



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Modelos geológicos tridimensionales con software especializado

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Carlos Gerardo Rodríguez Montiel

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Ing. José Luis Arcos Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Para mi madre

Quien ha sido una inspiración total durante toda mi trayectoria universitaria hasta la realización de este documento.

A mi padre y mi hermano quienes son un ejemplo a seguir.

A mi mejor amigo Rubén, mi único amigo con quien pude compartir el logro de haber llegado a la universidad.

A mis mejores amigos:

César (Torales) y Sebas, Tavo, Riko, Dano, Francisco; con quienes compartí mi vida universitaria.

Al profesorado:

Juan José Medina, quien fue el primer profesor con el cual tuve mi primer acercamiento en la geología.

Miguel Vera, el último profesor con el que tuve la oportunidad de tomar los últimos pasos a mi trayectoria de estudiante de Ingeniero Geólogo.

A mi fiel amigo que en paz descanse, mi mascota cobaya, Kamui Kobayashi.

A la música del artista Vangelis que me acompañó en este camino de estudiante.

Y a mi juego de mesa favorito que me acercó a muchas personas, me mantuvo concentrado y firme en mis decisiones, el Scrabble.

A mi amada Facultad de Ingeniería.

Al complejo del edificio principal y al complejo de edificios de Ciencias Básicas, así como los edificios de posgrado.

Sus bibliotecas, sus pasillos, sus balcones, fueron mis acompañantes en días de tristeza y alegría, de satisfacción y frustración, de perseverancia y de éxito.

Los paisajes que me acompañaron desde mí llegada al recinto universitario, hasta mi partida, como profesional.

Año tras año en el cual estuve y cada salón en el que me mantuve hasta lograr la meta cada semestre.

Al profesorado con el cual tuve la fortuna de tomar clases en cada una de sus asignaturas y el infortunio de no aprobar algunas veces

Cada curso con un profesor diferente me dio la oportunidad de conocer diferentes personas en el camino, incluso las mismas personas de enseñanza que me acercaba a mi meta.

No podré olvidar todos los rincones en donde me resguardaba a través del tiempo de las clases.

Mi facultad es un monumento a mis recuerdos donde lo imposible se puede volver realidad.

INDICE DE CONTENIDO

I. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
• <i>Introducción</i>	1
a) Planteamiento del problema.....	1
b) Objetivo.....	2
c) Metas.	2
d) Marco teórico.	3
• <i>Mapa geológico.....</i>	5
• <i>La sección geológica.....</i>	5
• <i>Programas computacionales para las Ciencias de la Tierra.....</i>	6
• <i>Programas de libre acceso.....</i>	7
II. DIGITALIZACIÓN DEL MAPA GEOLÓGICO.	9
III. LOS MODELOS GEOLÓGICOS TRIDIMENSIONALES.....	11
1. <i>Herramientas del modelado geológico tridimensional</i>	11
2. <i>Importación de datos estructurales.....</i>	13
3. <i>Importación de núcleos de barrenación.....</i>	15
4. <i>Inserción, edición, modificación de líneas de digitalización.....</i>	17
5. <i>Integración del mapa geológico.</i>	18
6. <i>Integración de una imagen como mapa geológico.....</i>	1
7. <i>Extensiones Geográficas.</i>	3
8. <i>Modelos Digitales.</i>	7
IV. APLICACIONES.....	21
i. <i>Modelo geológico tridimensional de la Falla de San Marcos, Coahuila.....</i>	21
ii. <i>Modelo geológico tridimensional de San Juan Ixcaquixtla, Puebla.</i>	34
ii. <i>Modelo de Yacimiento Mineral de Pórfido de Cobre, de Tiámaro, Estado de Michoacán. 52</i>	
V. CONCLUSIONES	60
VI. FUENTES DE INFORMACIÓN	62

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. IMÁGENES EJEMPLO DE MAPA DE CLASE ESCANEADO EN PARTES.....	9
FIGURA 2. FRAGMENTO DEL MAPA DE CLASE DE ING. JOSÉ LUIS ARCOS HERNÁNDEZ, CON CRUCES DE COORDENADAS PROPUESTAS.....	10
FIGURA 3. CARACTERÍSTICAS DE PLANO ESTRUCTURAL TOMADO DE SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	13
FIGURA 4. TABLA COLLAR, CREADA EN SOFTWARE DE HOJA DE CÁLCULO.....	15
FIGURA 5. TABLA SURVEY, CREADA EN SOFTWARE DE HOJA DE CÁLCULO.....	16
FIGURA 6. TABLA ASSAY, CREADA EN SOFTWARE DE HOJA DE CÁLCULO.....	16
FIGURA 7. DIGITALIZACIÓN DE UNA POLILÍNEA EN SOFTWARE ESPECIALIZADO.....	17
FIGURA 8. IMAGEN IMPORTADA EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELACIÓN GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	18
FIGURA 9. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE CLASE MEDIANTE GEORREFERENCIA EN COORDENADAS UTM, CREADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	1
FIGURA 10. IMAGEN MODIFICADA DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. MÉTODOS MODERNOS. ANEXO 1. MODELOS DE PAPEL PARA ESTUDIANTES DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. DEL DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ, (2021).....	1
FIGURA 11. IMAGEN IMPORTADA A SOFTWARE ESPECIALIZADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. MÉTODOS MODERNOS. ANEXO 1. MODELOS DE PAPEL PARA ESTUDIANTES DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. DEL DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ, (2021, p5).....	2
FIGURA 12. INSERCIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES SOBRE IMAGEN TRIDIMENSIONAL, ELABORADA EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	3
FIGURA 13. EXTENSIONES GEOGRÁFICAS DE MAPA DE CLASE DEL MODELO BASE ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	5
FIGURA 14. CUADRO DE LITOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	6
FIGURA 15. DATOS ESTRUCTURALES INTEGRADOS A LA SUPERFICIE DENTRO DEL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	8
FIGURA 16. SUPERFICIES CREADAS A PARTIR DE DATOS ESTRUCTURALES DE SUPERFICIE ELABORADOS EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	9
FIGURA 17. INTEGRACIÓN DE DATOS DE BARRENACIÓN AL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	11
FIGURA 18. MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL GENERADO POR VOLÚMENES ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	12
FIGURA 19. IMAGEN MODIFICADA DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. MÉTODOS MODERNOS. ANEXO 1. MODELOS DE PAPEL PARA ESTUDIANTES DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. DEL DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ, (2021, p6).....	13

FIGURA 20. IMAGEN IMPORTADA A SOFTWARE ESPECIALIZADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.	
MÉTODOS MODERNOS. ANEXO 1. MODELOS DE PAPEL PARA ESTUDIANTES DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. DEL DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ, (2021, p6).....	14
FIGURA 21. INSERCIÓN DE DATOS ESTRUCTURALES SOBRE IMAGEN TRIDIMENSIONAL, ELABORADA EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	15
FIGURA 22. EXTENSIONES GEOGRÁFICAS DE MAPA DE CLASE DEL MODELO BASE ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	16
FIGURA 23. CUADRO DE LITOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL	17
FIGURA 24. INTEGRACIÓN DE DATOS DE BARRENACIÓN AL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	18
FIGURA 25. SUPERFICIES CREADAS A PARTIR DE DATOS ESTRUCTURALES DE SUPERFICIE ELABORADOS EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	19
FIGURA 26. MODELO TERMINADO CON IMAGEN EN SUPERFICIE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	20
FIGURA 27. MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	21
FIGURA 28. MAPA GEOLÓGICO GEORREFERENCIADO TRIDIMENSIONALMENTE EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL. MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	23
FIGURA 29. SUPERFICIE 3D Y MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	24
FIGURA 30. SUPERFICIE 3D CON TRASLAPE DE MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	25
FIGURA 31. LÍNEAS DE DIGITALIZACIÓN DE ELEMENTOS DEL MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	26
FIGURA 32. IMAGEN A LA IZQUIERDA: LITOLOGÍA ADAPTADA DEL MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	27
FIGURA 33. EXTENSIÓN GEOGRÁFICA DEL MODELO BASE, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DEL MAPA GEOLÓGICO DE LA FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020v72n1a031019	29

FIGURA 34. PLANO DE FALLA ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL, CREADO MEDIANTE LA FALLA DIGITALIZADA DEL MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020V72N1A031019	30
FIGURA 35. PLANO DE FALLA REGENERADO CON DATOS ESTRUCTURALES DIGITALIZADA DE MAPA GEOLÓGICO DE FALLA DE SAN MARCOS, COAHUILA. ADAPTADO DE ALONSO-MANUEL, FITZ-DÍAZ, GUTIÉRREZ-NAVARRO (2020) HTTPS://DOI.ORG/10.18268/BSGM2020V72N1A031019 , ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	31
FIGURA 36. BLOQUES INDEPENDIENTES DENTRO DEL MODELO BASE DEL MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	32
FIGURA 37. MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL, CON LOS VOLÚMENES FINALES GENERADOS POR SUPERFICIES 3D, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	33
FIGURA 38. LEYENDA PROPUESTA CON LOS NOMBRES DE LAS LITOLOGÍAS DE LA CARTA DE SAN JUAN IXCAQUIXTLA.	35
FIGURA 39. ETIQUETAS DE LOS BLOQUES.	36
FIGURA 40. FRAGMENTO DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA, SAN JUAN IXCAQUIXTLA E14-B24, PUEBLA Y OAXACA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2018.	38
FIGURA 41. MAPA DE CLASE DE LA ASIGNATURA DE CARTOGRAFÍA Y GEOLOGÍA DE CAMPO IMPARTIDA POR EL ING. JOSÉ LUIS ARCOS HERNÁNDEZ.	39
FIGURA 42. MAPA DE FRACTURAS Y FALLAS MODIFICADA DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA, SAN JUAN IXCAQUIXTLA E14-B24, PUEBLA Y OAXACA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2018.	40
FIGURA 43 IMÁGENES DE SECCIONES TRANSVERSALES MODIFICADAS DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA, SAN JUAN IXCAQUIXTLA E14-B24, PUEBLA Y OAXACA, DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2018.	41
FIGURA 44. IMÁGENES GEORREFERENCIADAS DE MAPAS DEL ÁREA DE SAN JUAN IXCAQUIXTLA, PUEBLA, IMPORTADAS TRIDIMENSIONALMENTE EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	42
FIGURA 45. SUPERFICIE TRIDIMENSIONAL CREADA MEDIANTE UN MDE DE 50 UNIDADES POR PÍXEL, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELAMIENTO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	43
FIGURA 46. MAPA GEOLÓGICO DE CLASE DE SAN JUAN IXCAQUIXTLA TRASLAPADO CON LA SUPERFICIE TRIDIMENSIONAL, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	44
FIGURA 47. IMÁGENES VERTICALES IMPORTADAS SOBRE LA SUPERFICIE TRIDIMENSIONAL CON UN 70% DE TRANSPARENCIA.	45
FIGURA 48. DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL SOBRE LA SUPERFICIE E IMÁGENES VERTICALES, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	46
FIGURA 49. CREACIÓN DEL MODELO BASE RESPECTO A LA EXTENSIÓN GEOGRÁFICA DEL MAPA DE CLASE DE SAN JUAN IXCAQUIXTLA, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.	47
FIGURA 50. SUPERFICIES DE PLANOS DE FALLA CON EXTENSIÓN MÁXIMA DEL MODELO BASE ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	48

FIGURA 51. PLANOS DE FALLA MODIFICADOS RESPECTO A EL MAPA DE FRACTIRAS Y FALLAS CON TRANSPARENCIA DEL 20%, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL	49
FIGURA 52. SUPERFICIES TRIDIMENSIONALES CLASIFICADAS POR LITOLOGÍA, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	50
FIGURA 53. MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL DE SAN JUAN IXCAQUIXTLA, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	51
FIGURA 54. MAPA GEOLÓGICO TOMADO DE TESIS DE DOCTORADO, METALOGENIA DEL PÓRFIDO DE COBRE DE TIÁMARO, ESTADO DE MICHOACÁN, GONZÁLEZ, 2007, P38	52
FIGURA 55. SECCIÓN GEOLÓGICA TOMADA DE TESIS DE DOCTORADO, METALOGENIA DEL PÓRFIDO DE COBRE DE TIÁMARO, ESTADO DE MICHOACÁN GONZÁLEZ, 2007, P39.	53
FIGURA 56. LITOLOGÍA PROPUESTA PARA EL MODELO TRIDIMENSIONAL	54
FIGURA 57. CLASIFICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE DIGITALIZACIÓN DEL MAPA GEOLÓGICO Y LA SECCIÓN GEOLÓGICA.....	54
FIGURA 58. SUPERFICIE TRIDIMENSIONAL E IMAGEN TRIDIMENSIONAL DEL MAPA GEOLÓGICO, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	55
FIGURA 59. DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL MAPA GEOLÓGICO Y LA SECCIÓN GEOLÓGICA, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	56
FIGURA 60. MODELO BASE CON EXTENSIÓN GEOGRÁFICA DEL MAPA GEOLÓGICO, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	57
FIGURA 61. SUPERFICIES CREADAS EN BASE A SU LITOLOGÍA, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL.....	58
FIGURA 62. VOLÚMENES FINALIZADOS PARA EL MODELO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL, ELABORADO EN SOFTWARE ESPECIALIZADO DE MODELADO GEOLÓGICO TRIDIMENSIONAL	59

I. CONCEPTOS BÁSICOS.

- **Introducción**

El estudiante de Ciencias de la Tierra tiene como obligación recabar información geológica, analizarla e interpretarla. A su vez gran parte del trabajo geológico consiste en la recopilación de datos como tipo de rocas, distribución, datos estructurales, etc., los cuales deberán ser interpretados con su integración con base en modelos geológicos aceptados por la comunidad científica.

Actualmente existen herramientas que permiten una facilidad de uso de los datos recabados en campo y así generar una interpretación oportuna, rápida, veraz, exacta, eficaz.

- a) **Planteamiento del problema.**

En el proceso de formación de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Geológica se comprenden una gran variedad de métodos de aprendizaje teórico y práctico que ayudan a la comprensión del área misma en todos sus aspectos.

Una de esas formas o métodos de aprendizaje es la sección geológica en donde el estudiante aplica sus conocimientos de trigonometría, estratigrafía, conceptos básicos de geología, petrologías, cartografía, geología estructural, entre otros, para lograr la mejor interpretación, en algún punto geográfico.

Al realizar secciones geológicas en el aula se presentan algunas limitaciones. Se enseña a crear e imaginar en un plano de papel, donde si bien es importante tenerlo así y aprenderlo a realizarlo, solo sirve como elaboración de trabajo resolutivo y no como un trabajo profesional.

Los alumnos del área de geología terminan buscando alternativas digitales para sus trabajos, no conformes con la interpretación dibujada y aprendida en clase tratando de llevar un poco más lejos sus entregas profesionales.

En el caso del profesor y los ayudantes, suelen estar atentos a los estudiantes al realizar las secciones geológicas, hay ocasiones que no se llega a concluir con todos los alumnos por falta de tiempo y antecedentes de parte del alumno.

Existen casos particulares donde se lleva a cabo el aprendizaje con software no tan especializado con programas geográficos que tratan de llegar a una conclusión geológica por medio de posibles secciones del subsuelo.

Otro caso sería preparar un itinerario de recorrido de algún lugar geológico que se estudie en clase y que los estudiantes observen antes los puntos clave de aprendizaje en prácticas de campo.

Estas herramientas abordan temas de información geográfica que, al querer abordar conocimiento geológico, detallan estudios sobre la superficie terrestre, dejando a un lado información sólida del subsuelo.

b) Objetivo.

El objetivo de este trabajo es que los estudiantes y profesionales de Ciencias de la Tierra conozcan las herramientas computacionales con el fin primordial de poder interesarse en construir secciones geológicas con base en modelos implícitos digitales.

c) Metas.

Los ejemplos mencionados en este trabajo han sido dibujados digitalmente por el autor, la interpretación geológica de estos ejemplos son propiedad de los autores de cada modelo y no se modificó desarrollo alguno del mismo.

Este contenido consiste en guiar y mostrar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Geológica a crear modelos tridimensionales geológicos partiendo de un plano y con base en sus conocimientos adquiridos, convertirlos de manera digital para su manipulación en programas computacionales.

El trabajo muestra consejos o puntos clave que pueden ser de utilidad para la realización de modelos geológicos tridimensionales con software especializado y con ello visualizar secciones geológicas.

Una vez creados se desea que puedan ser mejorados los tiempos de aprendizaje y ayudar en la finalización de temarios con mayor solidez.

Otra de las metas importantes será lograr una transición del papel dibujado a planos digitales, a fin de visualizar la geología del subsuelo y así complementar temas teóricos en prácticos en las enseñanzas en campo.

La elaboración de estos recomienda herramientas y funciones que son presentadas en programas de cómputo para realizar dicho modelos tridimensionales

d) Marco teórico.

El uso de programas computacionales del tipo explícito no es del todo propios para Ciencias de la Tierra, si bien tratan de llegar a una posible solución en casos específicos. Pero ¿qué es un programa de tipo explícito?

Consta de una gran variedad de comandos, funciones, herramientas; algunas conforman el espacio visual, otras en comandos con terminal para lenguaje de programación.

Otra de sus características principales es que es dominado por una digitalización manual lo que lo hace un programa computacional más complicado. Sumarle que solo una persona es capaz de llegar a un resultado muy bien consolidado, se abarca mucho tiempo de realización y de actualización de un mismo trabajo o proyecto. La integración de datos es limitada, debido al tipo de archivos que manejan cada programa.

La calidad de los modelos depende del tiempo y el conocimiento del programa de cómputo y no de la experiencia que tiene el usuario en este caso geológico. En cambio, existen programas del tipo contrario, el implícito que son completamente diferentes respecto a sus funciones. La realización de modelos basados en funciones tridimensionales conlleva a ser un programa computacional intuitivo y permite la integración de datos como un sistema, por lo tanto es que un todo está compuesto por la suma de varias partes creadas.

Será posible tomar como base, para modelar ejemplos geológicos de al menos una sección por lugar geográfico.

Es posible crear modelos a partir de un mapa geológico el cual incluye datos estructurales tomados en campo y a la vez usar los datos estructurales de los mapas digitalizándolos en el programa computacional. A su vez se pueden usar elementos digitales importados de otros programas, refiriéndose a elementos de Sistemas de Información Geográfica, sin embargo el programa de modelado debe tener esta herramienta para facilitar el trabajo realizado y tener mejores resultados.

Una vez formado el modelado tridimensional se puede visualizar secciones geológicas desde cualquier orientación o simplemente verificar la sección inicial, en caso de tener información preliminar.

- **Mapa geológico.**

Silva y Mendoza (2016), dicen que un mapa geológico es un registro de información geológica colectada durante una campaña de campo; es un instrumento donde se compila la información de donde se puede realizar una síntesis geológica de un área determinada.

Lo considera Silva y Mendoza (2016), una poderosa herramienta en el trabajo geológico. Donde se muestra la reconstrucción de ambientes de depósito, la deformación de una región, la definición de la geometría de un cuerpo rocoso, etc.

- **La sección geológica.**

Según Silva y Mendoza (2016) un corte geológico muestra una vista perpendicular a la propia del mapa. Sin embargo, es un plano vertical que muestra las estructuras bajo la superficie de la Tierra, si la sección o el plano vertical es paralelo a la dirección de la recta de máxima pendiente de los estratos se tendrá una vista de los ángulos y espesores verdaderos, de lo contrario se tendrá inclinaciones de ángulo aparente, así como espesores aparentes. Por lo que es necesario tomar ese criterio para realizar secciones que contengan información útil.

Silva y Mendoza (2016) menciona que, por lo general, las secciones son construidas a la misma escala tanto en sentido horizontal como vertical; pues la sección estará acompañada de la leyenda: escala horizontal igual a escala vertical, porque de no ser así se tendría que hacerse un ajuste a los ángulos, proyectados sobre el plano de sección o el plano vertical. Se exagera la escala para tener una mejor visualización del relieve como valles, ríos, fallas, etc.

Repasando conceptos básicos necesarios para la realización de los modelos tridimensionales se tienen los siguientes:

- El perfil topográfico, la representación del terreno bidimensional en una porción de la corteza terrestre. Tomando proyecciones de líneas de curvas de nivel con su escala tomando la altitud y longitud de las líneas del terreno

y geométricamente es la curva que resulta de la intersección entre la superficie que representa al relieve y el plano vertical.

- Las clasificaciones de los tipos de rocas y las estructuras en su representación en la naturaleza como pudieran ser las rocas sedimentarias que son depositadas en posición horizontal que normalmente están formados con plegamientos de tipos de estructura.
- El contexto tectónico, es de ayuda para englobar el movimiento regional de las litologías en el área estudiada, donde se tienen posibles secciones geológicas creadas en base a estudios previos de perforaciones, sondeos, análisis puntuales, zonas de plegamiento, estructuras.
- La distribución de las unidades estratigráficas del lugar dando así las distintas secuencias cronológicas.
- Datos espaciales que caractericen geométricamente a las estructurales a lo largo de toda el área estudiada a modelar.

Primeramente, el usuario se tiene que hacer las siguientes preguntas, esto para tener mejores resultados.

- ¿Qué se necesita para un modelo tridimensional geológico?
 - ¿Qué tipo de modelos tridimensionales geológicos son posible crearse?
 - ¿Existe la posibilidad de ayudarse de otro software para facilitar el trabajo de realización de un modelo tridimensional?
-
- **Programas computacionales para las Ciencias de la Tierra.**

La necesidad de visualizar dibujos abstractos, interpretaciones que solo se pueden ver en planos de dos dimensiones como estudiante de Ingeniería Geológica propicia buscar alternativas tecnológicas. A lo largo de los últimos 5 años ha habido herramientas digitales que se han perfeccionado, algunas otras han quedado obsoletas, sin embargo, la gran mayoría de ellas encontradas al menos por nombre o reseñas de usuarios en el mundo del internet.

