talud por lo que se analiza que se está desprendiendo pequeños guijarros en la base y en la cima hay peligro que empiece a ocurrir desprendimiento y caída de bloques el Fs mínimo es de 0.4705; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de estabilidad en esta parte del talud con Fs mínimo de 1.2423, localmente en la parte superficial el modelo indica que hay peligro de caída de bloques; D) Sección H-H' esta sección bajo este análisis las condiciones son muy estables de forma global y local solo tendría caída de bloques y pequeños deslizamientos en la pared del talud el Fs mínimo es de 0.5187.



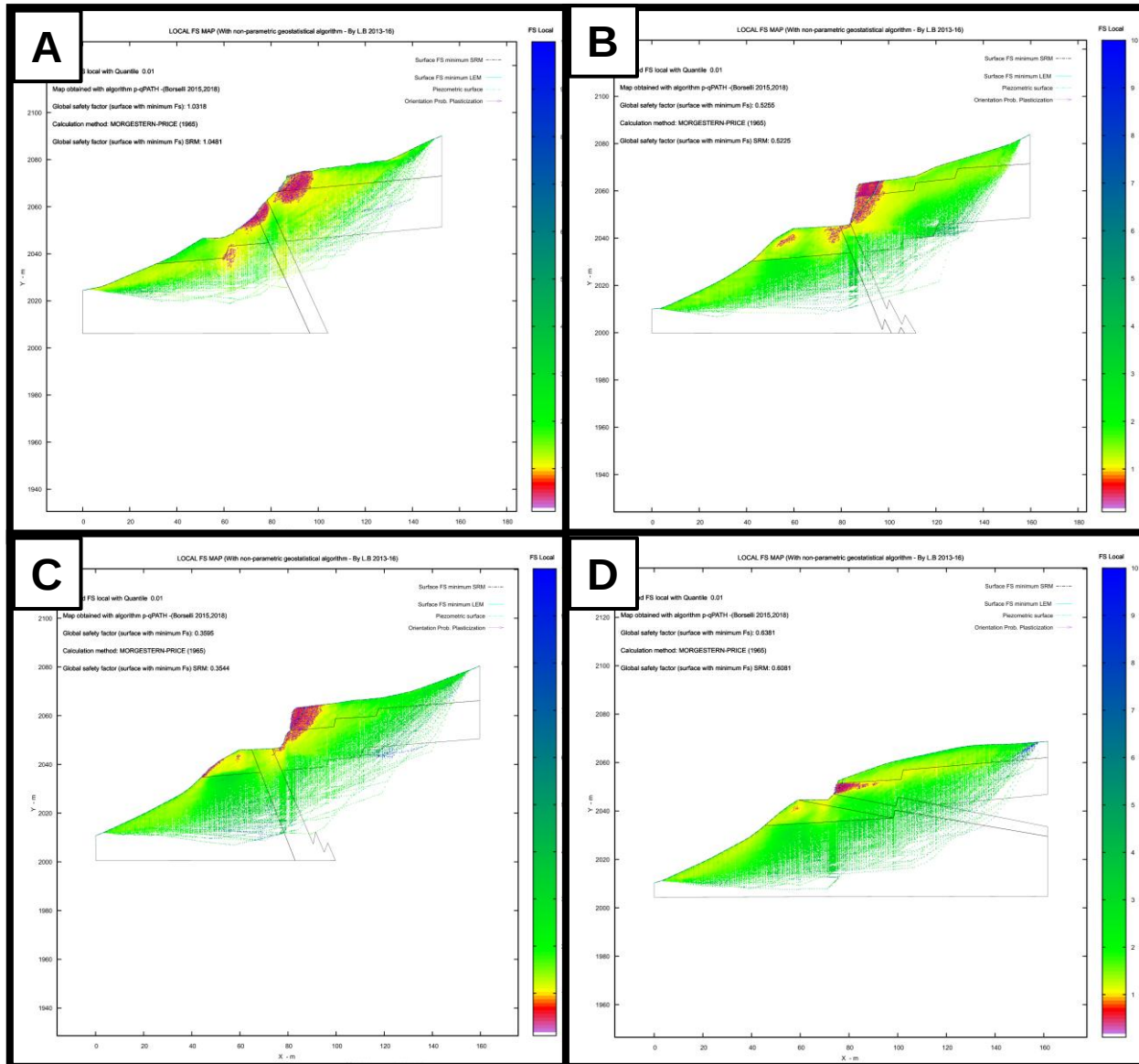
Anexo 20. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones estáticas con *tension cracks*; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 0.6532, tiene buena estabilidad global en este sector del talud el resultado mínimo de factor de seguridad es por la parte frontal externa del talud que considera los caídos de rocas pequeñas y deslizamientos de las zonas arenosas de la brecha volcánica; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior del talud más definidas y también define la zona de caídas de bloques pequeños y medianos; tiene un Fs mínimo de 1.2480 que son condiciones de estabilización pero hay que considerar el movimiento interno que se está calculando en ambos análisis; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad en esta porción del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo que está generando una caída de bloques continuo en este sector el rango Fs es de 0.4042 que es un rango aún más bajo que las condiciones estáticas y define la zona del corte para posible deslizamiento y caída en masa de todo el bloque superior de esta porción del talud; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad Fs mínimo es de 0.3192 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud lo cual es un peligro constante para los automovilistas y transportistas que recorren la carretera federal libre San Luis Potosí-Guadalajara con este análisis de *tension crack* se define mejor las zonas de peligro y además muestran en la parte media de la lareda en la parte interna tracción dinámica activa lo que sigue provocando pequeños deslizamientos y que a pie de carretera tengamos arenas y fragmentos provenientes del talud.