Durante la realización de este trabajo en algunos programas con licencias de prueba, otras de libre acceso, programas utilizables mediante páginas web y en casos particulares se tuvo acceso a guías gratuitas con imágenes interactivas y videos.

- **Programas de libre acceso.**

Se recomienda practicar con un programa para aplicación móvil y computadora llamado Geological Map Data Extractor (Rick Allmendinger, 2025, www.rickallmendinger.net).

Es un *software* que puede ser de gran ayuda en lo que se refiere a crear secciones geológicas realizando trabajo de campo. Este programa lleva aproximadamente 5 años de actualizaciones por el autor.

El mismo programa tiene una intuitiva metodología de creación de secciones geológicas; es necesario tener digitalizado en formato imagen la carta geológica del lugar para insertarla en el programa, georreferenciarla con sus propias herramientas incluidas ya sea en coordenadas geográficas o en coordenadas UTM, posteriormente digitalizar los contactos geológicos con las herramientas incluidas en el mismo programa; insertar los datos estructurales por medio de la regla de los tres puntos para tener la dirección geológica de los contactos litológicos; después marcar la línea de sección para relacionar las direcciones de los contactos con la misma línea; el software hará automáticamente líneas punteadas de una sección transversal interpretada por los datos incluidos en el flujo de trabajo.

A lo largo el trabajo de realización de modelos tridimensionales hubo gran variedad de programas especializados en los cual enfocarse y se tuvo la oportunidad de conocer las herramientas que tiene un programa en específico de la empresa Sequent de Bentley. Dentro de las herramientas que incluye esta plataforma existe Leapfrog Geo y con la misma plataforma existe la posibilidad de, que cualquier persona, pueda ser usuario de las guías de aprendizaje elaboradas

de manera escrita con videos de muestra y con una manera interactiva de imágenes con movimiento y acciones predeterminadas.

Estas guías son altamente recomendables, como se menciona, cualquier persona puede acceder a ella tan solo con registrar un correo electrónico personal. Una vez registrado tendrá acceso gratuito a guías, cursos, tutoriales, inclusive podrá optar por visitar la sección de conferencias y sesiones *webinar* que la empresa ofrece, algunas de ellas con licencias de prueba de sus herramientas.

II. DIGITALIZACIÓN DEL MAPA GEOLÓGICO.

El elemento más importante en la creación de un modelo geológico tridimensional parte de un mapa geológico. En el aula, en ciertas asignaturas de la carrera de Ingeniería Geológica se realizan mapas específicos de áreas donde se visitan en prácticas de campo.

Si fuera el caso que se puede tener un mapa en papel con dimensiones 90 cm x 60 cm y con ayuda de un escáner común incluido en impresoras multifuncionales domésticas se digitalizarían imágenes de tamaño carta y así poder hacer un juego de imágenes (Figura 1) para crear un mapa digital de un plano dentro del programa especializado.

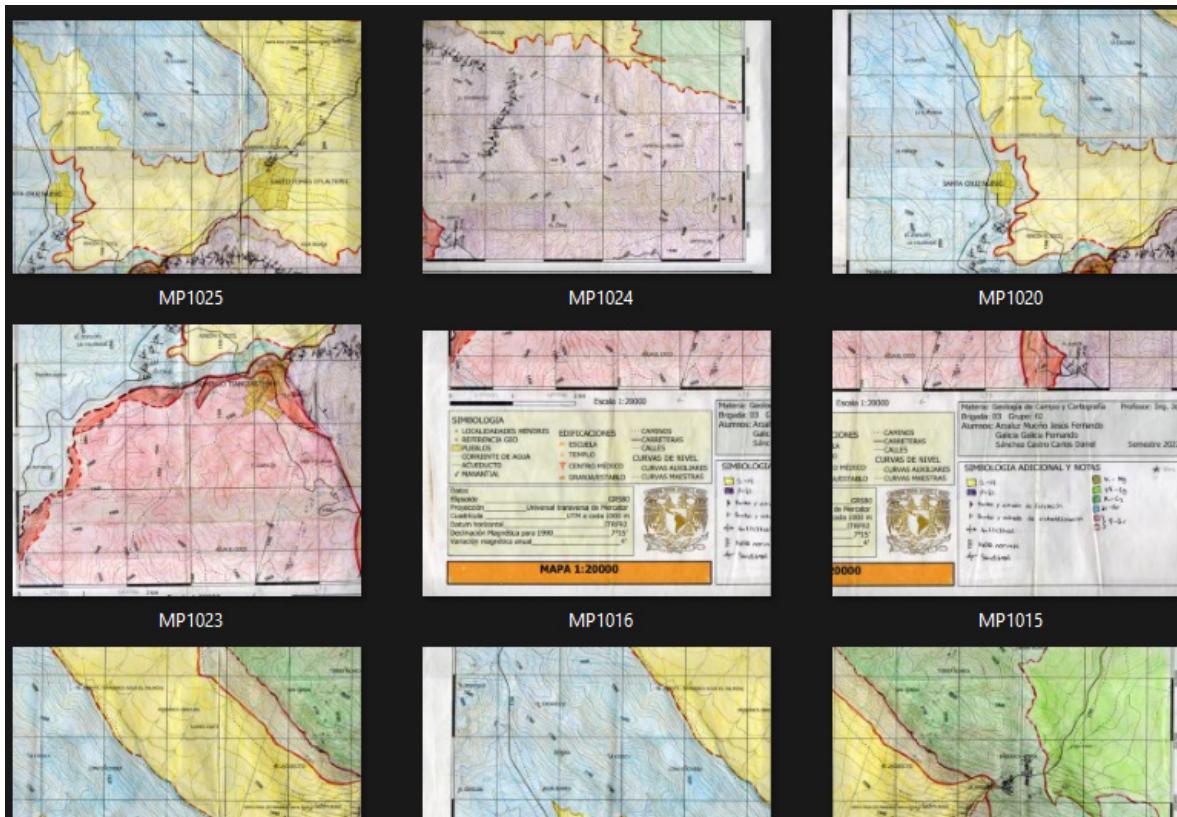


Figura 1. Imágenes ejemplo de mapa de clase escaneado en partes.

Las coordenadas con las que se georreferencia la primera imagen estará compuesto por los siguientes valores:

✖ $x = 624,000 \text{ m}; y = 2,031,000 \text{ m}$

✖ $x = 628,000 \text{ m}; y = 2,031,000 \text{ m}$

✖ $x = 624,000 \text{ m}; y = 2,028,000 \text{ m}$

✖ $x = 628,000 \text{ m}; y = 2,028,000 \text{ m}$

Estas coordenadas están relacionadas con los cruces propuestos de las cuadrículas para una georreferencia práctica dentro de cualquier programa de cómputo que pueda realizar esta acción y se verá como la Figura 2.

En el caso del programa de modelado cada imagen tomada, llámese con el tecnicismo *mosaico* al ser importado es mejor ser georreferenciado en coordenadas UTM si así lo indicase el mapa real, ya sea en un programa externo o en el mismo modelador tridimensional.

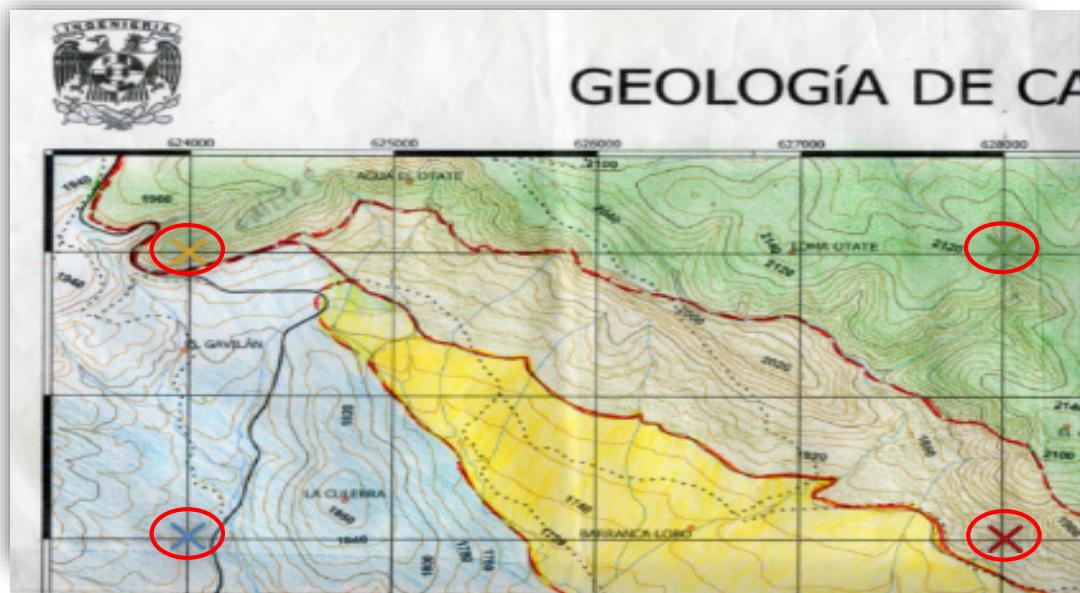


Figura 2. Fragmento del mapa de clase de Ing. José Luis Arcos Hernández, con cruces de coordenadas propuestas.

III. LOS MODELOS GEOLÓGICOS TRIDIMENSIONALES.

1. Herramientas del modelado geológico tridimensional

En algunos programas las herramientas de modelado geológico están ordenadas de la siguiente manera.

- Como primer punto está la 'creación de la superficie' (1) de donde partirán los elementos hacia el subsuelo digital.
- Sobre esta superficie se pueden 'colocar imágenes de mapas temáticos, capas vectoriales, fotos satelitales' (2) por nombrar algunas de las principales. Estos pueden ayudar a visualizar con mayor detenimiento la información que se modele en el espacio tridimensional. Puede haber mapas que tengan metadatos de georreferencia y se puede utilizar estos dentro del programa especializado; los mapas que no tengan georreferencia se les puede asignar coordenadas desde el mismo *software*, también permite leer coordenadas de software externo.
- Existe la posibilidad de agregar datos de barrenación' (3);
- 'Dibujar polilíneas' (4). Aunque es válido utilizar estos elementos sobre la superficie del modelo también es posible crearlos y modificarlos debajo de la superficie, como los datos de barrenación que tienen ángulos, tipos de roca puntos geográficos, es posible ponerle un punto en el subsuelo.
- Lo sería también 'los datos estructurales' (5) que conformen el espacio geográfico y que además pudieran haber sido recabados en campo.
- Otra de las herramientas que puede contener este tipo de programas es la nube de puntos que se crea sobre la superficie para ser un elemento propio del *software* y mejorar los tiempos de procesamiento informático. Con estos datos integrados se crea un modelo geológico previo que será delimitado por coordenadas geográficas determinadas por la superficie o por el mapa importado.
- Otra de las herramientas es la 'nube de puntos' (6) que se crea sobre la superficie para ser un elemento propio del *software* y mejorar los tiempos de procesamiento informático. Con estos datos integrados se crea un modelo

geológico previo que será delimitado por coordenadas geográficas determinadas por la superficie o por el mapa importado.

- Los límites que se crearan serán procesados por la herramienta de 'modelos geológicos' (7) y en ella contiene muchas más funciones como sería un sistema de fallas (a), una sucesión estratigráfica (b) litologías y su cronología (c) y los tipos de roca principales (d).
- Al final de este proceso pudiera ser que exista una última herramienta que sea referente a la creación de cortes verticales (8).

2. Importación de datos estructurales.

Es posible que los programas de modelación tridimensional tengan a disposición el manejo de puntos estructurales. Estos puntos son importantes para delimitar, en

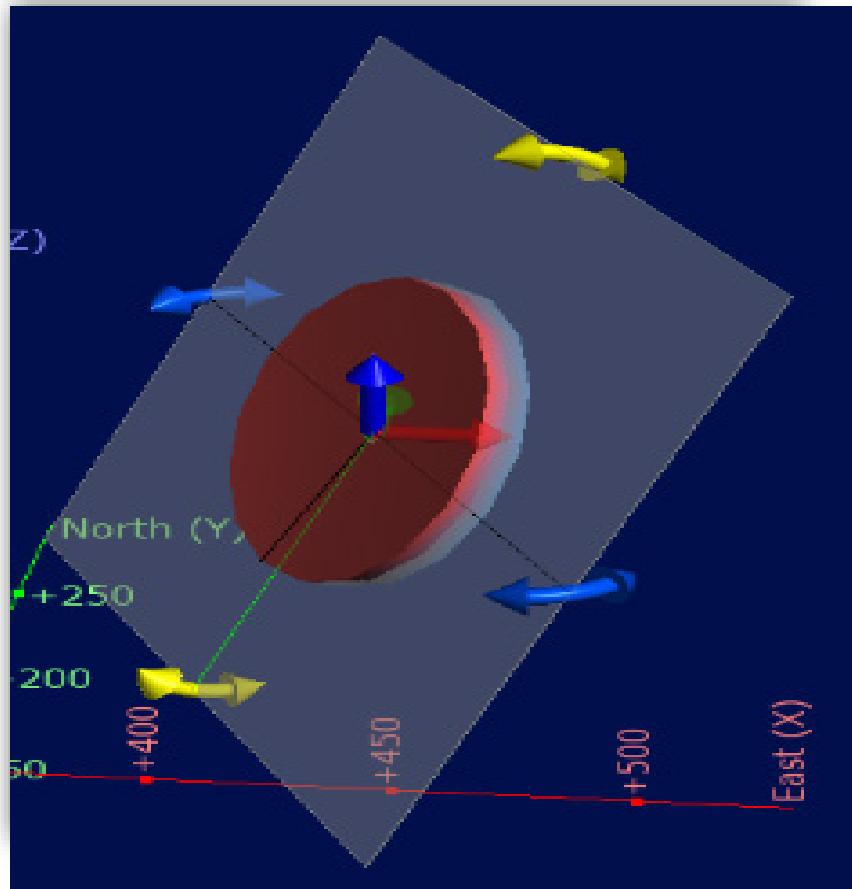


Figura 3. Características de plano estructural tomado de software especializado de modelado geológico tridimensional.

el proceso de creación del modelo, depósitos fracturados en la extensión del área estudiada.

Los puntos estructurales se pueden obtener por medio del mapa y por trabajo de campo para incluirse en el flujo de trabajo, importar al mapa y de ser posible, clasificar por tipo de roca cada elemento de este tipo.

Dentro de los programas de cómputo estos puntos estructurales tienen las siguientes características (Figura 3):

- Presentan un plano para mover el plano estructural.
- Presentan flechas para mover el plano de rotación del punto estructural.
- Contienen un punto móvil para moverse.
- Se puede modificar el radio del plano estructural.
- Se puede modificar el número de lados del plano estructural.
- El programa computacional debe contener una función para modificar las coordenadas geográficas.
- De igual forma debe contener una función para modificar el buzamiento y la orientación del buzamiento

3. Importación de núcleos de barrenación

Los datos de núcleos de barrenación o “drillholes”, término en inglés, son utilizados en este tipo de programas que son relacionados a la minería para una modelación del subsuelo mucho más precisa, con más detalle y para obtención de datos del subsuelo en un área considerable para estudiar el cuerpo mineralizado. Este tipo de archivos, elementos o datos son muy comunes en software de modelado geológico tridimensional.

Estos archivos están compuestos de tres tablas que se pueden crear en cualquier plataforma de tablas y fórmulas como se comenta a continuación:

- La Tabla COLLAR (Figura 4), define la ubicación geográfica de la superficie de la barrenación. Este archivo requiere al menos de las columnas:
 - HOLE_ID.
 - EAST (X).
 - NORTH (Y).
 - ELEV (Z).

	A	B	C	D
1	HOLE_ID	DEPTH	DIP	AZIMUTH
2				
3				
4				
5				

Figura 4. Tabla COLLAR, creada en software de hoja de cálculo.

- La Tabla SURVEY (Figura 5), define la orientación de los barrenos con sus profundidades totales. Debe tener las siguientes columnas (como mínimo):
 - HOLE_ID.
 - DEPTH.
 - DIP.
 - AZIMUTH.

Para barrenos rectos, solo una fila necesita (DIP: -90; AZIMUTH:0)

	A	B	C	D
1	HOLE_ID	EAST (X)	NORTH (Y)	ELEV (Z)
2				
3				
4				
5				

Figura 5. Tabla SURVEY, creada en software de hoja de cálculo.

- La Tabla ASSAY (Figura 6), de intervalos, también llamada como *Geology*; especifica segmentos del barreno asociado como litología en código o valores de leyes minerales. Debe tener las siguientes columnas:
 - HOLE_ID.
 - FROM.
 - TO.

	A	B	C
1	HOLE_ID	FROM	TO
2			
3			
4			
5			

Figura 6. Tabla ASSAY, creada en software de hoja de cálculo

Estas últimas dos referidas a la profundidad del intervalo, una o más columnas de medidas, que pueden incluir "grade", litología, datos geotécnicos, otros datos numéricos o valores categorizados.

La columna que se repite en todos los archivos es HOLE_ID. La función de esta repetición es primordial para el modelado puesto que es una función de las bases de datos. Este tipo de ejercicios funciona como tal y hace que la misma columna se ligue o se relacione entre todas las demás tablas.

4. Inserción, edición, modificación de líneas de digitalización.

Uno de los elementos clave en la creación del modelado geológico 3D es la creación de líneas de digitalización o término informático *polilíneas*. Estos elementos se pueden crear en software de Sistemas de Información Geográfica, sin embargo, quedaría incompleto el aporte porque se requiere que estas polilíneas estén compuestas con el sistema de referencia de coordenadas xyz. Es por eso por lo que el programa que se elija para crear el modelo tenga esa característica de diseño de polilíneas.

Esta creación se diseña cuando se haya tenido un mapa geológico, lo que sería conveniente con una escala precisa de los contactos litológicos. En los software de modelación tridimensional geológico, constantemente se requerirá de este elemento para guiar a las superficies creadas.

Se pueden crear de varias formas, sobre un plano horizontal como un mapa geológico y sobre planos verticales como una sección vertical. (Figura 7)



Figura 7. Digitalización de una polilínea en software especializado.

5. Integración del mapa geológico.

Si el programa tuviese la herramienta de insertar mapas, lo idóneo sería colocar las coordenadas del párrafo anterior y agregarlas dentro de la información digital de la imagen importada. Para facilitar el trabajo se debiera usar marcadores para ayudar a que el programa computacional pueda insertar esa pequeña porción del mapa escaneado en un espacio tridimensional. (Figura 8)

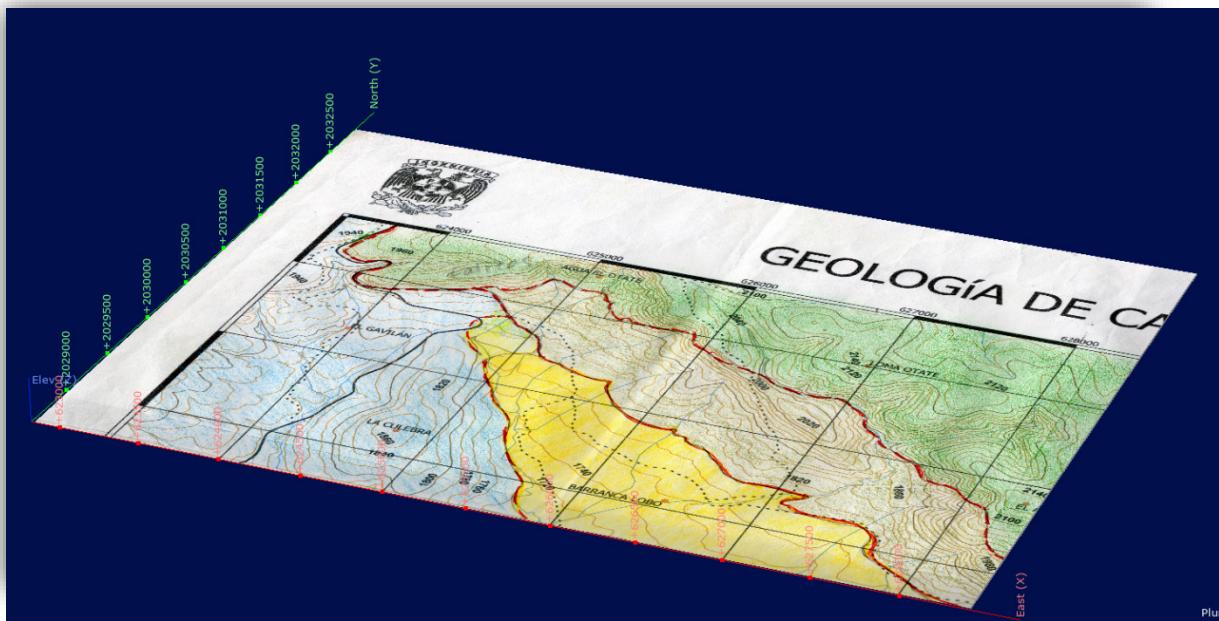


Figura 8. Imagen importada en software especializado de modelación geológica tridimensional.

Con el mismo procedimiento se puede agregar cada una de las demás partes del mapa que fueron escaneadas para completar la construcción del mapa completo dentro del espacio tridimensional. (Figura 9)

Este procedimiento es de suma importancia porque sería la imagen que ayude a trazar o incluir cualquier elemento geológico posterior dentro del modelo, además de que poco a poco se irían delimitando las extensiones geográficas.