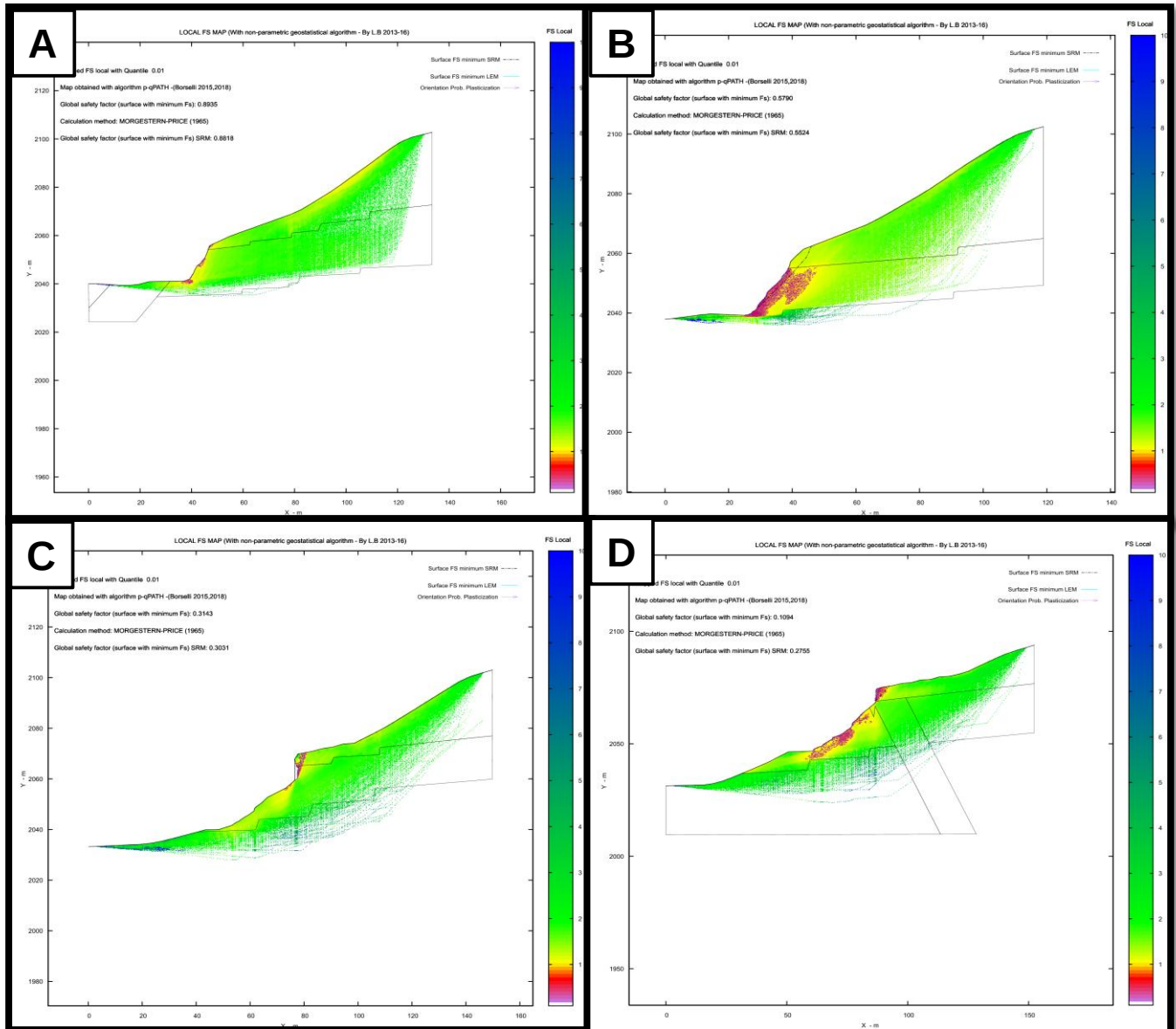
Anexo 21. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgentern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones estáticas *tension cracks*; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 0.7817, tiene buena estabilidad en este sector del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad localmente, en la base del talud a la orilla de la carretera en la parte superior el Fs mínimo es de 0.3780 deslizamientos de fragmentos de la brecha volcánica; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de estabilidad en esta parte del talud con Fs mínimo de 0.05194 indicando caída de bloques a la carretera a diferencia con el análisis anterior de *sniff random search*; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local el Fs mínimo es de 0.4108 lo que indica que tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud.



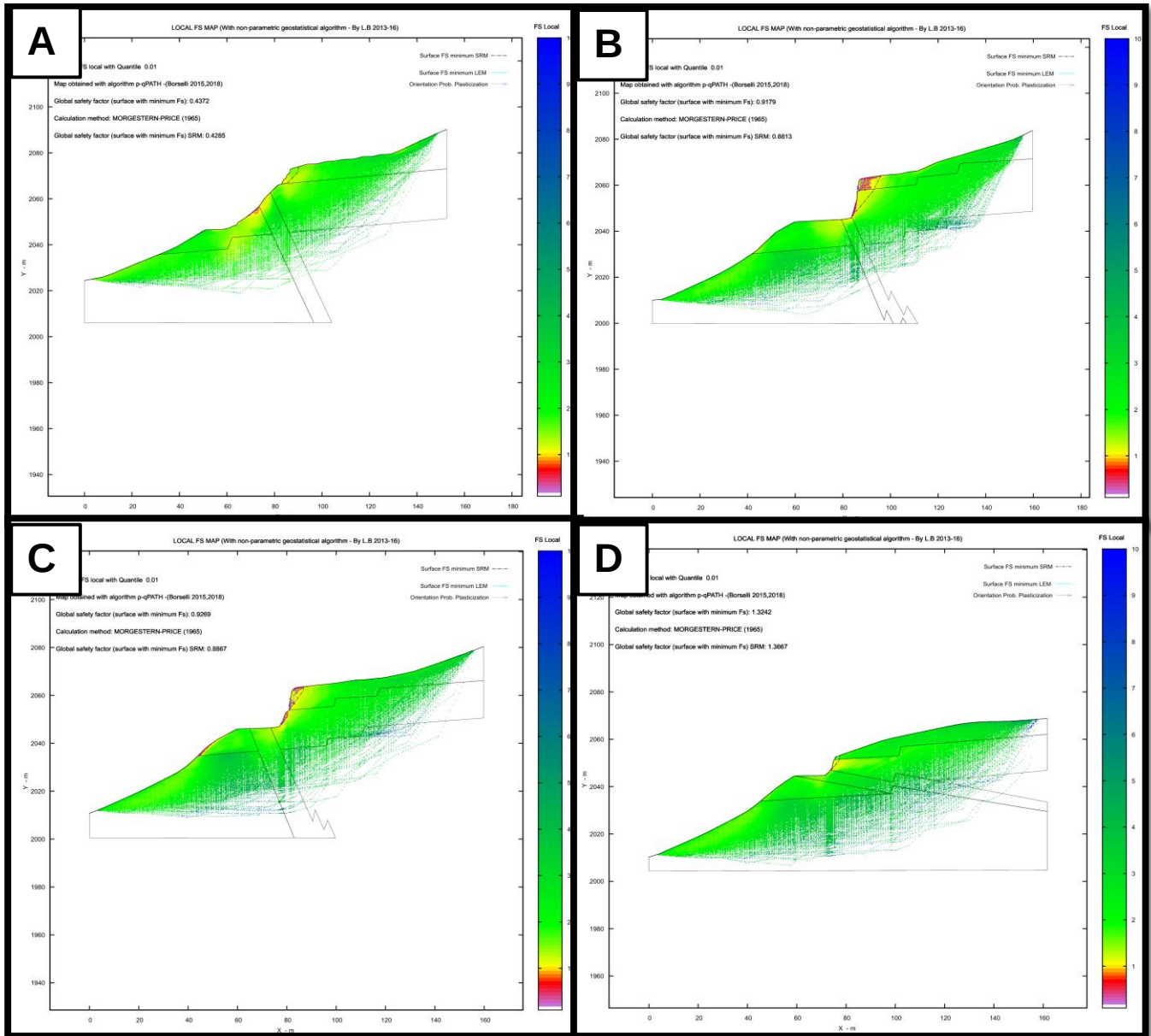
Anexo 22. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones saturadas; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de inestabilidad del talud un Fs mínimo 0.7256, cambia en la zona por inestabilidad y prácticamente el 80% de la superficie es inestable todo el frente del talud; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior de todo el talud altamente inestable crítica, el Fs es 0.7256; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad la porción alta del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo generaría una caída de bloques continuo en masa en este sector el Fs es de 0.1061 adicional a esto, también hay tracción dinámica activa bajo estas condiciones y genera peligro para la infraestructura carretera y de la presa; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad crítica Fs mínimo es de 0.1146 aquí el movimiento tanto interno del talud como externo es generalizada en esta condición por lo cual si se requiere intervención de estabilización de taludes inmediata para no generar mayor peligro en la zona.



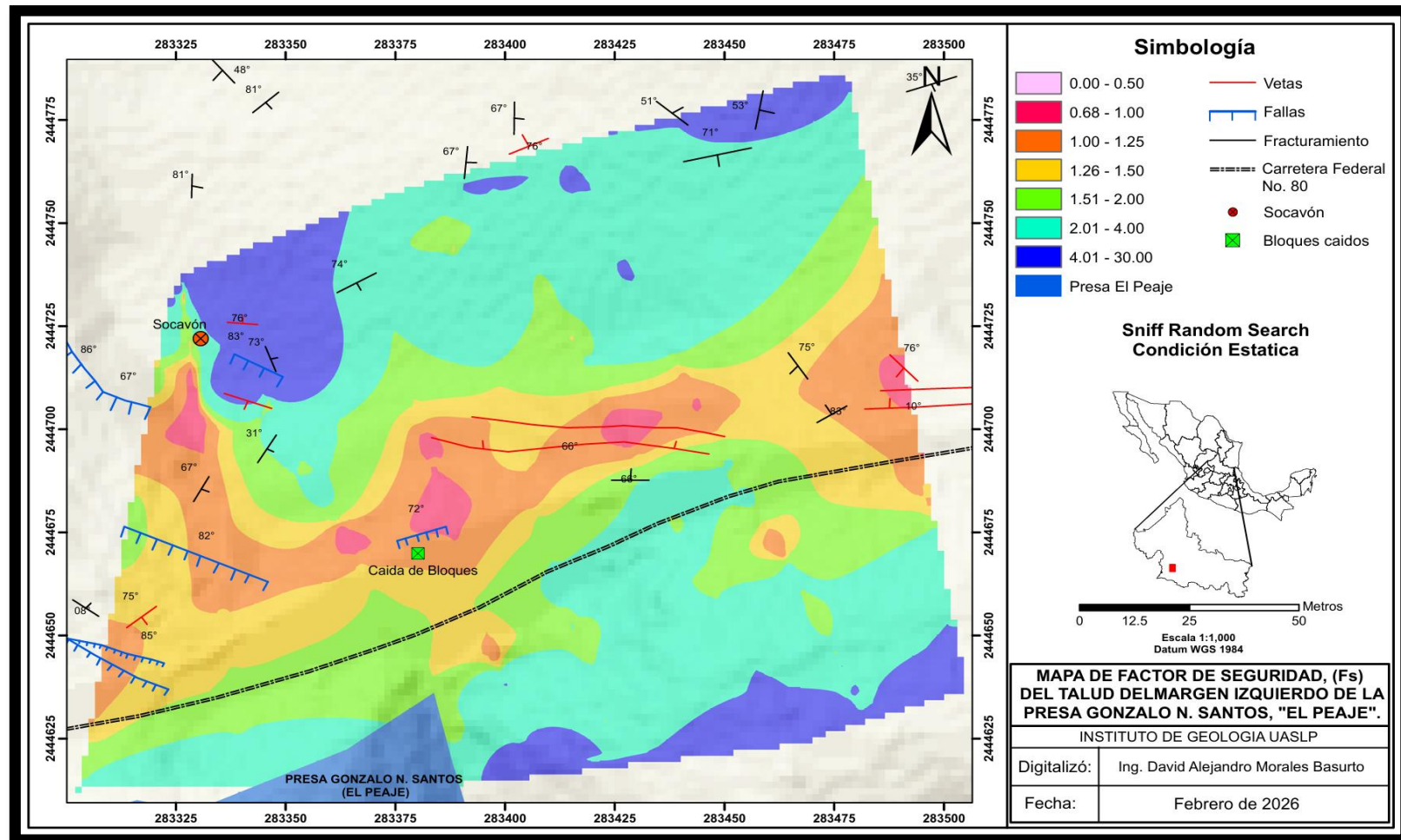
Anexo 23. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el *software* SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones saturadas; A) Sección E-E' que nos muestra bajo estas condiciones inestables internas y en la lareda del talud tiene un Fs mínimo 1.0318, baja considerablemente la estabilidad del talud en esta condición y hay que tomar en cuenta la tracción dinámica que está ocurriendo dentro del talud; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad, la parte frontal del talud, tiene el Fs mínimo es de 0.5255 prácticamente en esta condición todo el frente del talud tiene inestabilidad crítica y con movimientos internos en el talud; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de inestabilidad en la parte inferior del talud con Fs mínimo de 0.3595 indicando caída de bloques al arroyo Escalerillas; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local, el Fs mínimo es de 0.6381 lo que indica que bajo estas condiciones tiene caída de bloques y deslizamientos activo en la parte frontal del talud y tracción dinámica en el interior del talud en ese punto.