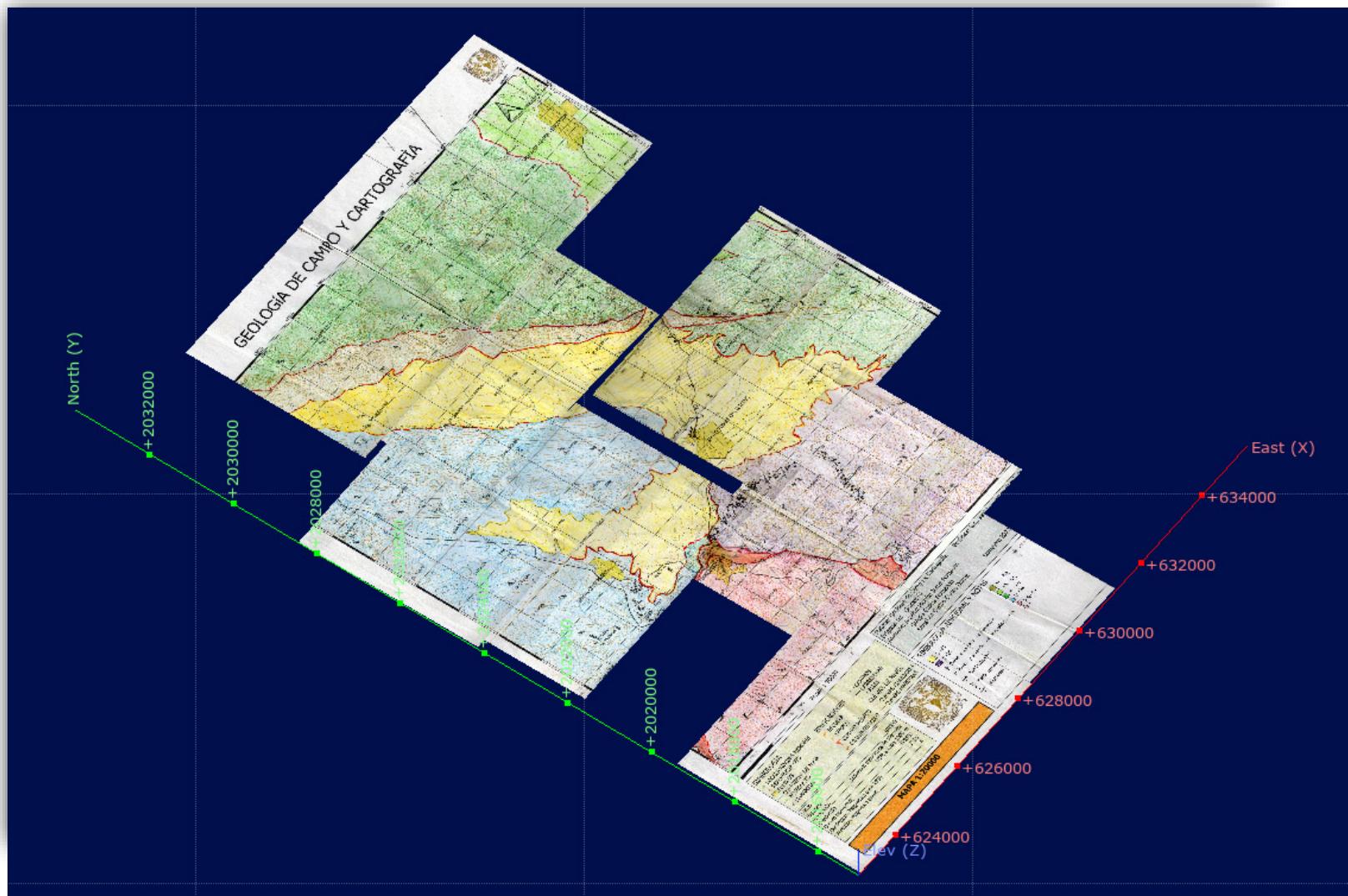


Figura 9. Construcción del mapa de clase mediante georreferencia en coordenadas UTM, creado en software especializado de modelamiento geológico tridimensional.

6. Integración de una imagen como mapa geológico.

Puede haber algún caso que no se disponga de un mapa, pero se quiera crear un modelo geológico para observar y aprender aspectos básicos geológicos.

En el libro *Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural*. Del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p5) se puede obtener una imagen para crear un modelo tridimensional.

La imagen principal para este ejemplo será la cara de vista de planta de tal forma que el Norte esté visible. (Figura 10)

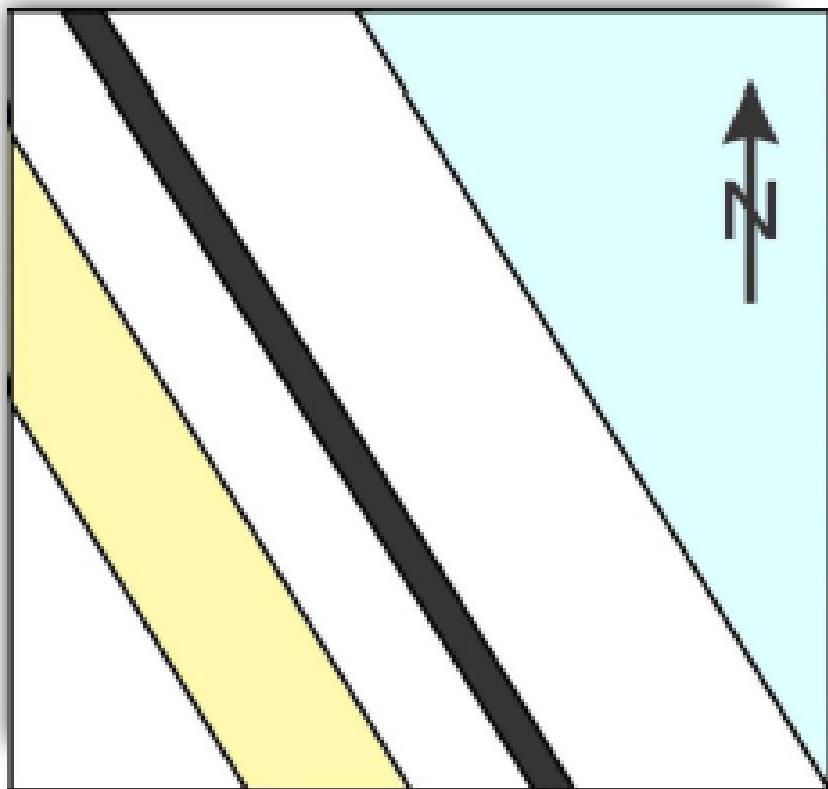


Figura 10. Imagen modificada de *Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural*. del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021).

Se importará de la misma forma en la que se hizo el ejemplo anterior de los mosaicos.

Se le debe colocar un nombre y se debe tener cuidado con la coordenada 0,0,0. Cuidar que no quede invertida la georreferencia y usar el mouse informático para arrastrar sobre puntos que el programa debe incluir.

La diferencia de este ejemplo es que no se tendrán coordenadas reales, serán coordenadas un tanto arbitrarias para poder ejecutar de la mejor manera posible este tipo de ejercicio (Figura 11).

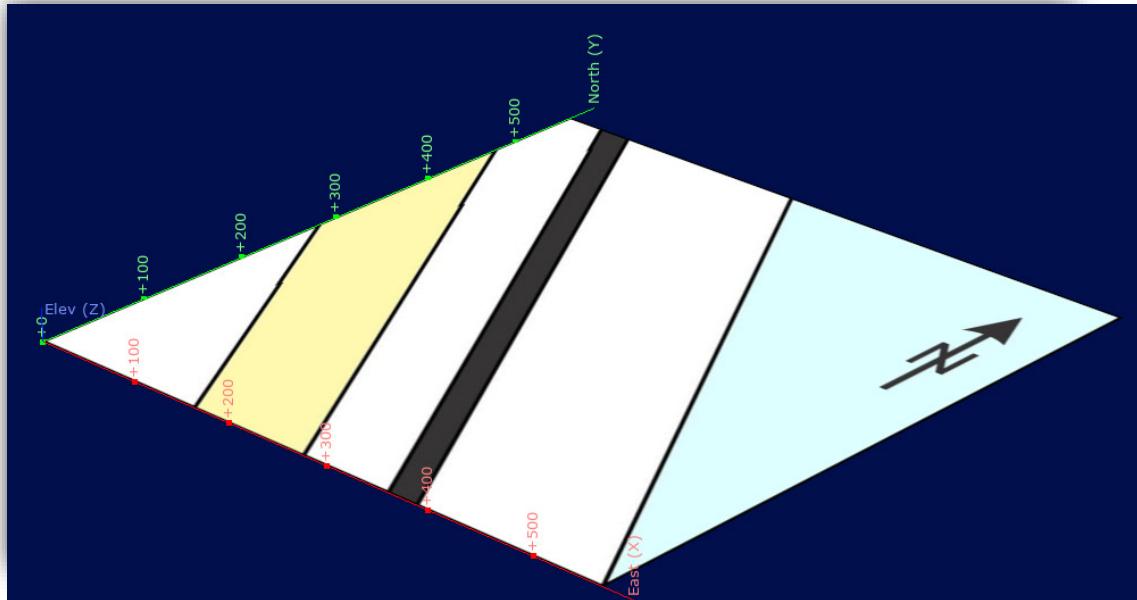


Figura 11. Imagen importada a software especializado geológico tridimensional de Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural. Del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p5).

7. Extensiones Geográficas.

En los programas de modelación geológica tridimensional, se debe incluir una superficie, justo después de importar la imagen. Esta superficie puede ser creada por elementos externos y cuando se importe se notará que no coincide con la imagen, por lo tanto solo debe traslaparse.

Se recomienda comenzar con los datos estructurales (puntos estructurales y barrenos), se coloca un nombre para no confundirse en pasos futuros con el grupo de datos estructurales que se hayan clasificado siempre y cuando se tenga varios tipos de estructuras en el modelo.

Al insertar cada punto estructural se tendrá una herramienta específica donde se podrá editar la inclinación, la orientación y la georreferencia. Cuando se agregue el primer punto estructural los valores serán mínimos y no se verán a simple vista, después de ello se tomara el último creado y se mejorará la creación de cualquier punto estructural.

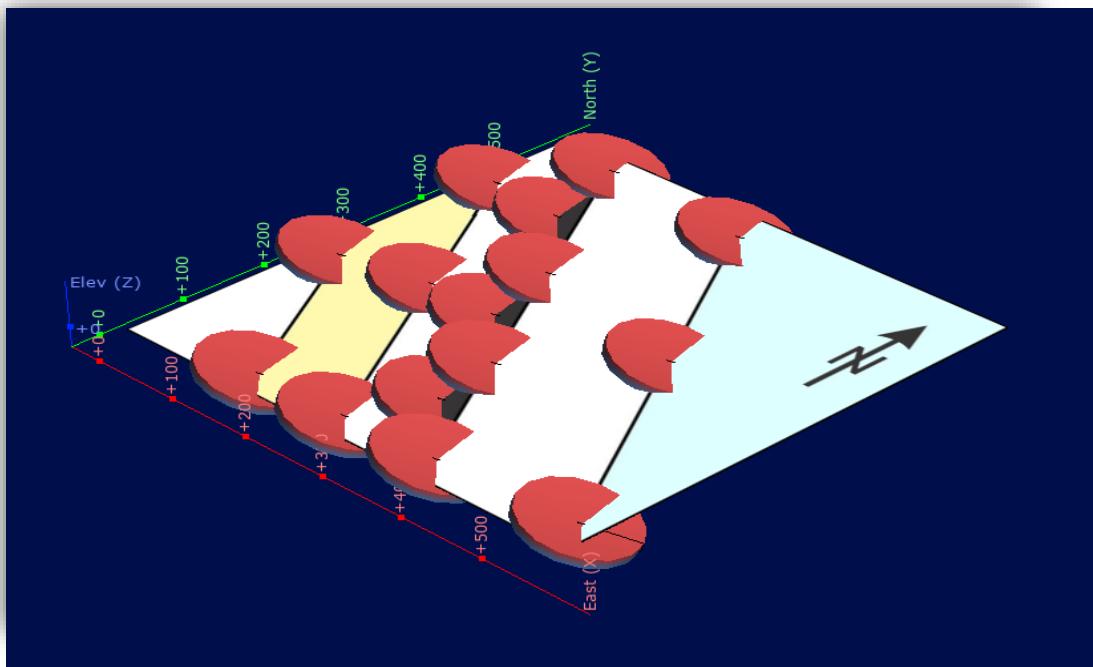


Figura 12. Inserción de datos estructurales sobre imagen tridimensional, elaborada en software especializado de modelado geológico tridimensional.

Así se deberá repetir con cada uno de los puntos que se quieran contener y es importante tener varios para que el procesamiento de la superficie terrestre sea lo más real posible. Se finalizará este procedimiento con los datos estructurales dentro del modelo base. (Figura 12)

Al importar los mapas, imágenes verticales, agregar datos geológicos traducidos digitalmente como datos vectoriales, diseñado de polilíneas de digitalización en mapas geológicos, creado y/o importado de datos estructurales, toca el turno de delimitar las extensiones geográficas del modelo geológico.

Estas extensiones están determinadas por las imágenes importadas y georreferenciadas, como las que se mencionaron en párrafos anteriores, se pueden usar todo tipo de imágenes (también satelitales o mapas completos), para delimitar las fronteras geográficas que se realizará en procesos posteriores a este. La composición de esta característica es una caja en blanco, o un recipiente vacío; en términos de software de modelación geológica tridimensional sería el modelo base o el modelo genérico. (Figura 13).

Es en éste donde estarán contenidos todo tipo de información geológica que puede recabarse en estudio de campo o en los mapas digitales que serán utilizados como guía y generarán elementos tridimensionales geológicos como pueden ser datos estratigráficos, distintos tipos de roca en un término general, puntos estructurales que conformen fallas, planos de falla, los cuales crearán bloques tridimensionales que serán indicados por el tipo de roca que se le vaya a asignar o mostrará fallamiento de la corteza terrestre, entre otras cosas todo dentro del modelo base.

Para que el programa de cómputo haga visualizar el modelo base deberá tener la función de 'extensiones de los modelos' o también la de crear 'un nuevo modelo geológico'; dentro de esta función se deberá visualizar la caja vacía semitransparente que envuelva a la imagen tridimensional y con ella estará

acompañada de varios pivotes que indicarán su extensión a lo largo, a lo ancho y a lo alto, que sería respectivamente las coordenadas x, y, z. En otras palabras, en direcciones N-S, E-W, y el subsuelo.

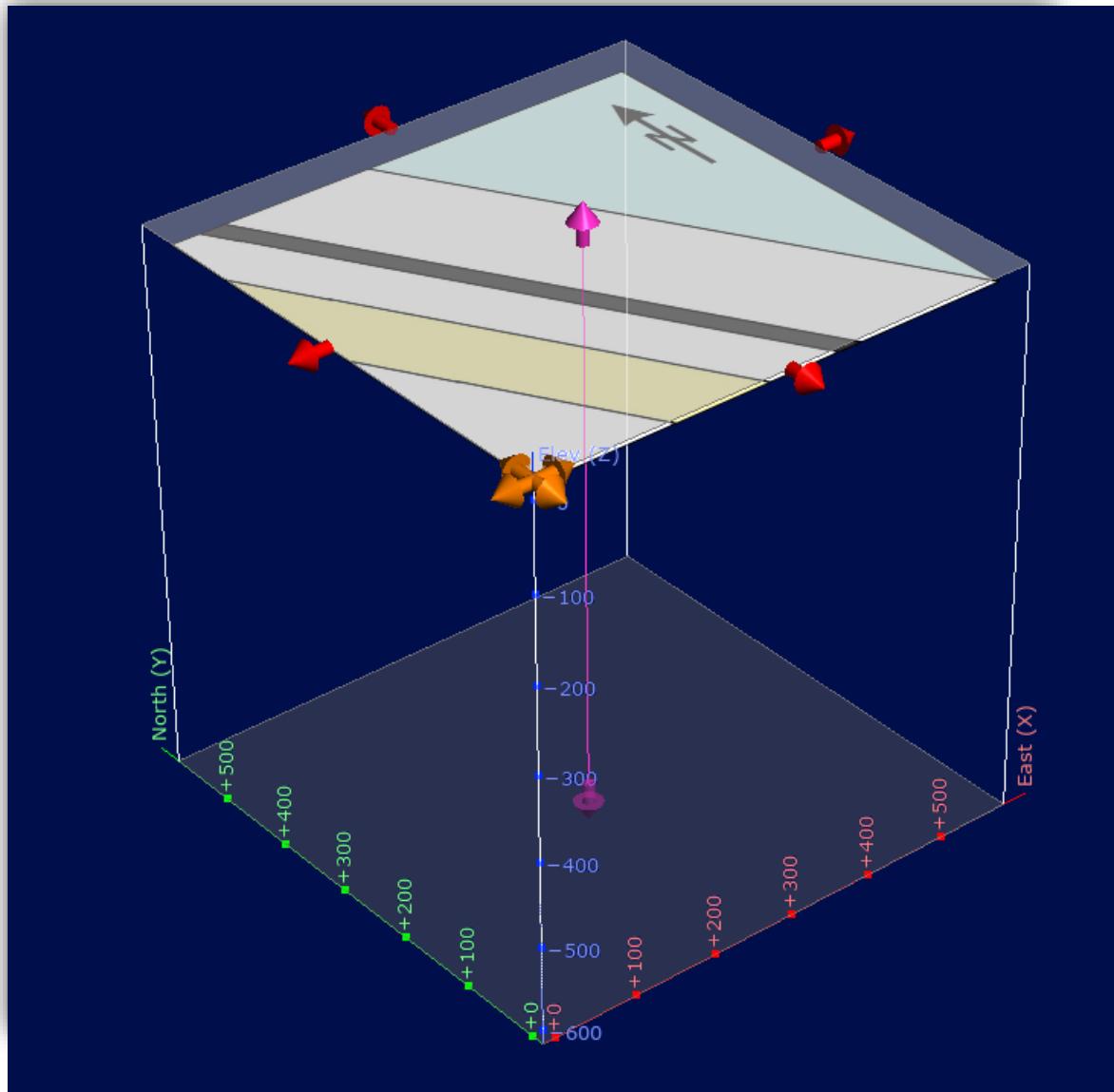


Figura 13. Extensiones geográficas de mapa de clase del modelo base elaborado en software especializado de modelamiento geológico tridimensional.

Las distancias se podrán editar de manera numérica dentro de la función de extensión, se podrá también modificar con movimientos de arrastre del mouse informático sobre los pivotes que acompañan la caja semitransparente.

Las medidas pueden crearse excediendo las imágenes usadas de los mapas como referencia, pero cabe señalar que entre más amplio sean estas dimensiones aumentará el tiempo de procesamiento del modelo durante todo el procedimiento que conlleva este, se recomienda que se use lo más cercano posible a las coordenadas del mapa.

Conforme se esté realizando ediciones dentro del modelo base, si agrega, elimina o se edita cualquiera de estos, el procesamiento del modelo se repetirá todas las veces que se haga una edición dentro del modelo base.

Si el computador no tuviera la capacidad suficiente, se aconseja que se haga desde el principio un mapa con extensiones geográficas cortas para no provocar un sobrecalentamiento con la computadora.

En el caso del subsuelo no exagerar demasiado y basarse en los estudios previos ya sean de gabinete o de campo.

El siguiente punto importante será agregar las litologías que conformen el área estudiada. El software deberá tener una función que se refiera a litologías, pero éstas solo se les pondrán nombre a cada litología y se deberá escoger un color.

(Figura 14)



Figura 14. Cuadro de litologías propuestas para el modelo base, elaborado en software especializado geológico tridimensional.

En pasos posteriores será utilizado por el mismo programa para crear superficies y volúmenes con estos nombres. No se requerirá que se ordenen cronológicamente hasta que se realice la creación de cada superficie tridimensional.

8. Modelos Digitales.

Una vez agregadas las litologías, se le debe indicar al programa especializado que se deben generar superficies tridimensionales dentro del espacio vacío del modelo, relacionando cada nombre a cada superficie, de igual forma se pueden tomar los datos estructurales con las características del tipo de roca adecuado. Para la mayoría de los programas se tienen en cuenta las siguientes posibilidades:

- Depósito
- Erosión
- Intrusivo
- Vena
- Superficie estructural.
- Sistema de venas.
- Estratigrafía.

Cada una de las litologías creará una superficie, el programa deberá incluir una herramienta que se le debe indicar de seleccionar la litología más joven y enseguida se indique cual es la litología siguiente.

Este proceso pareciera muy obvio pero en la creación de cada superficie es un procedimiento básico que se debe tener sumo cuidado y ordenado porque si después de crear la superficie no está correcta la asignación de cronología se debe regresar a este punto para corregir esta característica. Otro punto a tener en cuenta es que a pesar de que es obvio este paso y esta corrección, un modelo complejo y bastante trabajo suele presentar muchas incongruencias respecto al estudio original y para llegar a una interpretación tridimensional que coincida con el trabajo previo, se debe revisar una a una la creación de la superficie. Confirmar cada corrección por una superficie en específico conlleva a procesar todo el modelo geológico tridimensional del modelo base.

En esta herramienta se deberá tener la opción de agregar datos estructurales, para asegurarse que coincidan, la superficie, los datos estructurales y la litología deberían tener el mismo nombre o al menos uno que los relacione para ejecutar esta operación lo menos complicada posible.