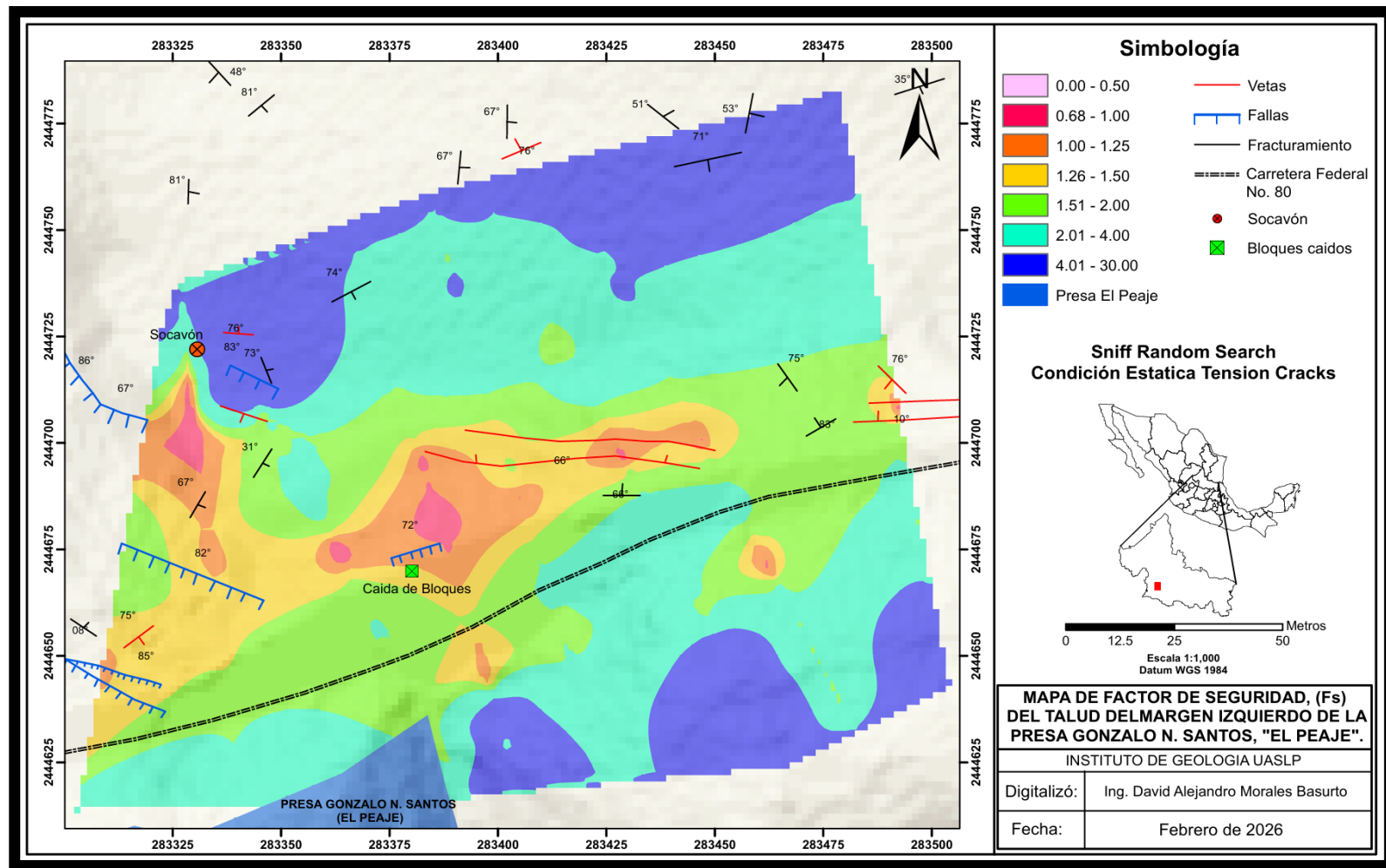
Anexo 24. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el *software* SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones sísmicas; A) Sección A-A' que nos muestra bajo estas condiciones de estabilidad del talud un Fs mínimo 0.8935; B) Sección B-B' que muestra condiciones de tracción dinámica activa en el interior de todo el talud y un peligro para la infraestructura de la carretera, el Fs es 0.5790; C) Sección C-C' que nos muestra condiciones de inestabilidad la porción alta del talud, ya que en esta zona el talud esta con pendiente de casi 90° y eso influye para su inestabilidad, lo generaría una caída de bloques continuo en masa en este sector el Fs es de 0.3143 condiciones críticas para el talud y la seguridad de la zona; D) Sección D-D' esta sección también tiene inestabilidad crítica Fs mínimo es de 0.1094 aquí el movimiento tanto interno del talud como externo es de caída de bloques y cortante deslizando lo cual promueve un potencial de deslizamiento de una gran masa de rocas.