Mientras todos estos puntos estén completados y dependiendo de la extensión y los elementos agregados se creará el modelo geológico tridimensional con una superficie. (Figura 15)

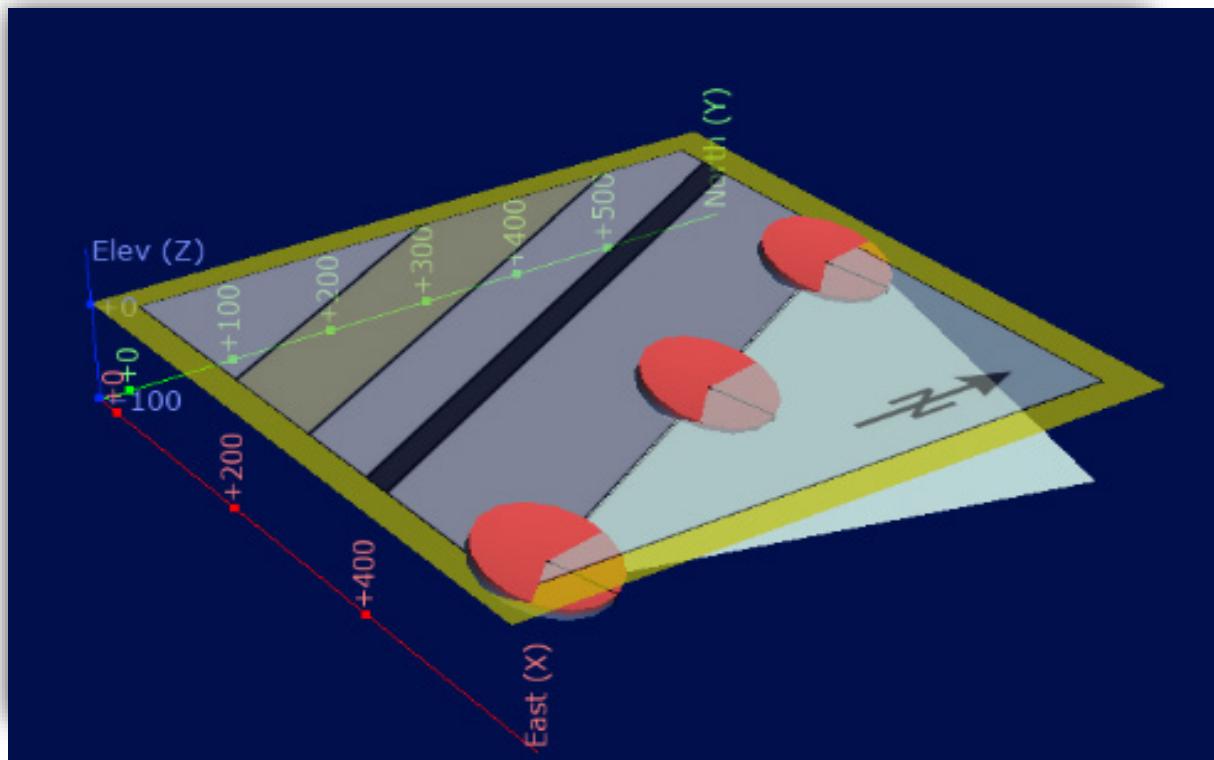


Figura 15. Datos estructurales integrados a la superficie dentro del modelo base, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

Tener en cuenta que una superficie tendrá dos colores, cada uno de un tipo de roca y se colocará en la parte superior e inferior de la superficie. Hay que recordar que se puede asignar el dato estructural adecuado para cada litología. Previamente se debe tener una clasificación por litología, en caso de ser necesario tener preparadas las de cada fractura que esté presente en la zona de estudio.

Conforme se vayan agregando una litología sobre otra se irán creando superficies con el detalle que entre ellas debiera considerarse que los colores sean idénticos (Figura 16). Esto hará que más adelante en el procesamiento informático se crea un volumen que ocupe el espacio entre las superficies.

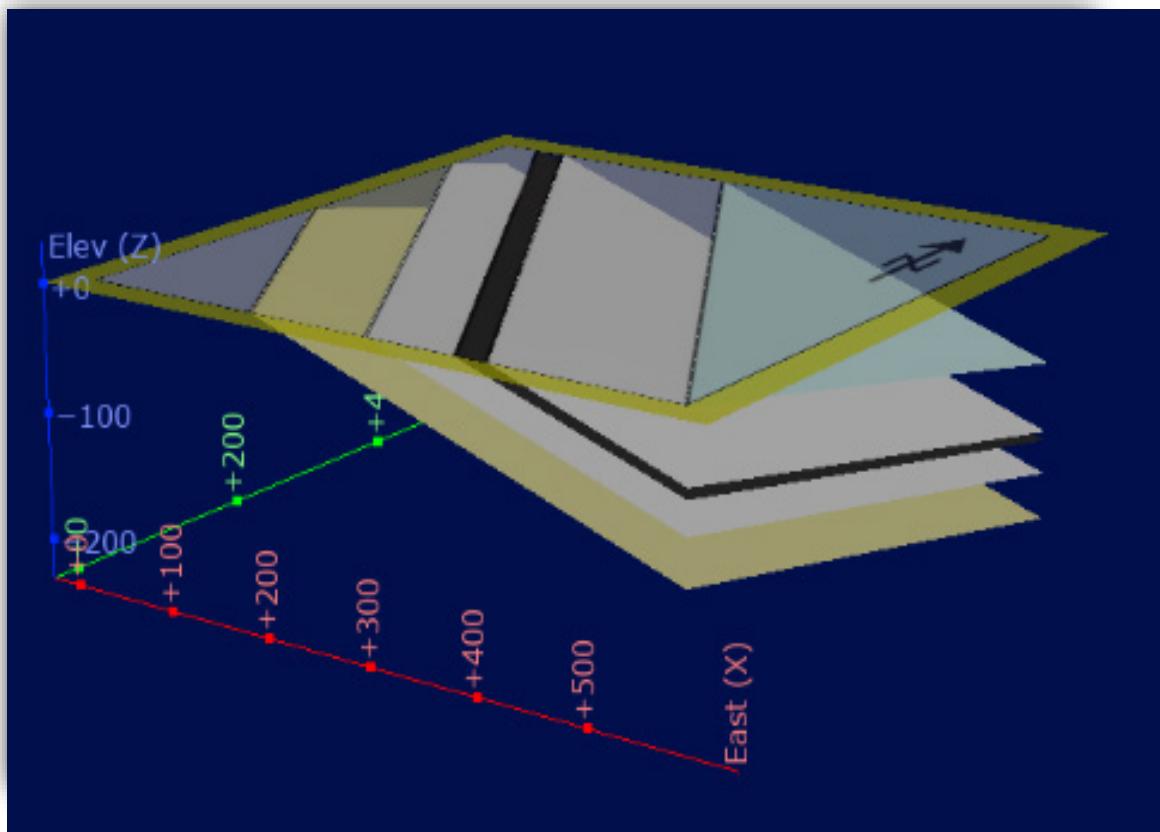


Figura 16. Superficies creadas a partir de datos estructurales de superficie elaborados en software especializado de modelado geológico tridimensional.

Sin embargo, no siempre es así y comúnmente dependiendo del dato estructural en el que está basado puede tener incongruencias geológicas.

Si de alguna forma el modelo presenta su superficie creada de manera incorrecta y aun cambiando la cronología, la litología o el dato estructural el error estará dentro de la creación del punto estructural, donde el cual uno de los planos del mismo estará invertido respecto a su composición digital.

Dependerá del usuario con su experiencia e interpretación geológica para demostrar que el volumen creado deba tener el color correcto de la litología.

Es importante mencionar que este paso de creación de superficie se estará haciendo y rehaciendo cuantas veces sea posible y definida por el usuario, no hay un límite hasta que el geólogo interpretador esté satisfecho y además conforme se va avanzando respecto a la integración de más datos geológicos, se tendrá la necesidad de hacer y deshacer cuantas veces quiera los volúmenes y las superficies. Por eso es importante tener desde un principio extensiones no tan severas para el computador.

Si se requiere mejorar el modelo con datos en el subsuelo que no estén presentes en el mapa geológico se pueden integrar archivos de barrenación y agregar datos de puntos estructurales por cada litología que tenga una inclinación y orientación.

Los datos de barrenación deberán estar creados con las características previamente mencionadas. El programa de cómputo debe tener una herramienta que asigne a cada tabla el orden para que sea visible dentro del modelo base.

Cuando este importado el archivo de barrenación tridimensional se debe crear una superficie más por cada litología que sea independiente a las superficies anteriores creadas, cuidar su cronología, inclinación y litología. (Figura 17)

Para que se generen los volúmenes y rellenen los espacios entre las superficies se deben activar en la herramienta de 'la cronología de las superficies'.

Al final del proceso se debería tener el modelo terminado con sus volúmenes llenados entre cada superficie respetando las inclinaciones dadas con los archivos de barrenación. (Figura 18)

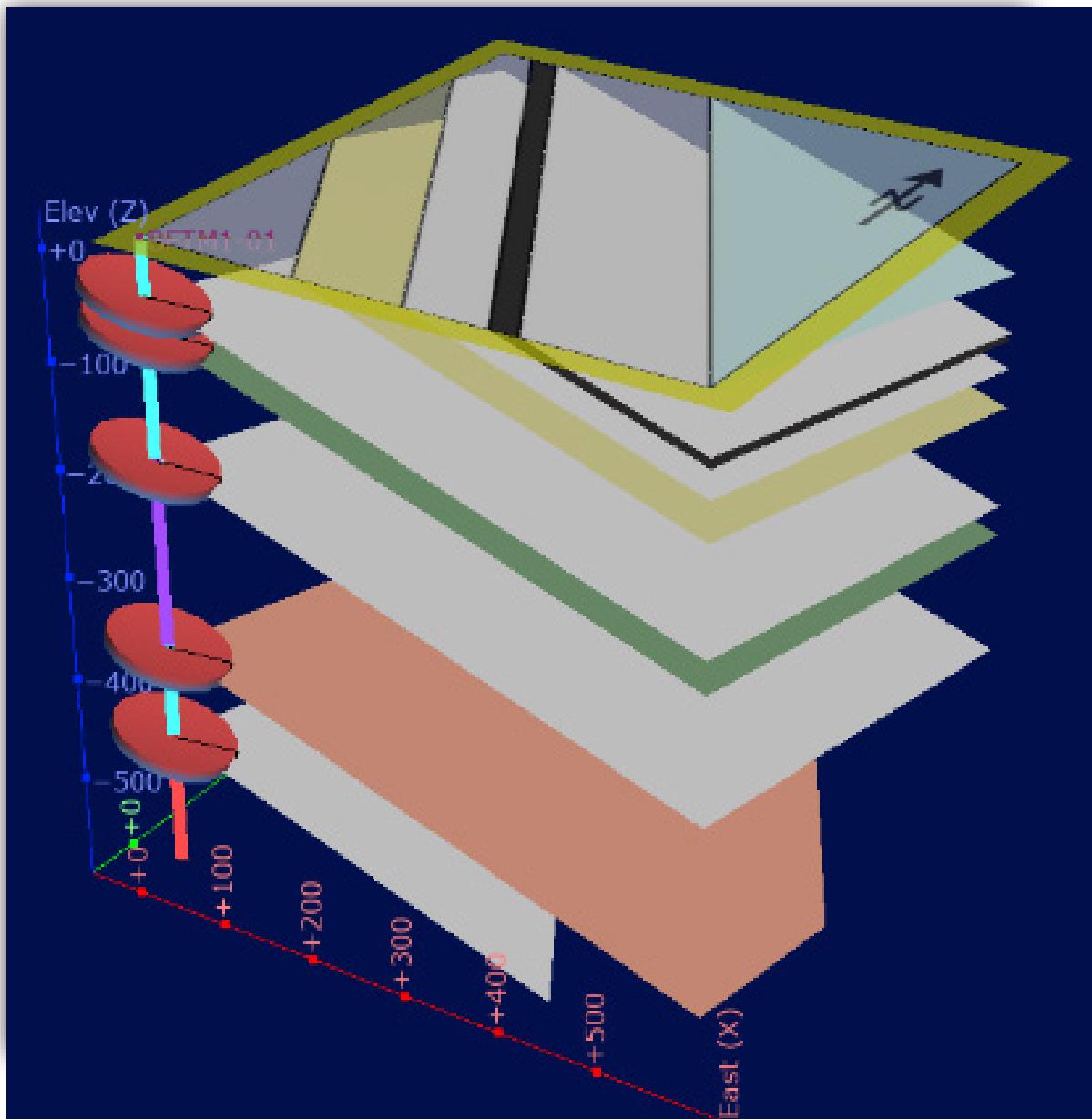


Figura 17. Integración de datos de barrenación al modelo base, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

El grosor de los volúmenes estará condicionado por los datos impuestos en las tablas de datos de barrenación, y por las inclinaciones que se tengan. Cuando existen diferencias de archivos de barrenación dentro de una misma área el programa de cómputo tendrá la oportunidad de generar volúmenes que asemejen un pliegue geológico.

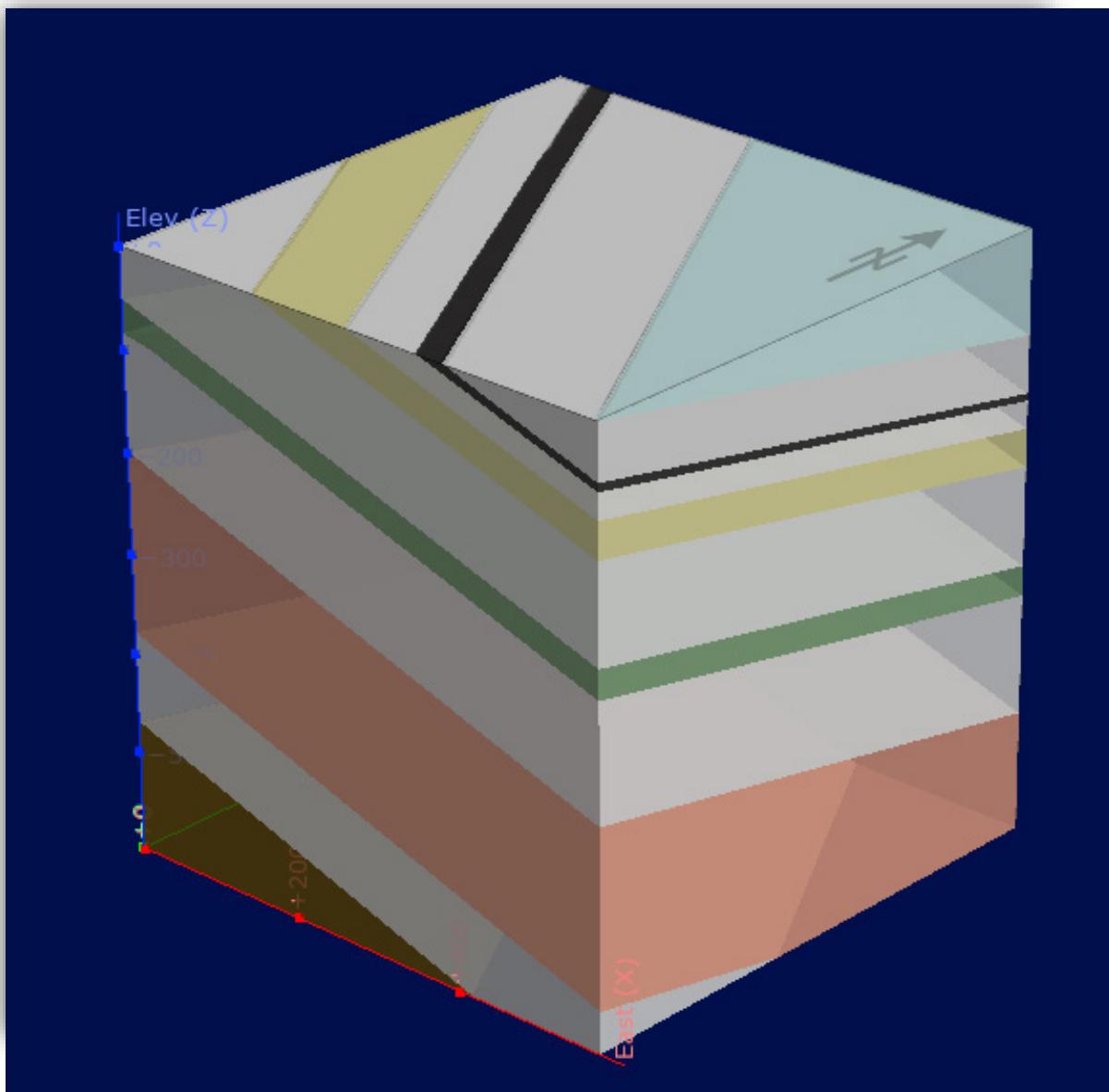


Figura 18. Modelo geológico tridimensional generado por volúmenes elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

En el libro Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural. del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p6) se puede obtener una imagen con características de plegamiento.

La imagen principal para este ejemplo será la cara de vista de planta de tal forma que el Norte esté visible. (Figura 19)

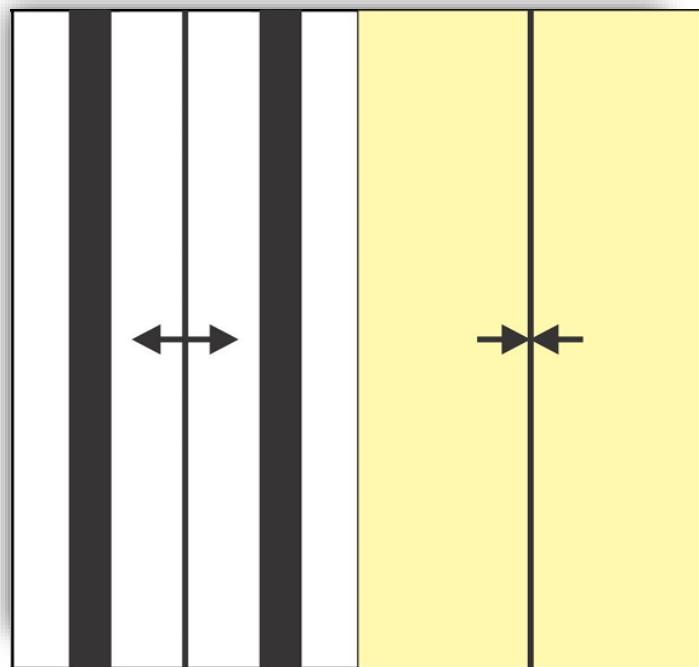


Figura 19. Imagen modificada de Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural. del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p6).

Para importar la imagen en el espacio tridimensional se debe colocar un nombre y se debe tener cuidado con la coordenada 0,0,0. Cuidar que no quede invertida la georreferencia y usar el mouse informático para arrastrar sobre puntos que el programa debe incluir.

No se tendrán coordenadas reales, serán coordenadas arbitrarias. (Figura 20)

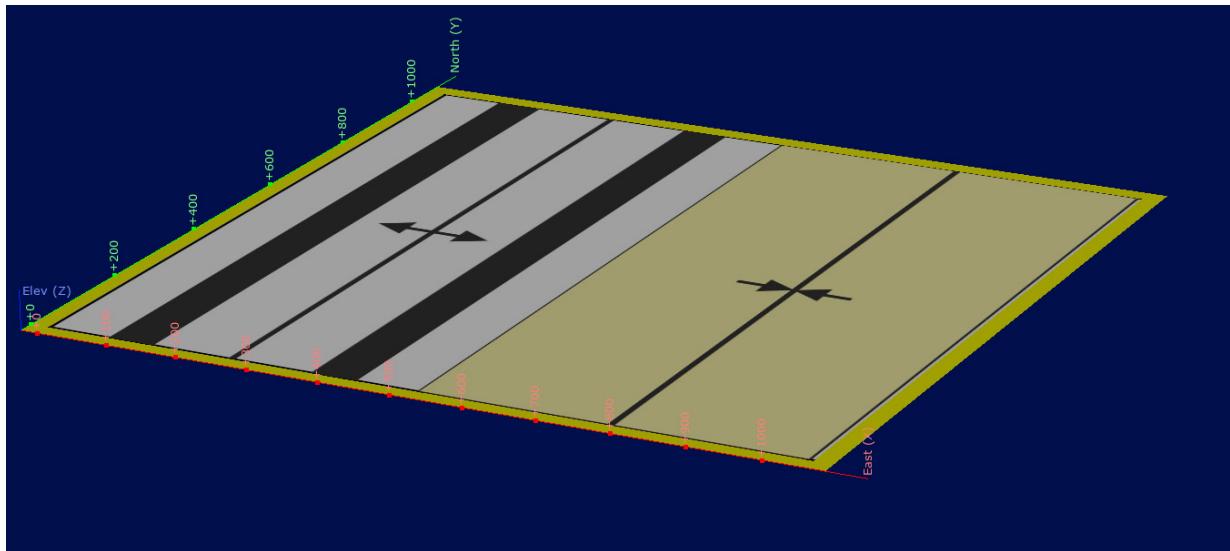


Figura 20. Imagen importada a software especializado geológico tridimensional de Geología Estructural. *Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural. Del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p6).*

Se comienza con los datos estructurales y se coloca un nombre para no confundirse en pasos futuros con el grupo de datos estructurales que se hayan clasificado siempre y cuando se tenga varios tipos de estructuras en el modelo.

Se inserta cada punto estructural y se especifica la inclinación, la orientación y la georreferencia.

Así se debe repetir con cada uno de los puntos que se quieran contener. Se finaliza este procedimiento con los datos estructurales dentro del modelo base como se muestra en la Figura 21.

Se prosigue con las extensiones para crear el modelo base como se muestra en la Figura 22.

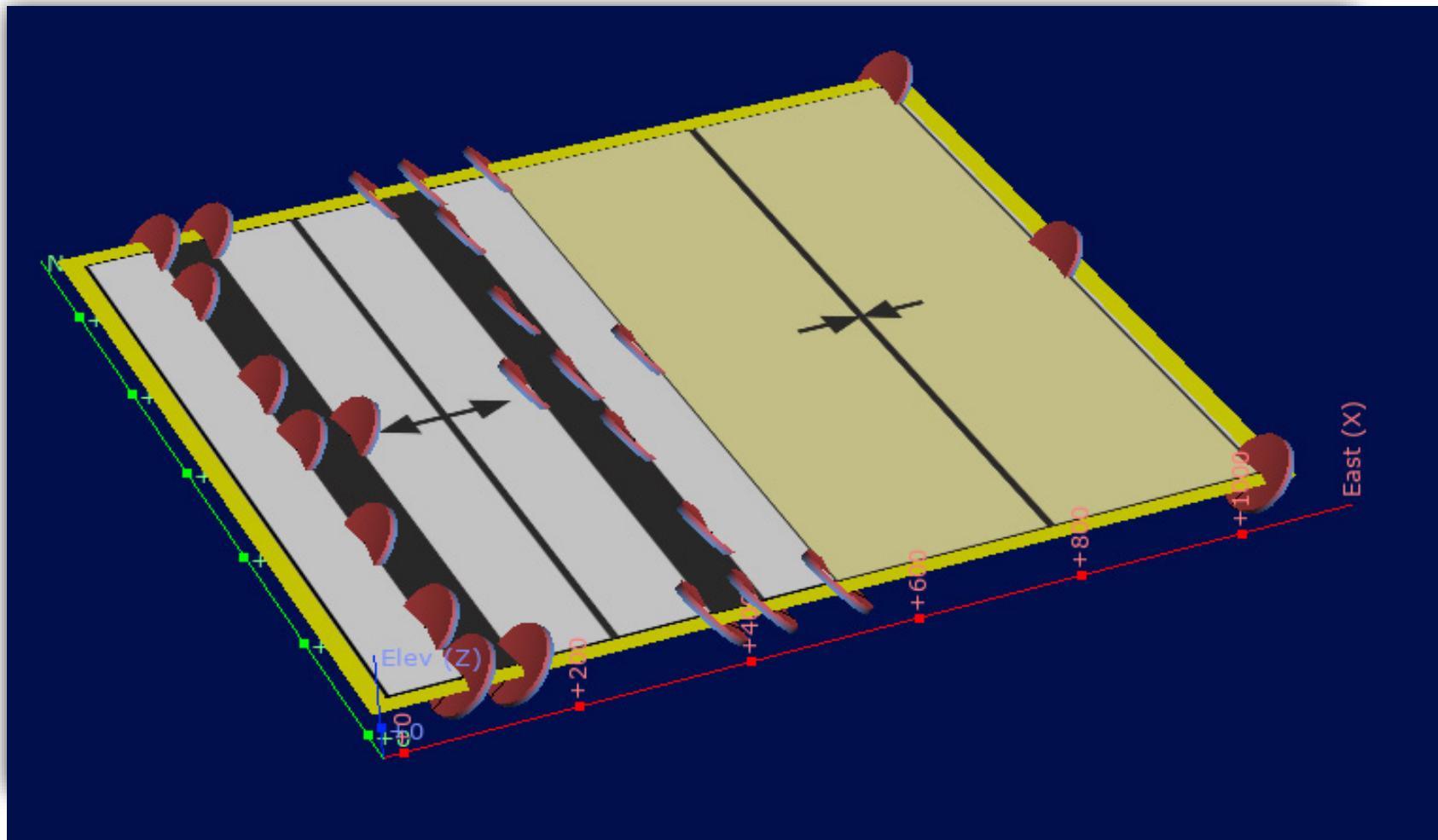


Figura 21. Inserción de datos estructurales sobre imagen tridimensional, elaborada en software especializado de modelado geológico tridimensional.

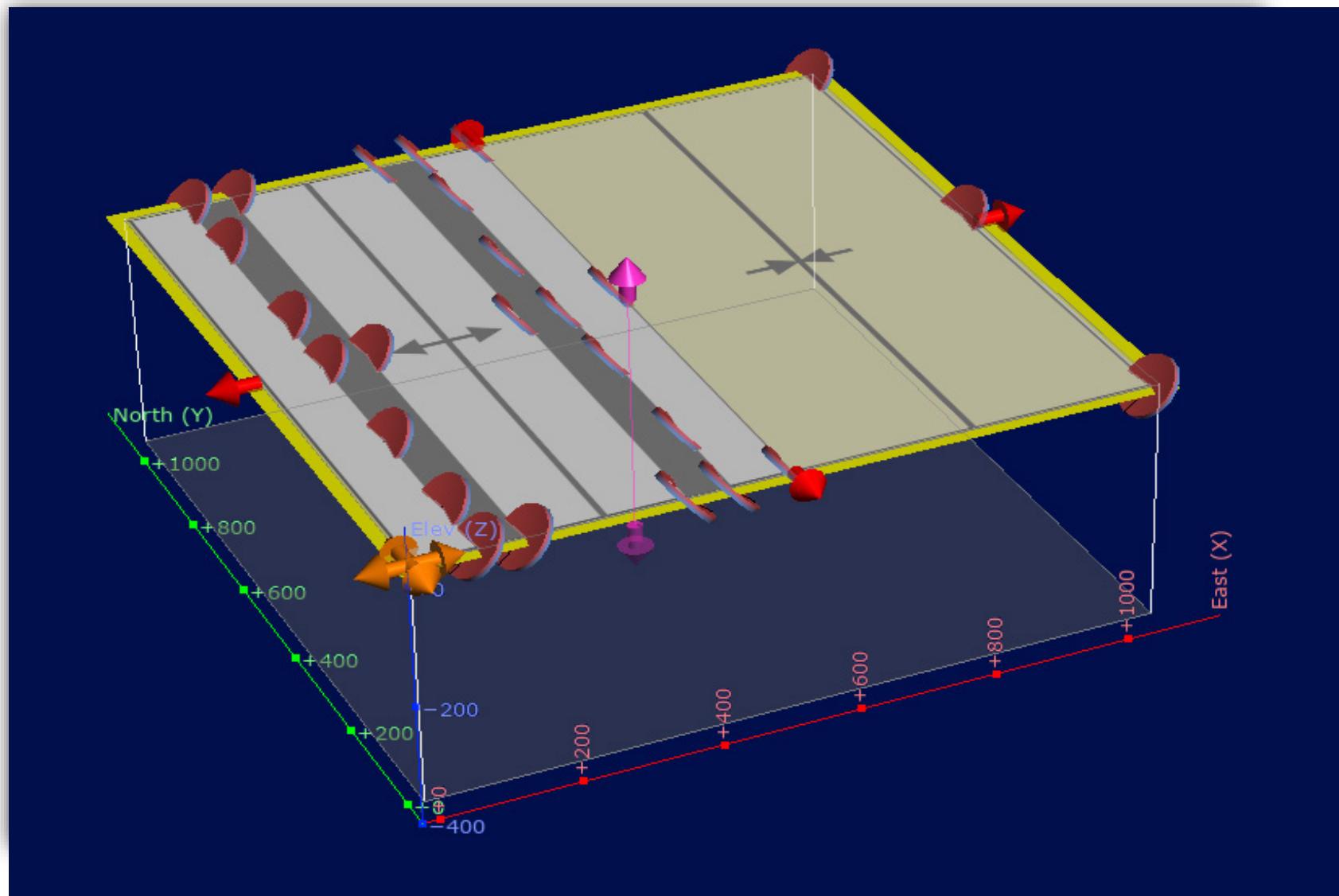


Figura 22. Extensiones geográficas de mapa de clase del modelo base elaborado en software especializado de modelamiento geológico tridimensional.

Se asigna la litología con nombre y color. (Figura 23)

amarillo	
blanco 1	
negro 1	

Figura 23. Cuadro de litologías propuestas para el modelo base, elaborado en software especializado geológico tridimensional.

Se integran los elementos estructurales correspondientes junto con datos de barrenación dentro del modelo base. (Figura 24)

Se crean las superficies con los datos estructurales. (Figura 25)

Se asigna la activación a los volúmenes mediante la herramienta de cronología de las superficies y se crean los volúmenes entre los espacios vacíos para crear, finalmente el modelo tridimensional. (Figura 26).

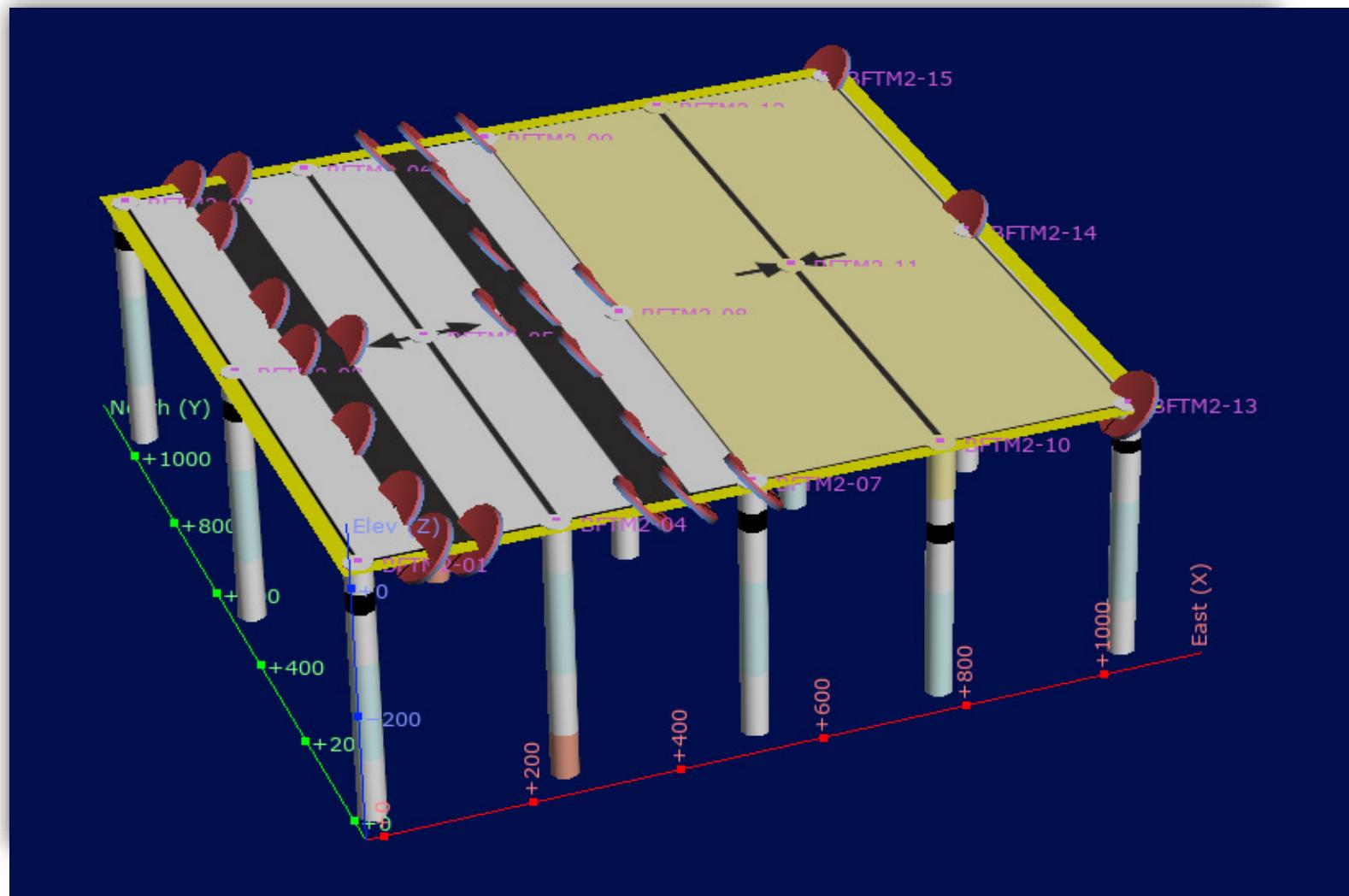


Figura 24. Integración de datos de barrenación al modelo base, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

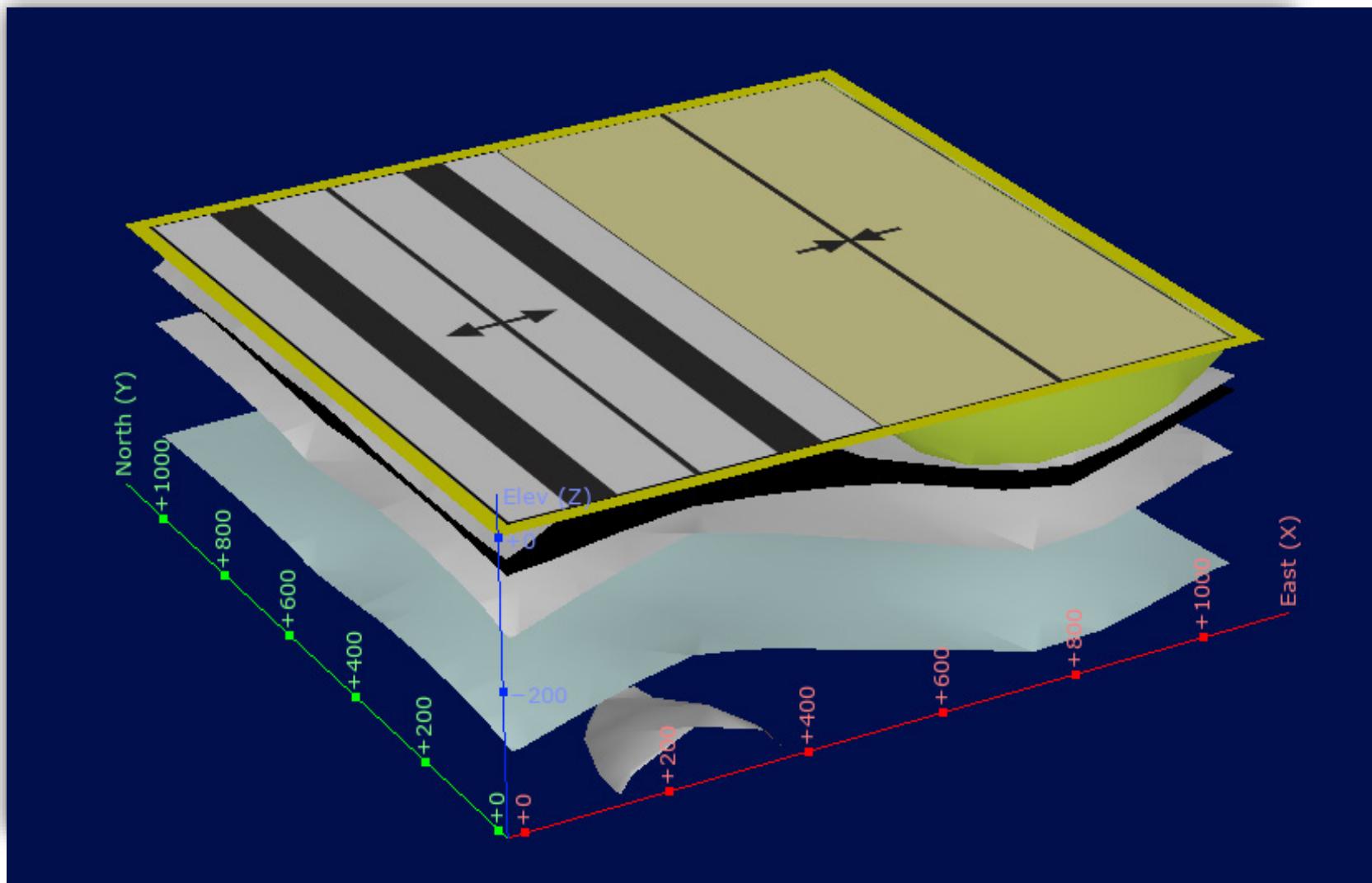


Figura 25. Superficies creadas a partir de datos estructurales de superficie elaborados en software especializado de modelado geológico tridimensional.

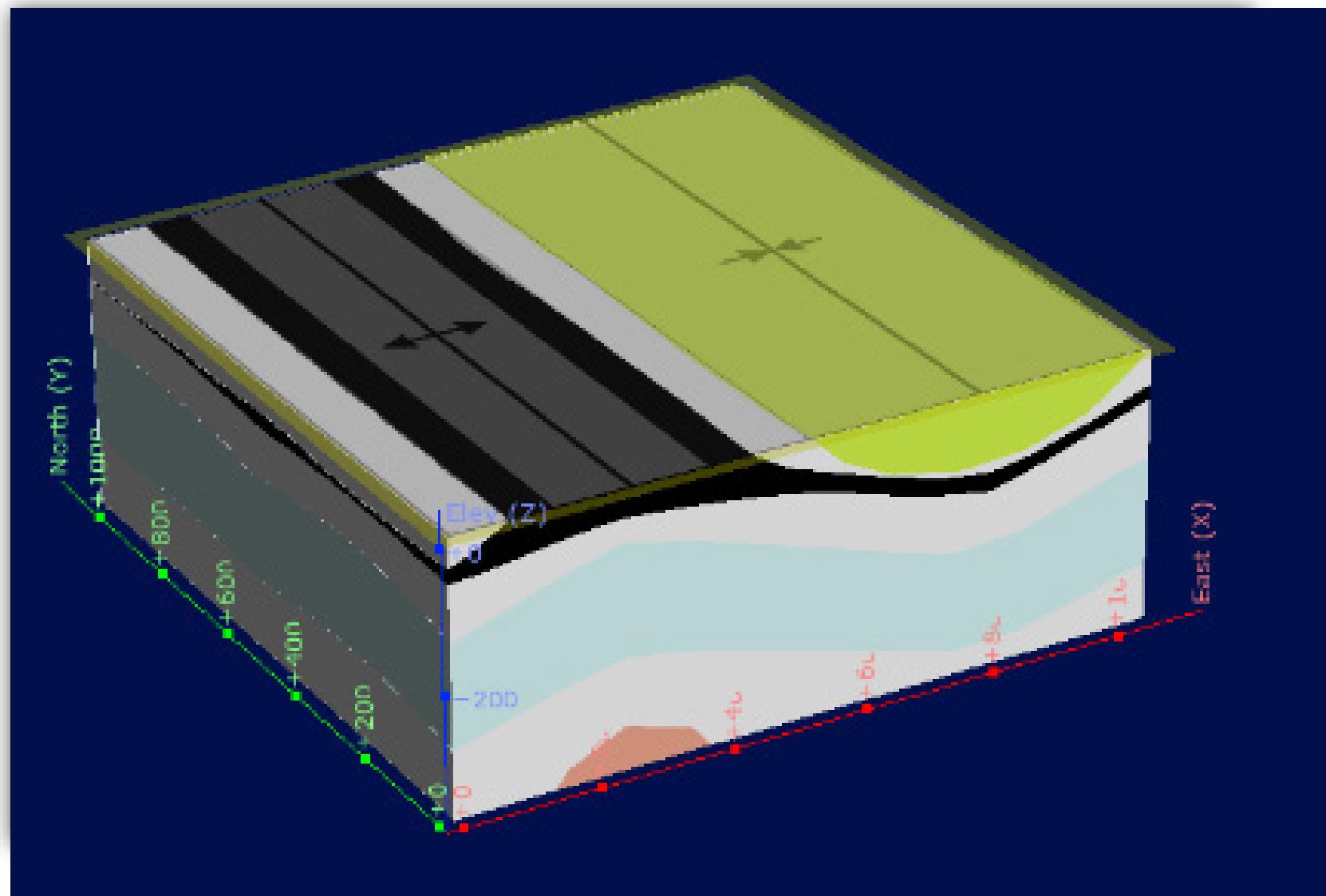


Figura 26. Modelo terminado con imagen en superficie, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

IV. APLICACIONES.

i. Modelo geológico tridimensional de la Falla de San Marcos, Coahuila

Se tiene un mapa geológico tomado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020), *Estimación de desplazamiento mínimos en fallas de alto ángulo: caso de estudio en la Falla de San Marcos, Coahuila, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72 (1), 2020, 4,10. (Figura 27)

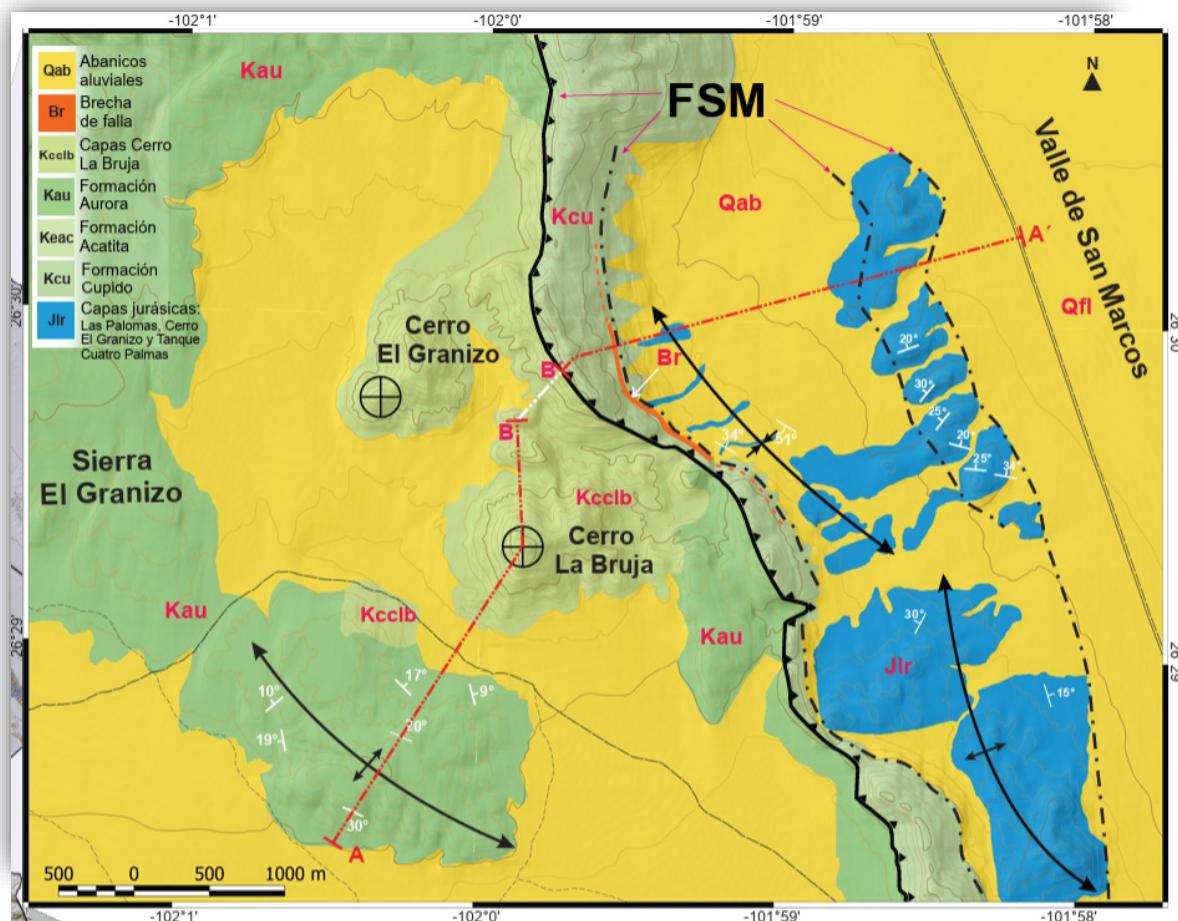


Figura 27. Mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

Se comienza por importar la imagen en el programa especializado de su preferencia. Se cuida la georreferencia con la información que incluye el mapa. (Figura 28)

Posteriormente se crea una superficie tridimensional con ayuda del elemento informático ráster MDE (Modelo Digital de Elevación) con la extensión geográfica de la imagen del mapa. (Figura 29)

La superficie no quedará al mismo nivel que la imagen del mapa tridimensional, se debe realizar el traslape de la imagen con la superficie. (Figura 30)

Agregar datos estructurales que se puedan importar y crear calcando el mapa, los datos que debe manejar el programa en la creación de un punto estructural es la misma que la que se importa al modelo con la diferencia de que los valores se van editando manualmente.