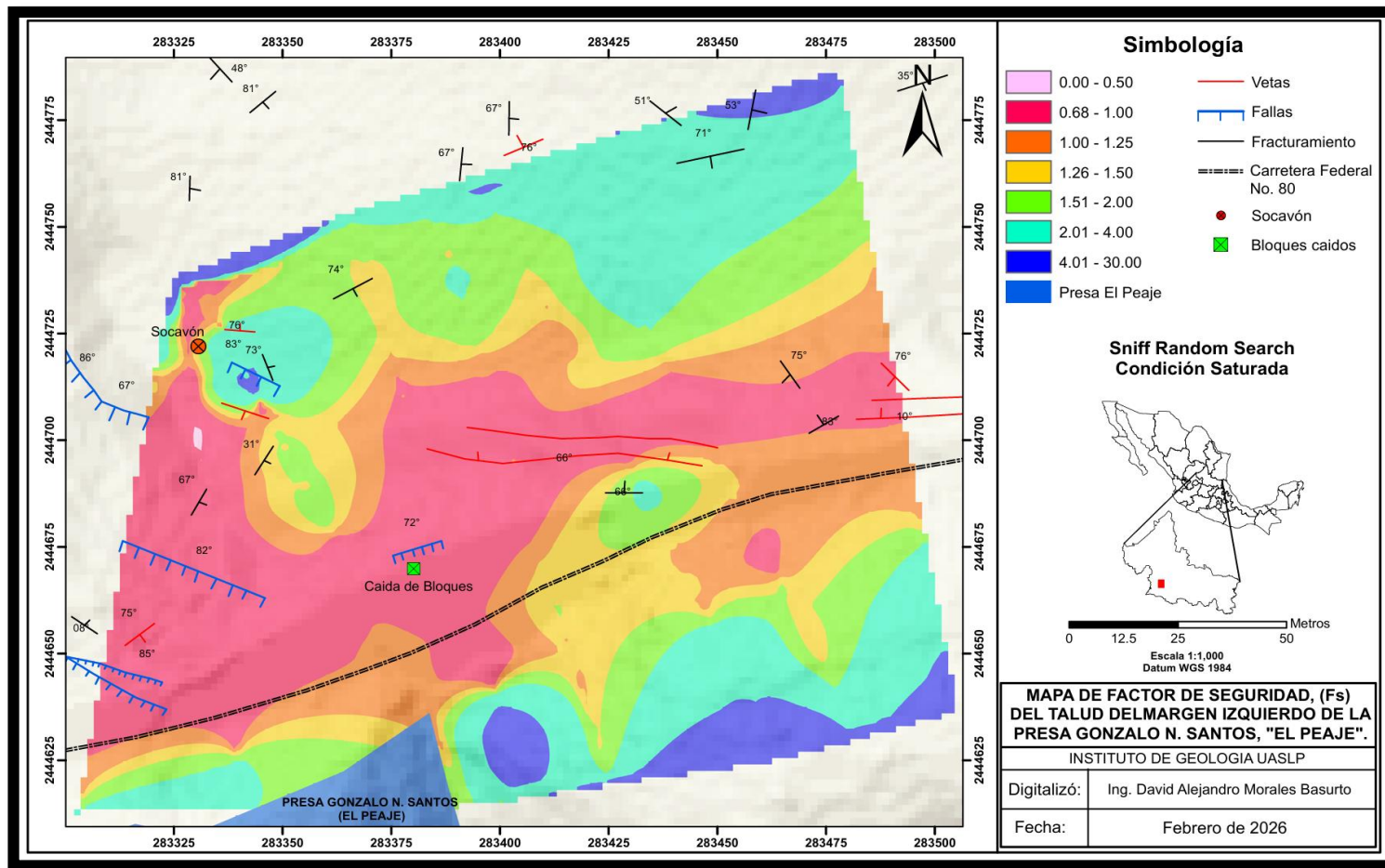
Anexo 25. Secciones de factor de seguridad (Fs) del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos; creados con el software SSAP v. 6.1.c (Borselli, 2026), calculado con el método Morgestern y Price, (1965), analizado con *mixed engines search* en condiciones sísmicas; A) Sección E-E' bajo estas condiciones se muestra esta porción del talud estable con Fs 0.4372; B) Sección F-F' que muestra condiciones de inestabilidad, la parte alta del talud, tiene el Fs mínimo es de 0.9179 lo que estaría generando caída de bloques bajo esta condición; C) Sección G-G' que nos muestra condiciones de inestabilidad en la parte inferior y superior del talud con Fs mínimo de 0.9269 indicando caída de bloques al arroyo Escalerillas y a la carretera bajo esta condición y de manera global permanecería estable el resto del talud; D) Sección H-H' esta sección también tiene inestabilidad local, el Fs mínimo es de 1.3242 lo que indica que bajo estas condiciones tiene estabilidad global el talud y el indicador mínimo de factor de seguridad se refiere a bloques o fragmentos que están en la lareda del talud con pendientes superior a los 60° lo cual con el movimiento sísmico y la gravedad provocaría su caída con afectación en el talud de forma local.



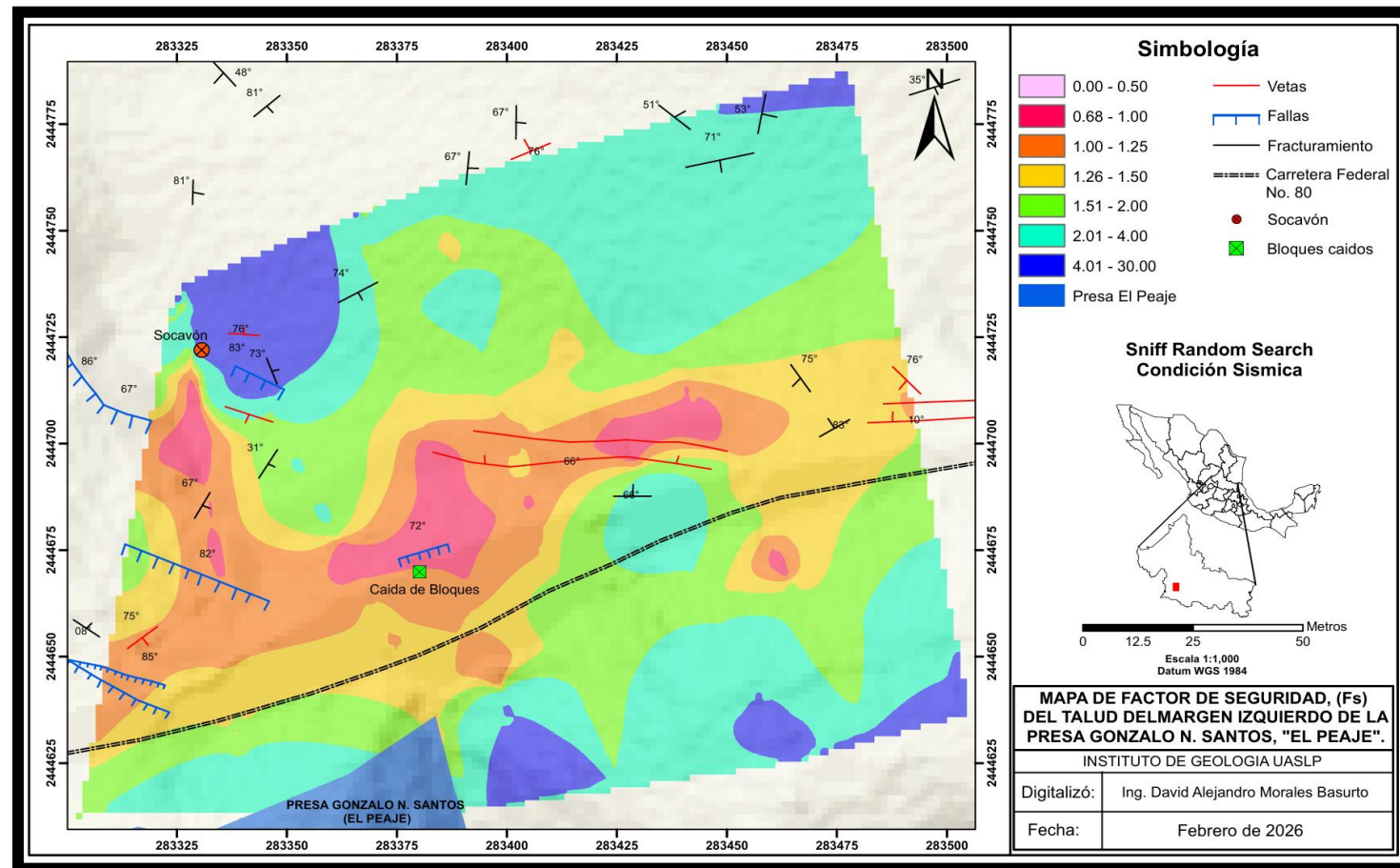
Anexo 26. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el *software* CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con esta condición, observamos que la zona donde hay factores de seguridad menores o igual a 1, está en las zonas de fallamiento (Falla Juachín) y en el área de los diques de vidrio la tendencia de coloración menores a 1 sigue el patrón de lineamiento de las fallas hasta topar con el corte de la carretera federal San Luis Potosí-Guadalajara.



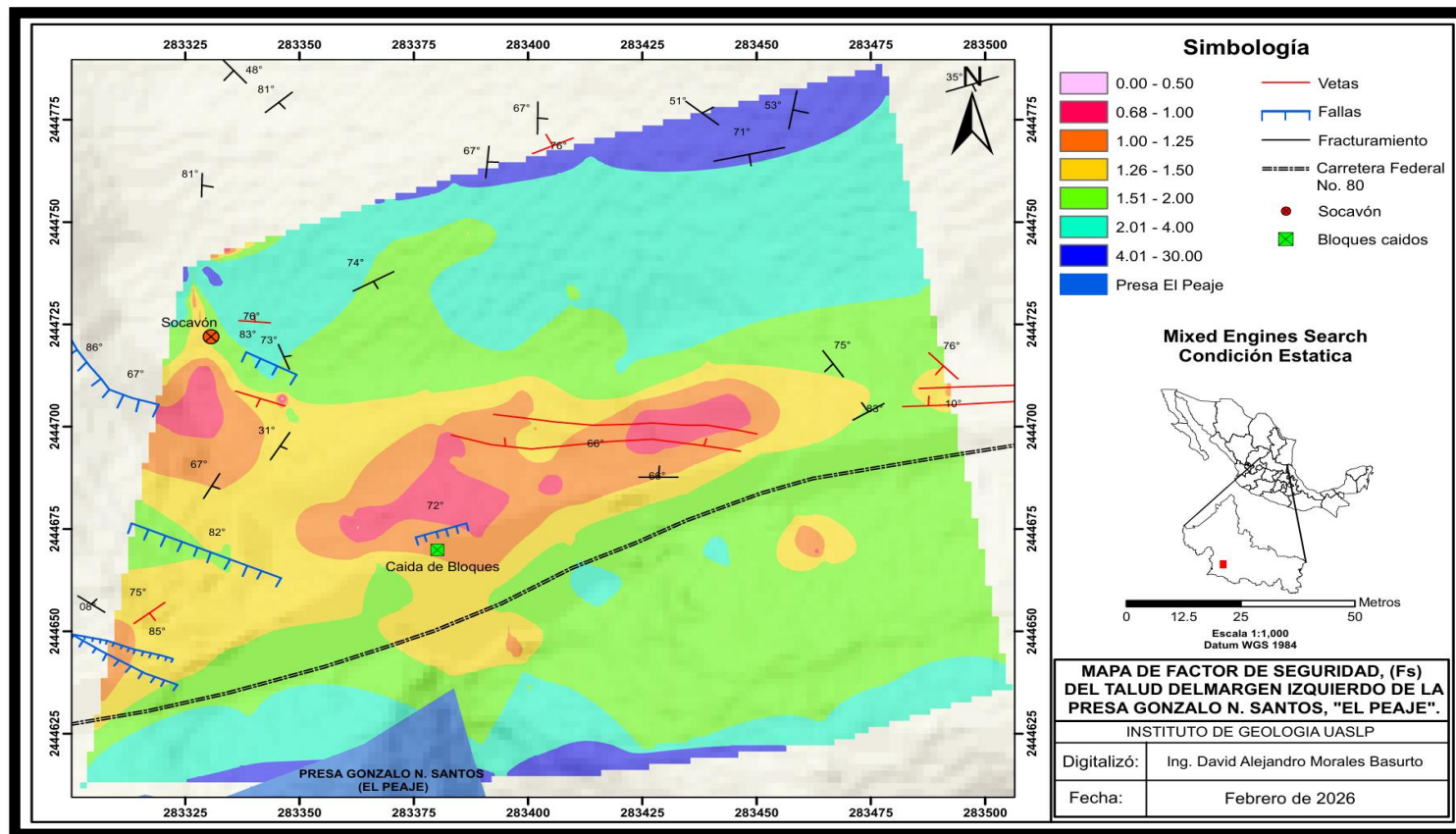
Anexo 27. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el *software* CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con esta condición, observamos que se reduce y define la zona de peligrosidad, siguiendo las trazas de las fallas y de los diques de vidrio volcánico sigue ese patrón la zona de peligro en la parte proximal a la carretera federal San Luis Potosí-Guadalajara.