Agregar líneas de digitalización tridimensional sobre la superficie Las características de las líneas pueden ser de la siguiente manera:

- Se ordenan respecto al tipo de roca.
- Pueden sobresalir y quedar debajo de la superficie sin ningún problema.
- Presentan dos líneas por una sola dibujada.
- Indican la dirección del principio y el final del dibujo.
- Presentan nodos para indicar curvatura respecto a la imagen calcada.
- Puede unirse el inicio y fin de la línea.
- Pueden también abarcar la longitud de la extensión de la imagen.

Finalmente, toda la digitalización quedará sobre todo el mapa y cuidar que todos los elementos relacionados entre si, tengan el mismo nombre. (Figura 31)



Figura 28. Mapa geológico georreferenciado tridimensionalmente en software especializado de modelado geológico tridimensional. Mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

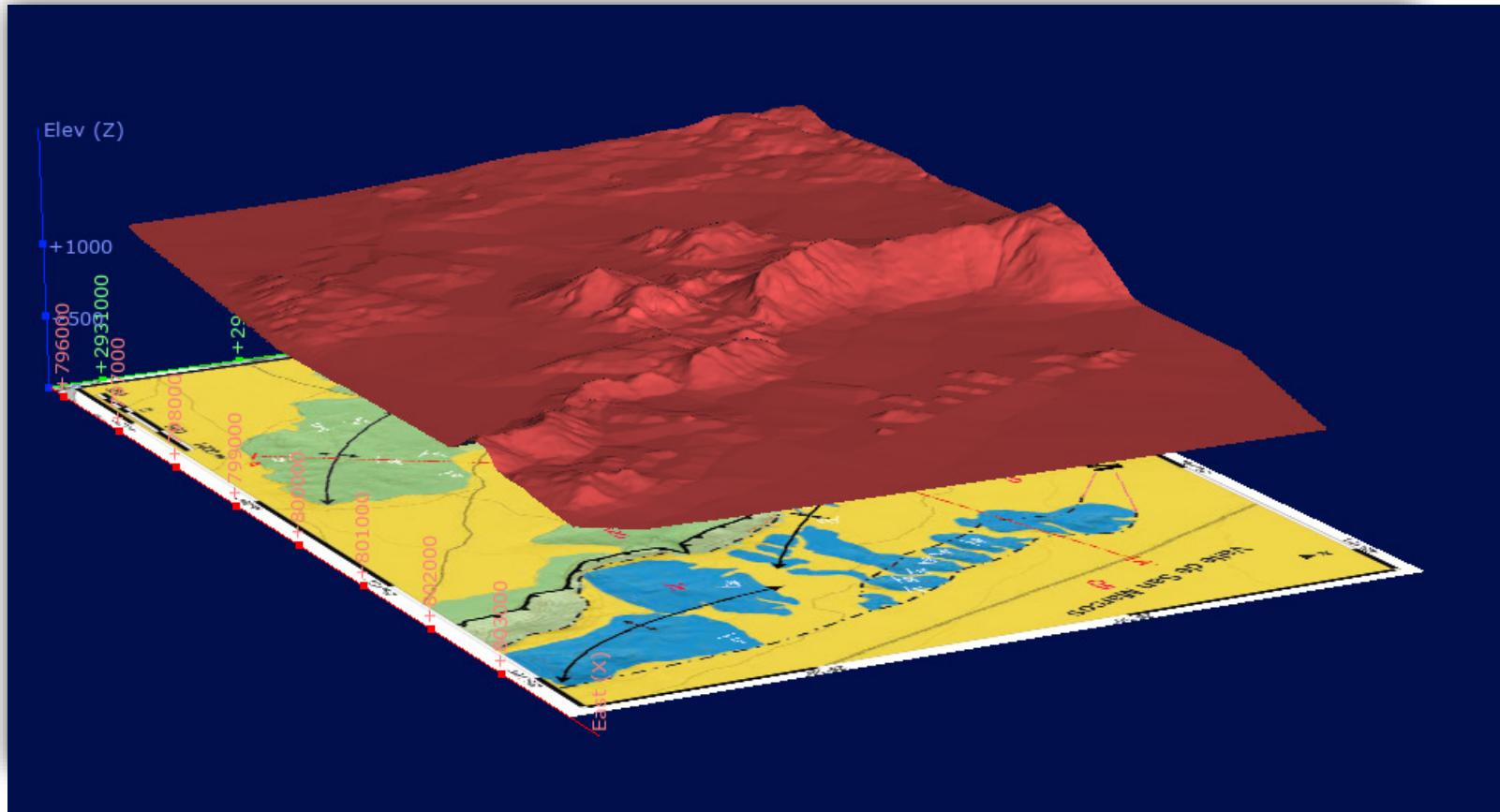


Figura 29. Superficie 3D y mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

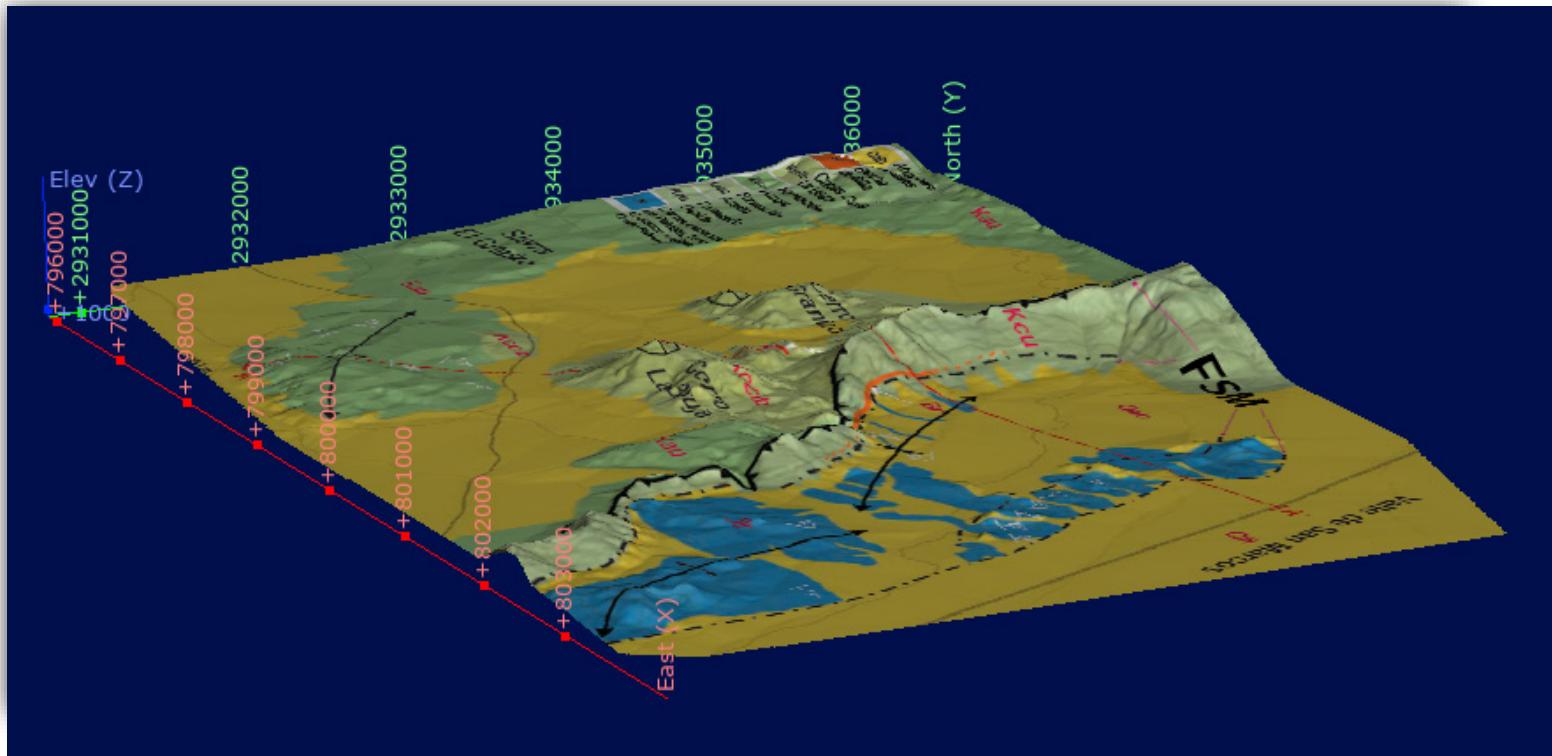


Figura 30. Superficie 3D con traslape de Mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>.

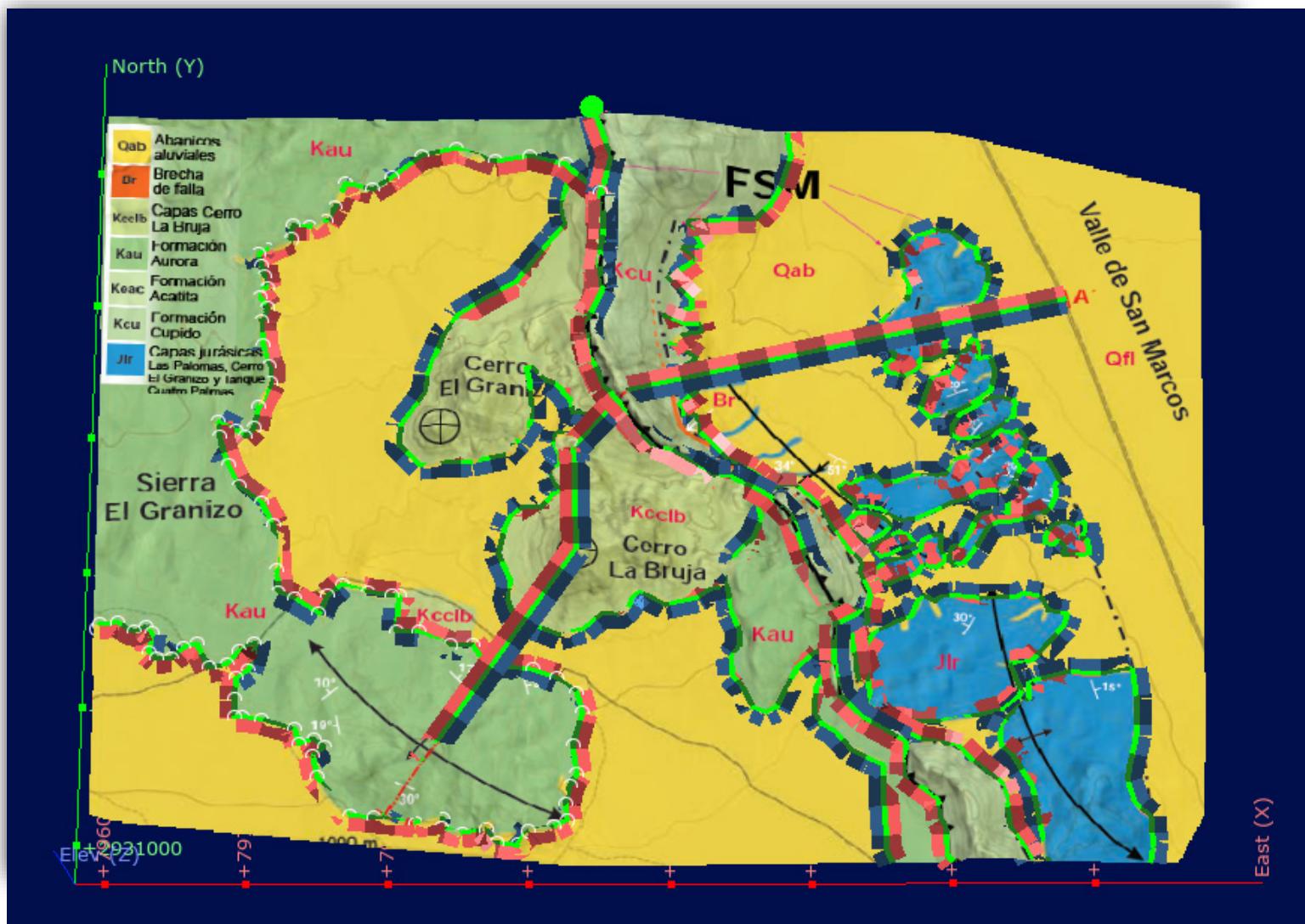


Figura 31. Líneas de digitalización de elementos del Mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

Cuando se tienen los elementos básicos de guía es recomendable continuar con las extensiones del modelo base (Figura 33)

Se recomienda agregar con su respectiva herramienta del programa la litología (Figura 32). Tomar en cuenta la información del mapa geológico o del estudio del cual esta siendo adaptado y cuidar que lleve cada elemento la misma leyenda para un procedimiento práctico.

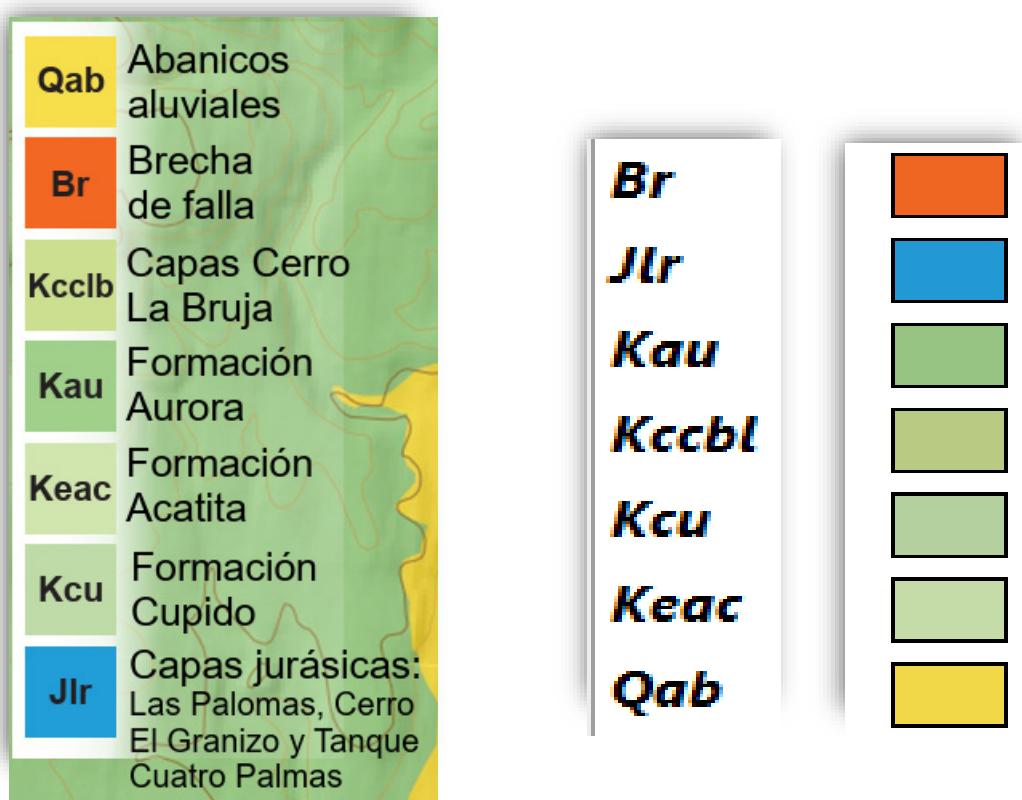


Figura 32. Imagen a la izquierda: Litología adaptada del mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>.

Imagen a la derecha: Leyenda propuesta para el modelo geológico tridimensional, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

Agregar con las herramientas del programa especializado las fallas y fracturas que presenta el mapa. Por cada falla o fractura creada se tendrá un plano de falla que será generado tridimensionalmente (Figura 34), si se requiere tener una inclinación específica de este plano se debe agregar el elemento estructural, que se haya creado o importado previamente, para regenerar el plano con la inclinación correcta (Figura 35).

El modelo base se dividirá en bloques independientes cuando se activen en el programa especializado el número de fallas y fracturas que se agreguen. (Figura 36)

Insertar las superficies 3D respecto a la litología que presente el mapa geológico, se debe tener cuidado de colocar la cronología correcta dentro de la herramienta correspondiente. Utilizae las líneas digitalizadas correspondientes a la misma leyenda para usarse como guía en la creación de la superficie. Si se presenta otro dato estructural dentro de alguna litología usarla.