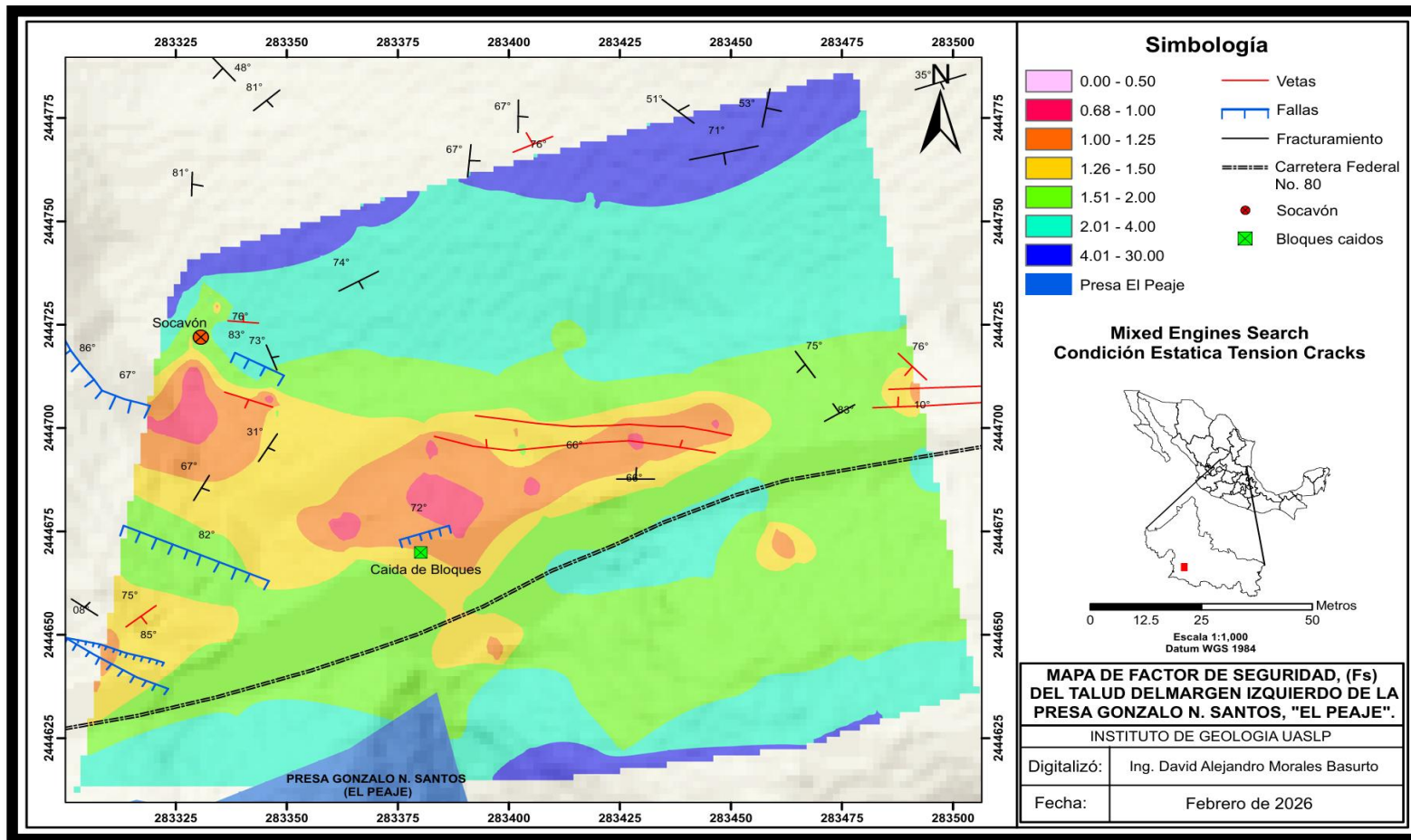
Anexo 28. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el *software* CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con la condición saturada, exhibe que hay un incremento crítico de la peligrosidad del talud completo en el borde proximal a la carretera federal No. 80 con valores menores a 1 en el factor de seguridad, siendo un peligro bajo estas condiciones tanto para la infraestructura carretera y a la presa, además, aun se correlaciona las trazas de las fallas y los diques de vidrio volcánico con las zonas de mayor peligrosidad en esta condición.



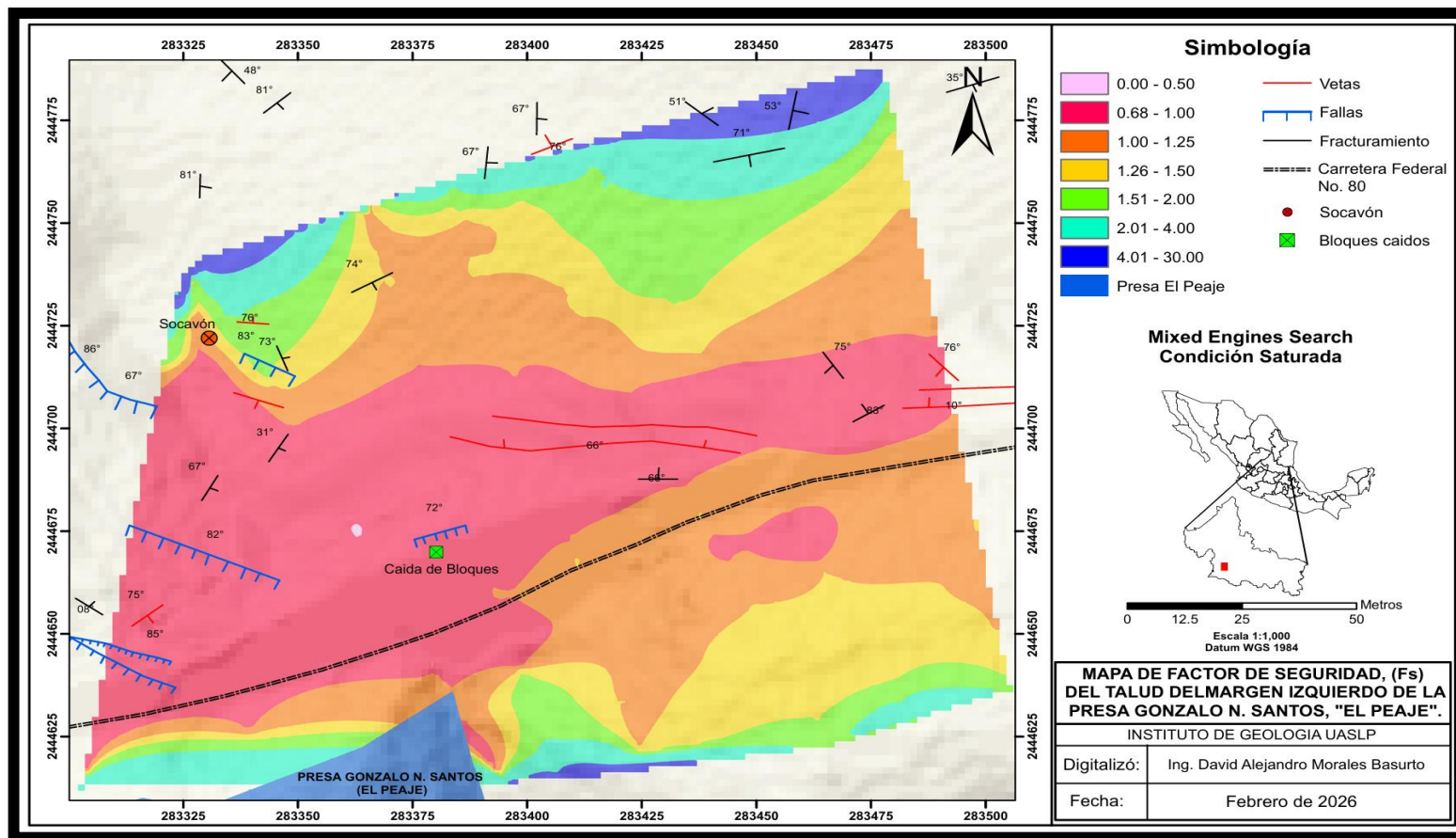
Anexo 29. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el *software* CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con la condición sísmica, exhibe que la parte con peligrosidad crítica es en donde el talud ya tuvo anteriormente deslizamientos y actualmente hay caídos de bloques, además del extremo este, donde esta el dique de vidrio volcánica, esta condición se relaciona a la argilización pervasiva del dique y promueve a deslizamientos y al ángulo de inclinación de la pseudoestratificación.