Al activarse las superficies con su cronología correcta se generarán los volúmenes finales para crear el modelo geológico tridimensional. (Figura 37)

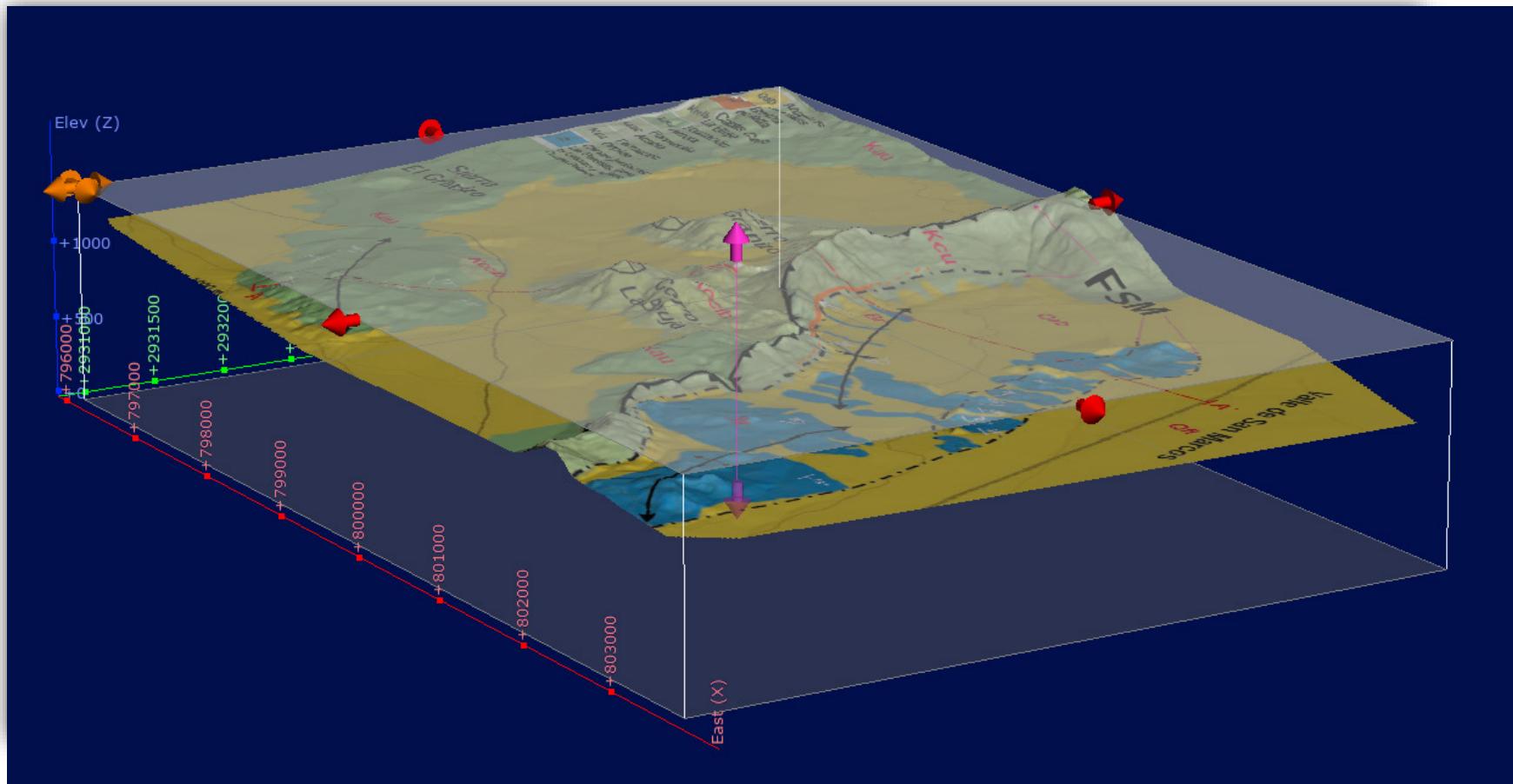


Figura 33. Extensión geográfica del modelo base, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional del mapa geológico de la Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

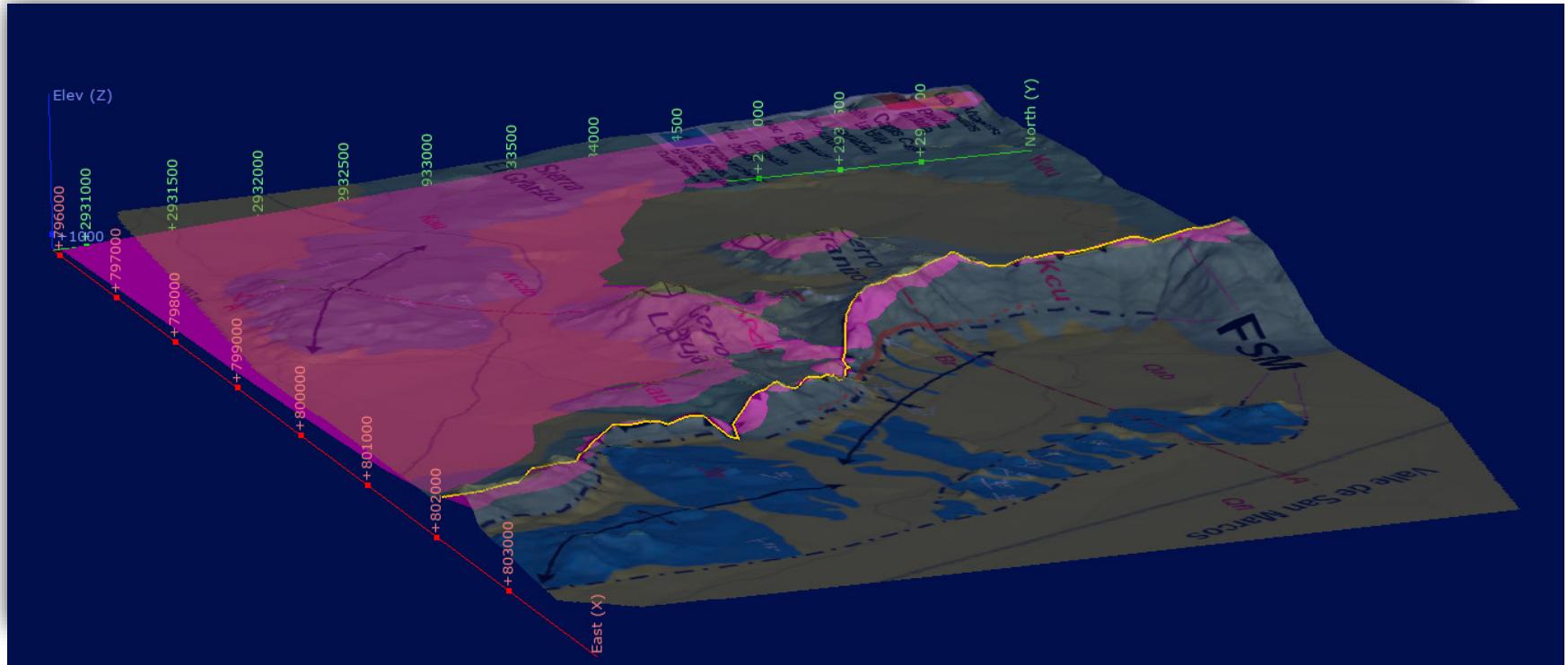


Figura 34. Plano de falla elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional, creado mediante la falla digitalizada del mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

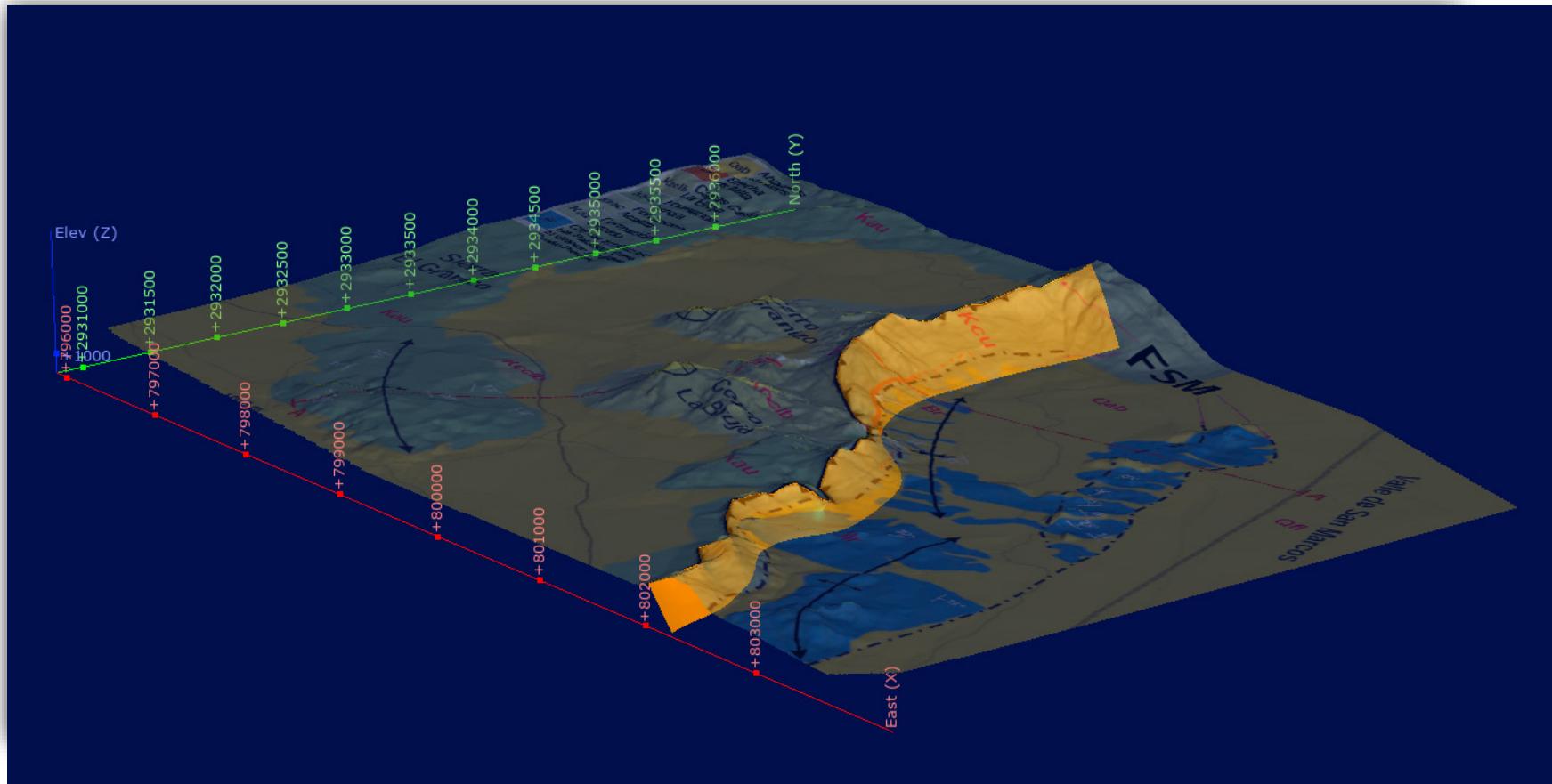


Figura 35. Plano de falla regenerado con datos estructurales digitalizada de mapa geológico de Falla de San Marcos, Coahuila. Adaptado de Alonso-Manuel, Fitz-Díaz, Gutiérrez-Navarro (2020) <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

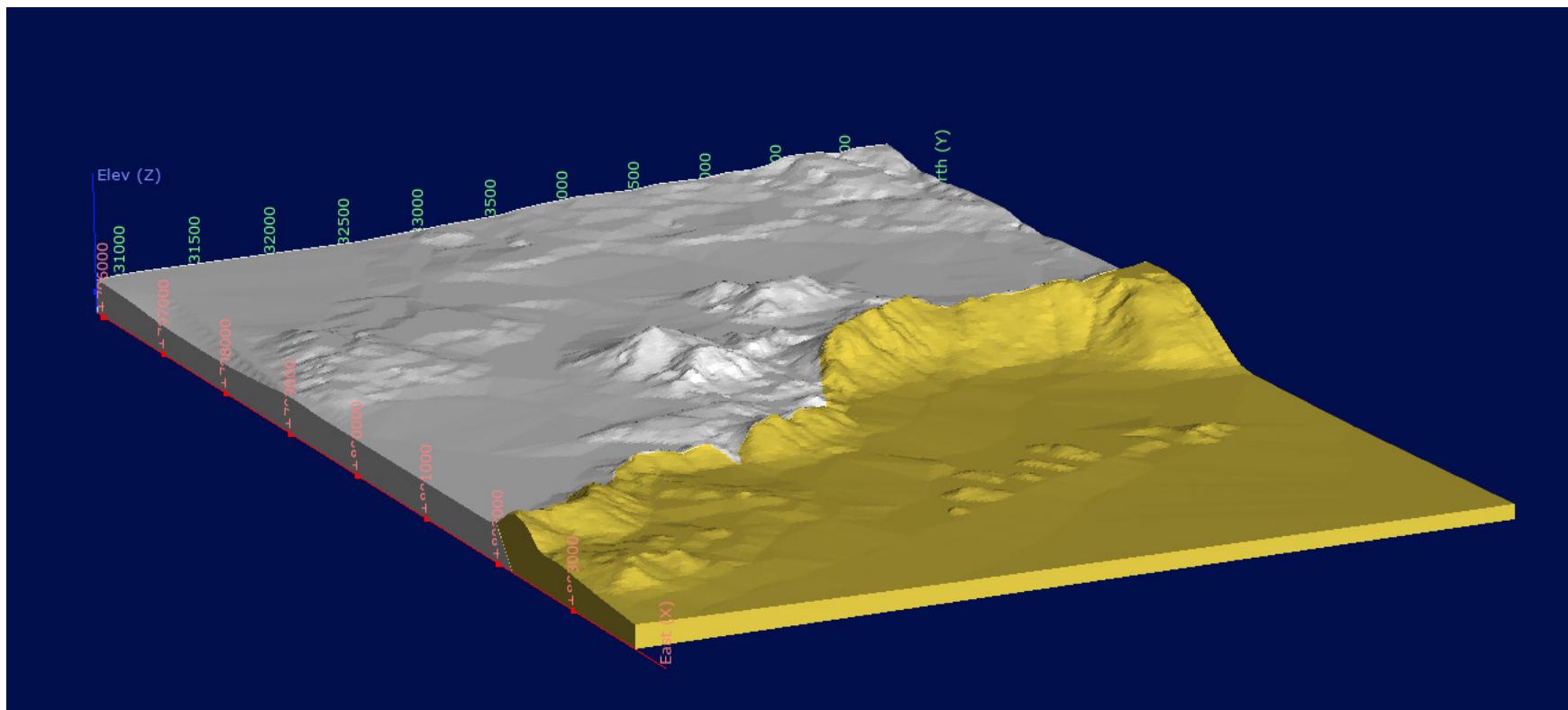


Figura 36. Bloques independientes dentro del modelo base del modelo geológico tridimensional, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

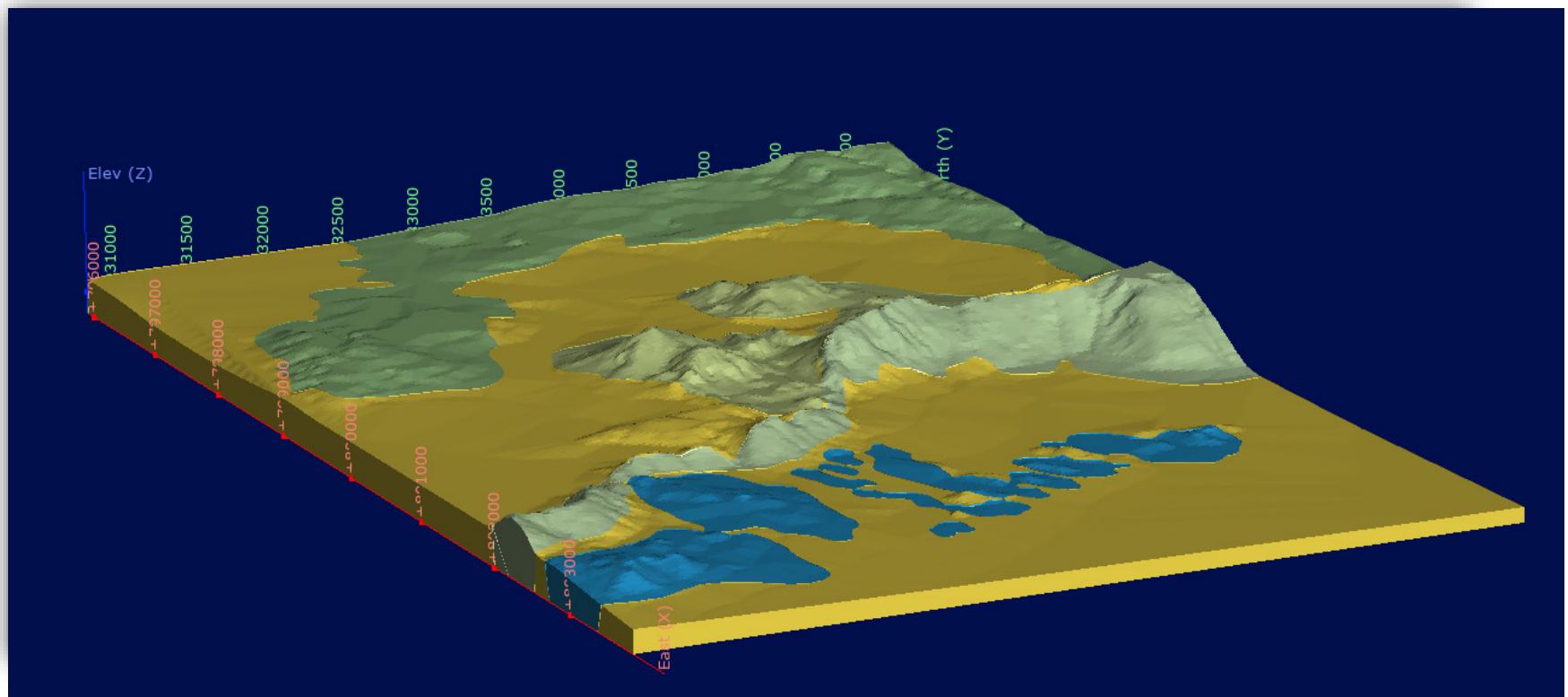


Figura 37. Modelo geológico tridimensional, con los volúmenes finales generados por superficies 3D, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

ii. Modelo geológico tridimensional de San Juan Ixcaquixtla, Puebla.

Se tienen varios mapas de un área de estudio de la localidad de San Juan Ixcaquixtla, Puebla:

- Fragmento de la Carta Geológico-Minera, *San Juan Ixcaquixtla E14-B24*, Puebla y Oaxaca, del Servicio Geológico Mexicano. 2018 (Figura 40)
- Mapa de clase de la asignatura de Cartografía y Geología de Campo impartida por el Ing. José Luis Arcos Hernández. (Figura 41)
- Mapa de fallas y fracturas (Figura 42), proporcionada y modificada de la carta E14-B24.

Se tienen tambien imágenes de secciones transversales (Figura 43) indicadas mediante líneas de sección dentro del mapa E14-B24.

Se importan las imágenes de los mapas en un software especializado de modelamiento geológico tridimensional con la georreferencia del mapa de clase. (Figura 44)

Con un MDE de 50 x 50 píxeles, se crea la superficie tridimensional (Figura 45) con la georreferencia del mapa de clase de San Juan Ixcaquixtla. Posterior a esto se debe traslapar las imágenes de los mapas a dicha superficie creada.

Se puede mostrar solo una imagen tridimensional o varias sobre la superficie dependiendo la digitalización que se realice. (Figura 46)

Se importan las imágenes de las secciones transversales y se usa como georreferencia las coordenadas de las líneas de sección indicadas en el mapa geológico E14-B24. (Figura 47)

Con ello se debe digitalizar las litologías y las fallas y fracturas; se recomienda digitalizar verticalmente litologías, fracturas y fallas sobre las imágenes verticales. También agregar o crear puntos estructurales. (Figura 48)

Con la extensión geográfica del los mapas importados se crea el modelo base. (Figura 49)

Proponer una litología con su leyenda respecto al área de estudio. (Figura 38)

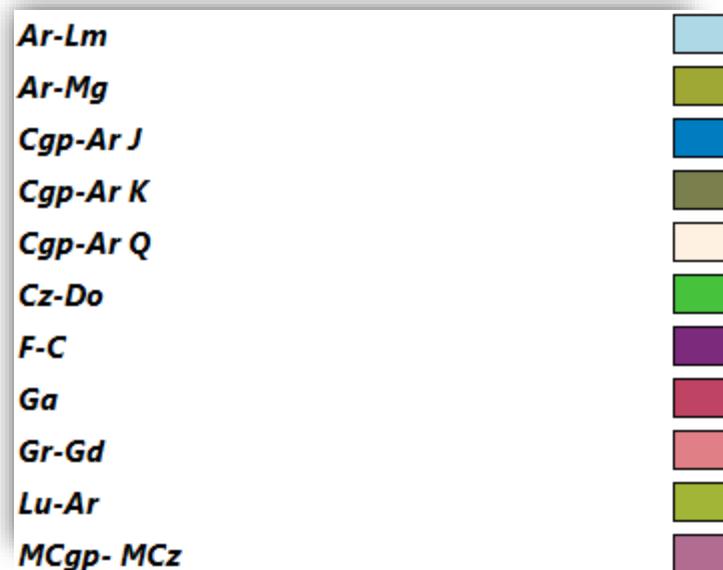


Figura 38. Leyenda propuesta con los nombres de las litologías de la Carta de San Juan Ixcaquixtla.

Crear superficies tridimensionales de los planos de falla y fracturas con ayuda de las digitalizacion sobre el mapa de fracturas y fallas; cuidar su inclinación con los datos estructurales.

Todos los planos de falla tendrán una extensión a los límites del modelo base por lo que no tendrán su extensión respectiva a el mapa de fallas y fracturas. (Figura 50)

El software especializado debe tener una herramienta que ayude a ordenar cronológicamente la temporalidad de las fallas y su aparición en superficie respecto a la orientación geográfica del área de estudio. Por lo que se regenerarán las superficies de planos de falla. (Figura 51)

Respecto a este análisis el programa especializado debe crear bloques que indican los límites de cada uno con los planos de falla que permanecerán activos.

Cada bloque funcionara como un modelo base para una zona en específico y por consiguiente las superficies tridimensionales se harán una por una, bloque por bloque.

El programa especializado nombrará cada bloque de manera genérica, se recomienda otorgar el nombre respecto a la falla dominante y orientación de la misma respecto al área de estudio en cada bloque. (Figura 39)



- Bloque Cosahuico-Lobo
- Bloque NE Pozo Hondo
- Bloque NORTE
- Bloque Norte Oeste
- Bloque Norte-Este
- Bloque Oeste
- Bloque Santa Cruz - Cosahuico
- Bloque Sur
- Bloque Sur Oeste
- Bloque Sur-Este
- Bloque SW Ocotillo - Totoltepec
- Bloque Zopilote - Santa Cruz

Figura 39. Etiquetas de los bloques.

Este procedimiento se realizó de esta forma por su practicidad, aunque se puede hacer del método inverso (crear las superficies de las litologías, crear los volúmenes y después crear los planos de falla para finalmente ordenarlos cronológicamente y se creen los bloques).

Después de los planos de falla, crear las superficies tridimensionales de las litologías respecto a su naturaleza.

Las líneas de digitalización que abarcan una distancia fuera de cada bloque solo genera volúmenes dentro del bloque donde se trabaje, por lo que se ahorra tiempo y recursos de procesamiento informático. (Figura 52)

Se activan los volúmenes correspondientes con la cronología de las superficies dentro del modelo base.