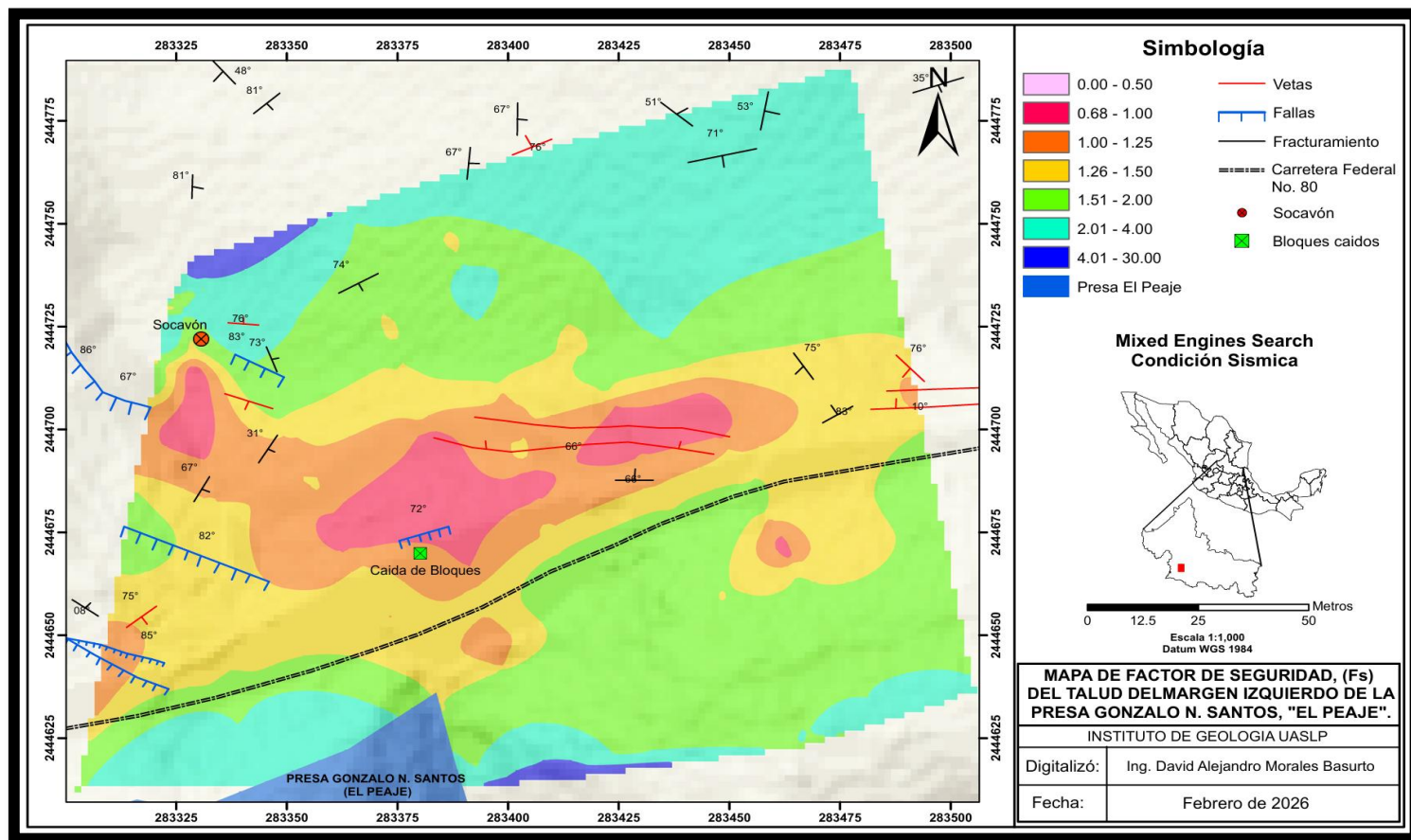
Anexo 30. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el software CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano bajo las condiciones estáticas, se muestra un mayor definición en el trazo de las zona de peligrosidad con respecto al análisis *sniff random search*, ya que incluye otros análisis y ajusta los resultados al modelo proporcionado, aun así, se observa la clara relación de sectores de mayor peligrosidad con la ubicación de las fallas asociadas a la falla regional Juachín y la carretera No. 80.



Anexo 31. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el *software* CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con esta condición, observamos que la zona donde hay factores de seguridad menores o igual a 1, está en las zonas de fallamiento (Falla Juachín) y en el área de los diques de vidrio la tendencia de coloración menor a 1 sigue el patrón de lineamiento de las fallas hasta topar con el corte de la carretera federal San Luis Potosí-Guadalajara.



Anexo 32. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos, generado en el software CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con esta condición saturada vemos que se generaliza la zona de peligro a lo largo de la carretera y ampliándose en la zona del fallamiento incrementado mas la zona de peligro, esta condición es peligro critico para la zona.



Anexo 33. Plano de factor de seguridad del talud izquierdo de la presa Gonzalo N. Santos generado en el software CSSAP (Borselli, 2026), con el método de Morgenstern y Price (1965), en este análisis del plano y con la condición sísmica, se observa el patrón que sigue la zona de peligro, y es el geológico-estructural tiene lineamiento con las fallas y diques además, de ser paralelo a la carretera federal No. 80.