Esto hace que se creen los volúmenes finales por cada bloque y así tener el modelo geológico tridimensional terminado. (Figura 53)

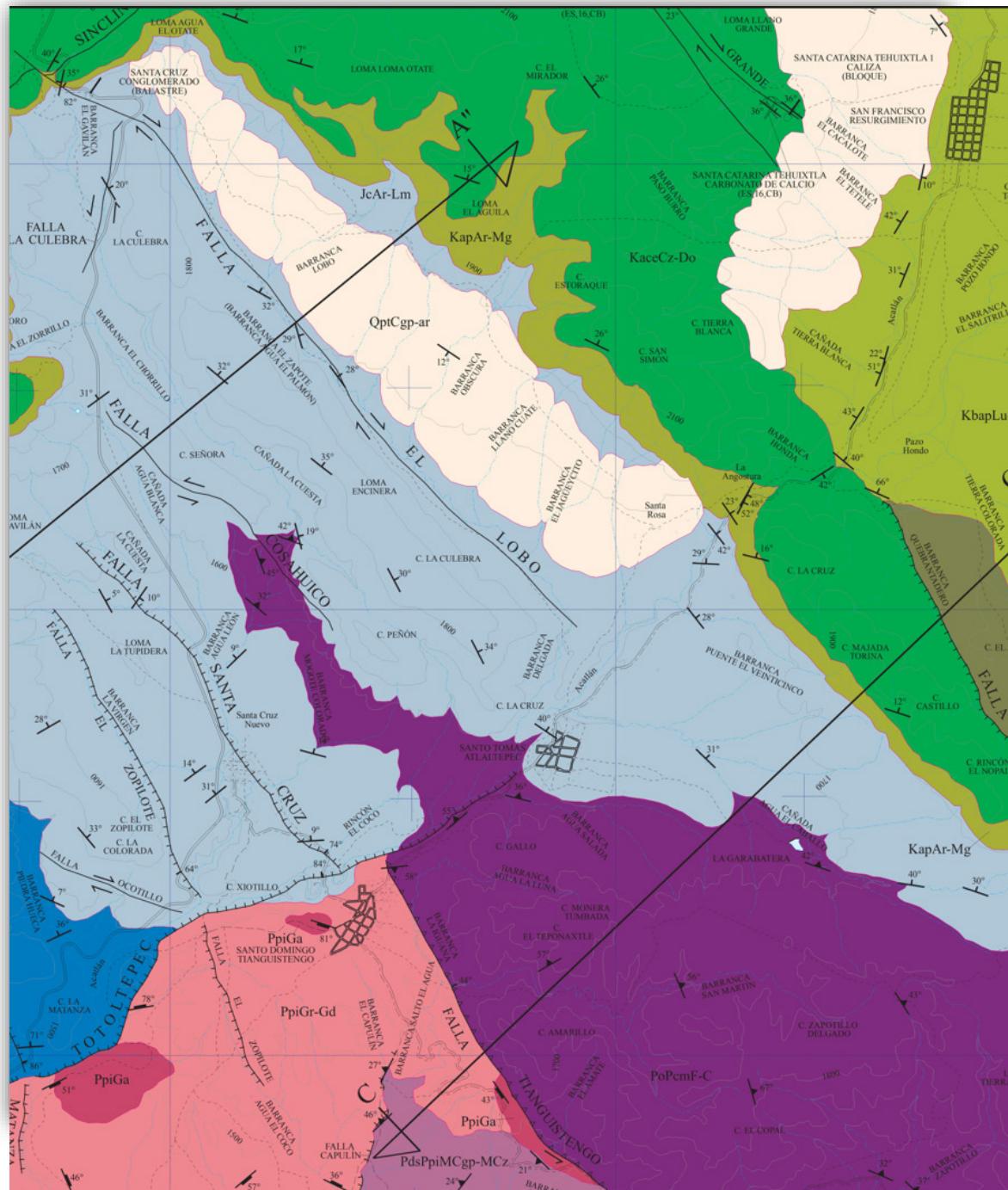


Figura 40. Fragmento de la Carta Geológico-Minera, San Juan Ixcaquixtla E14-B24, Puebla y Oaxaca, del Servicio Geológico Mexicano, 2018.

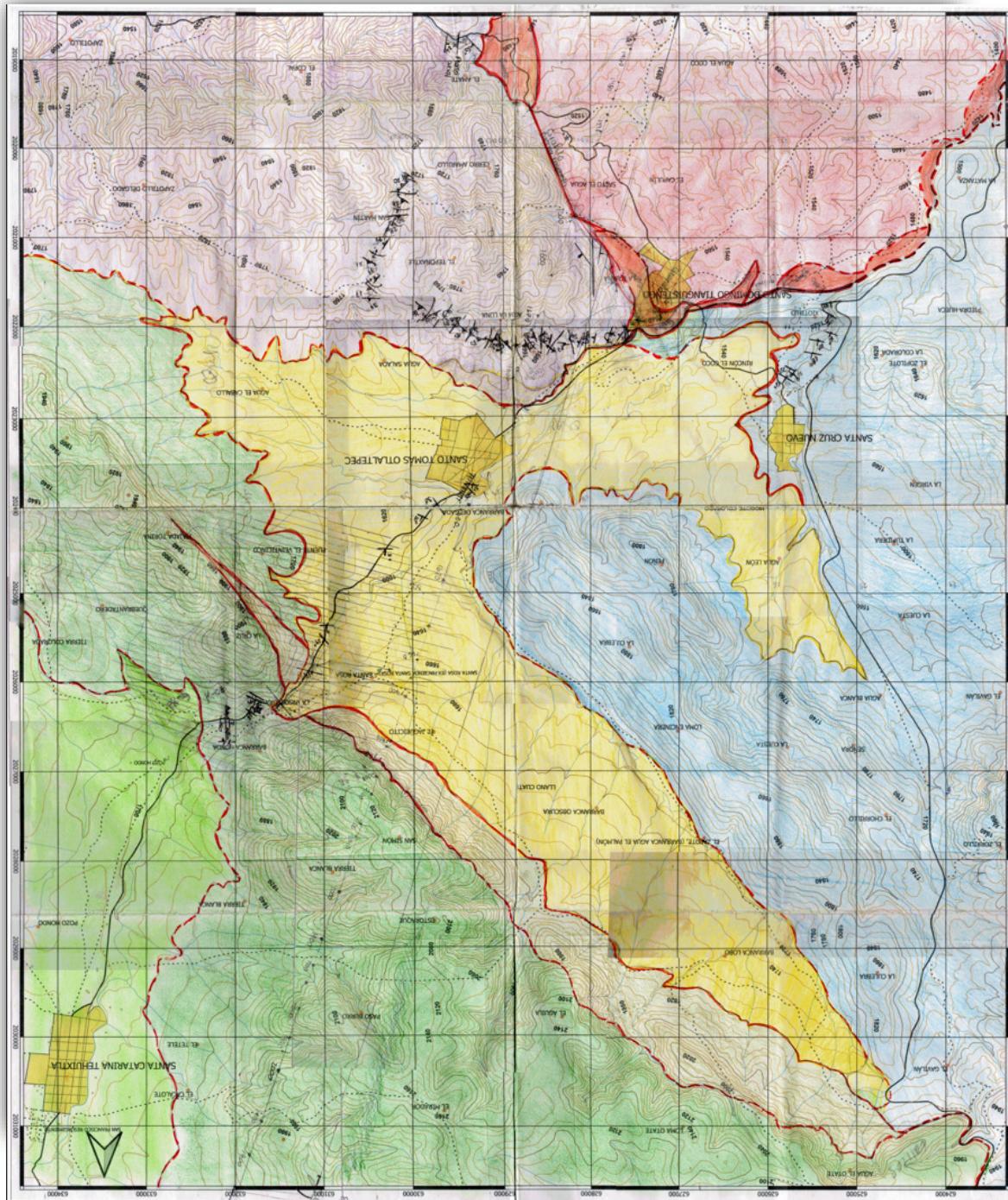


Figura 41. Mapa de clase de la asignatura de Cartografía y Geología de Campo impartida por el Ing. José Luis Arcos Hernández.

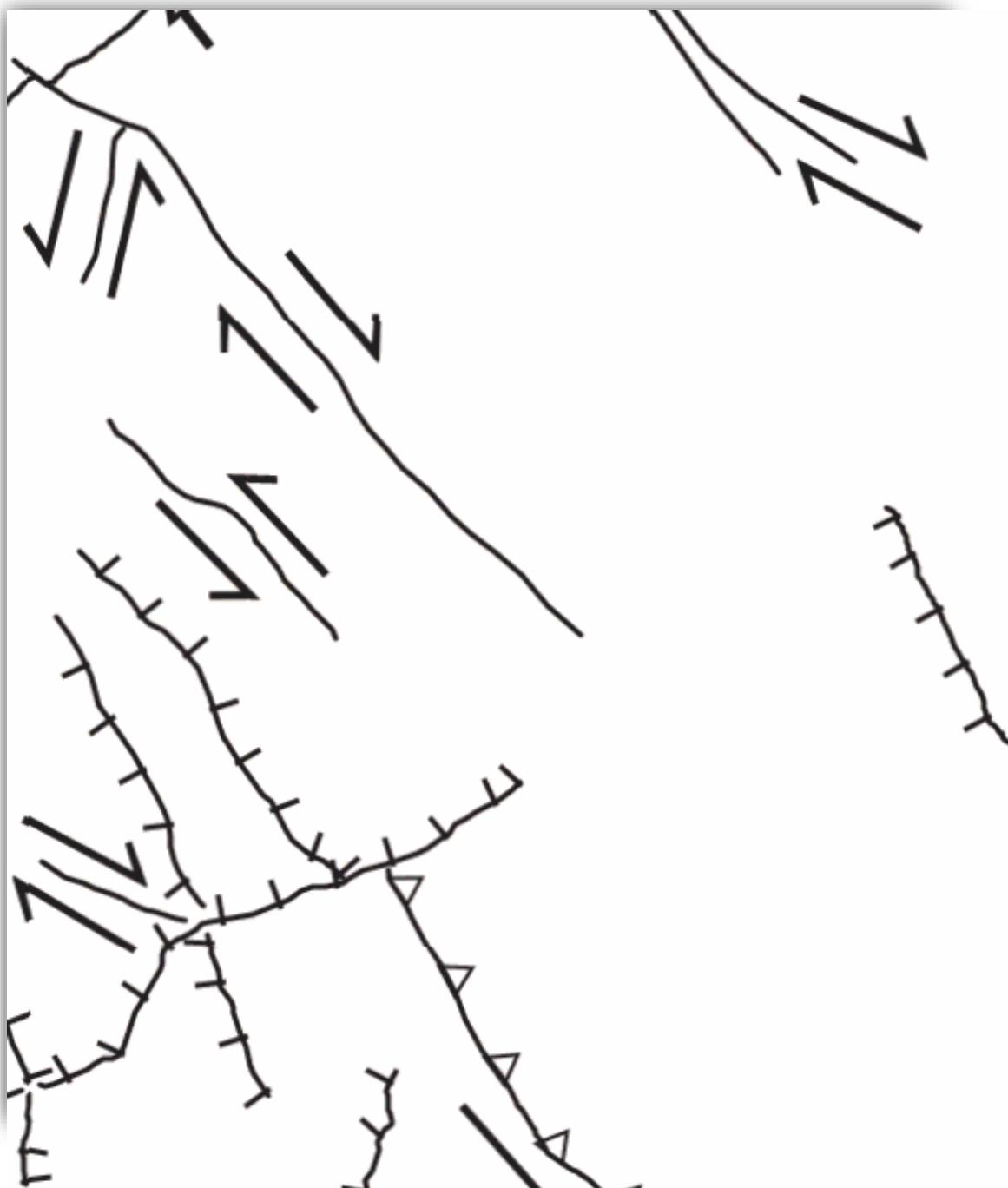
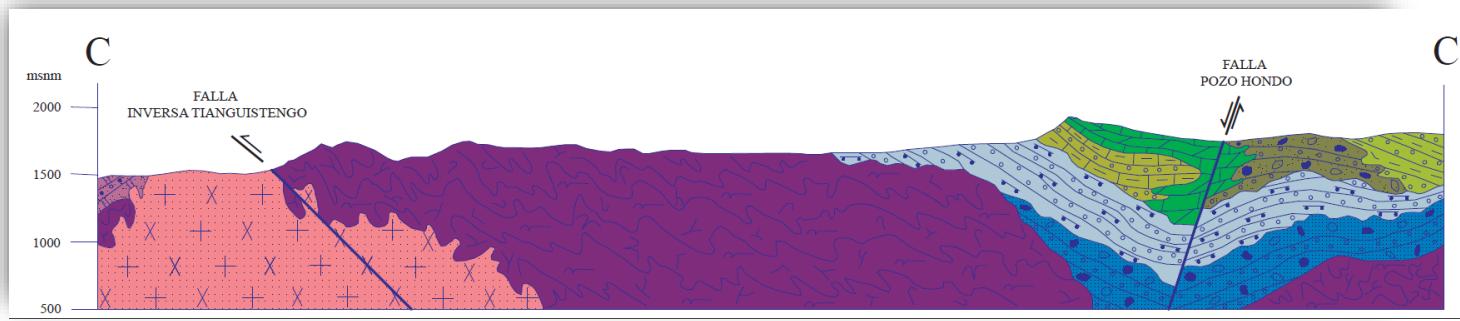
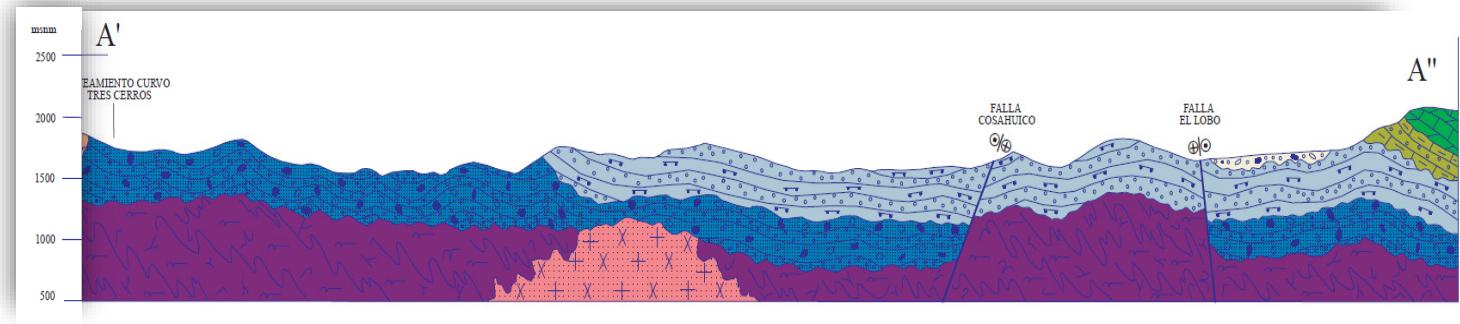


Figura 42. Mapa de fracturas y fallas modificada de la Carta Geológico-Minera, San Juan Ixcaquixtla E14-B24, Puebla y Oaxaca, del Servicio Geológico Mexicano, 2018.



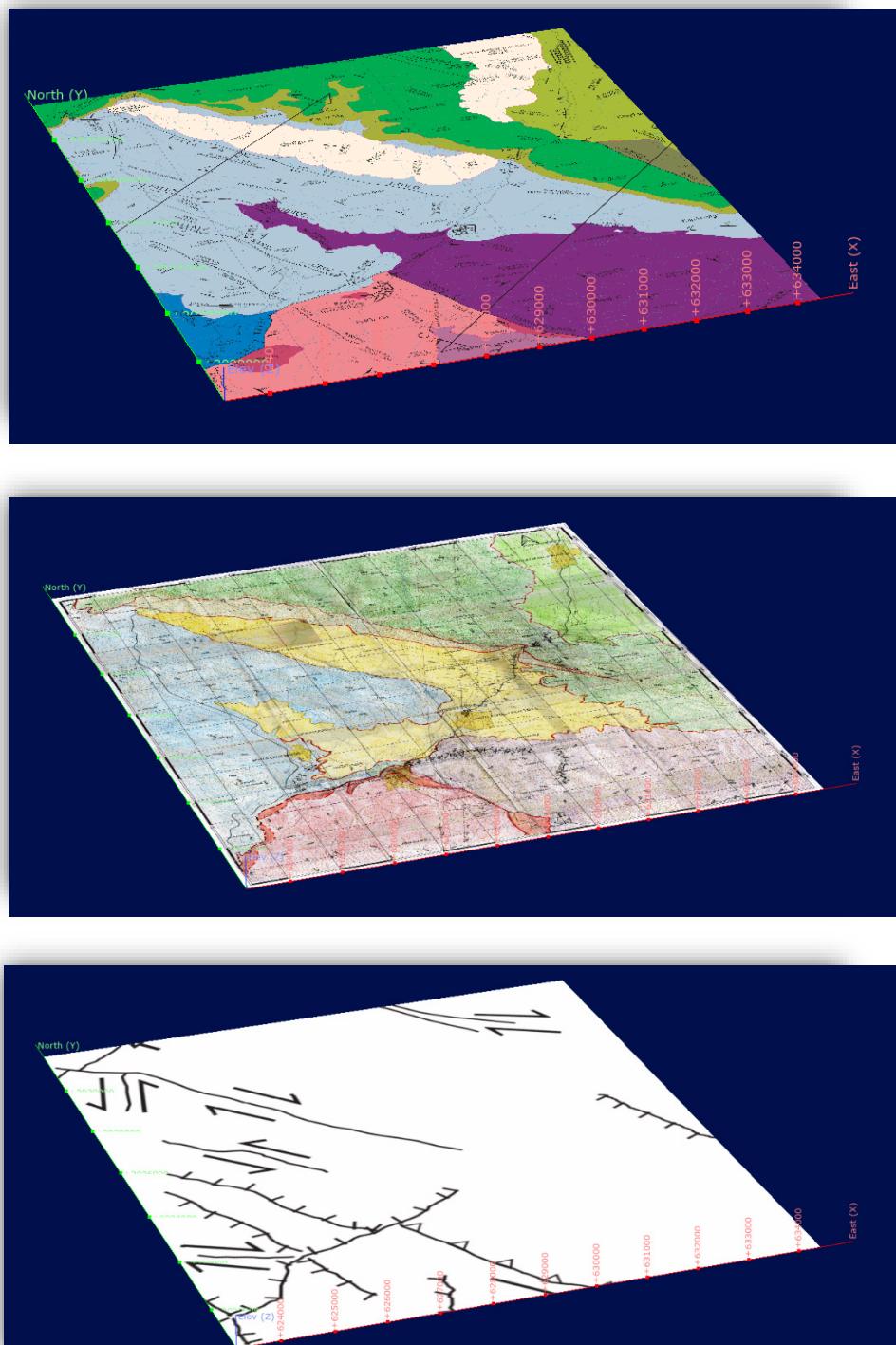


Figura 44. Imágenes georreferenciadas de mapas del área de San Juan Ixcaquixtla, Puebla, importadas tridimensionalmente en software especializado de modelado geológico tridimensional.

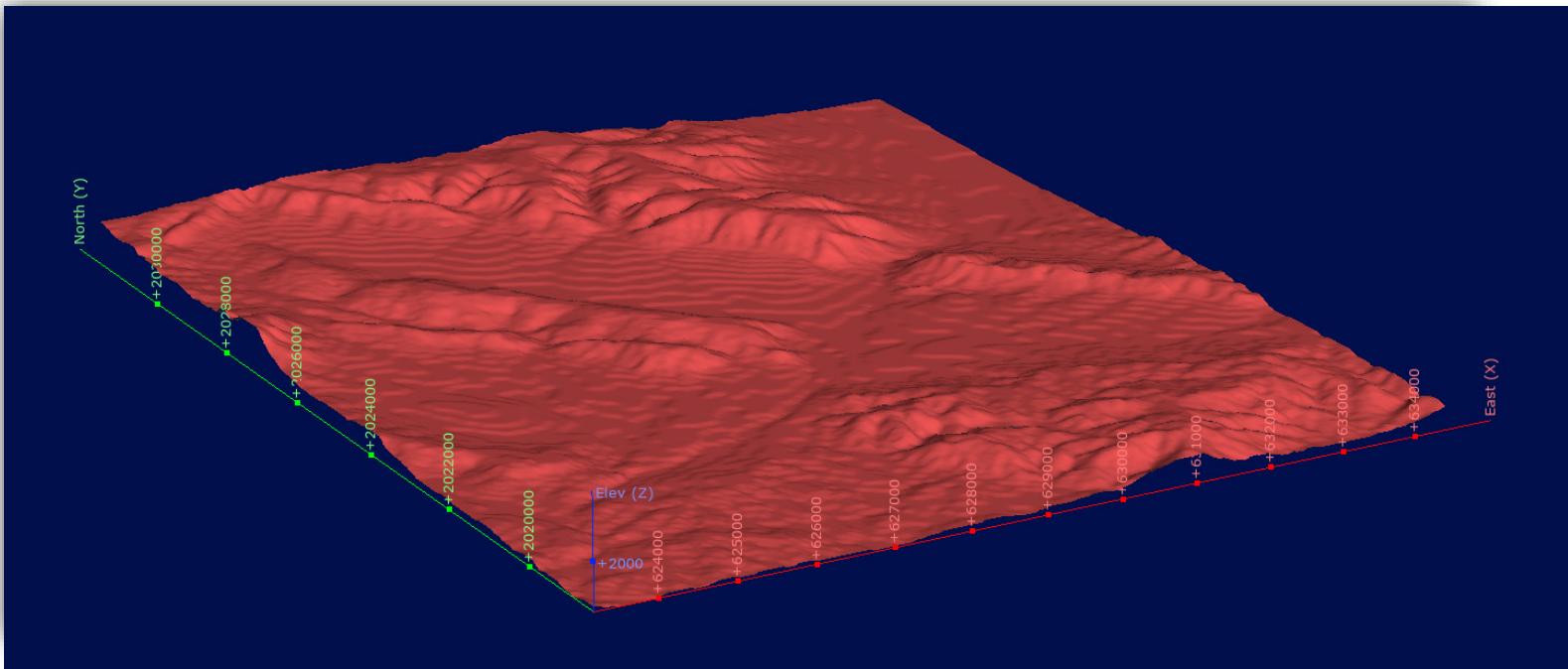


Figura 45. Superficie tridimensional creada mediante un MDE de 50 unidades por píxel, elaborado en software especializado de modelamiento geológico tridimensional.

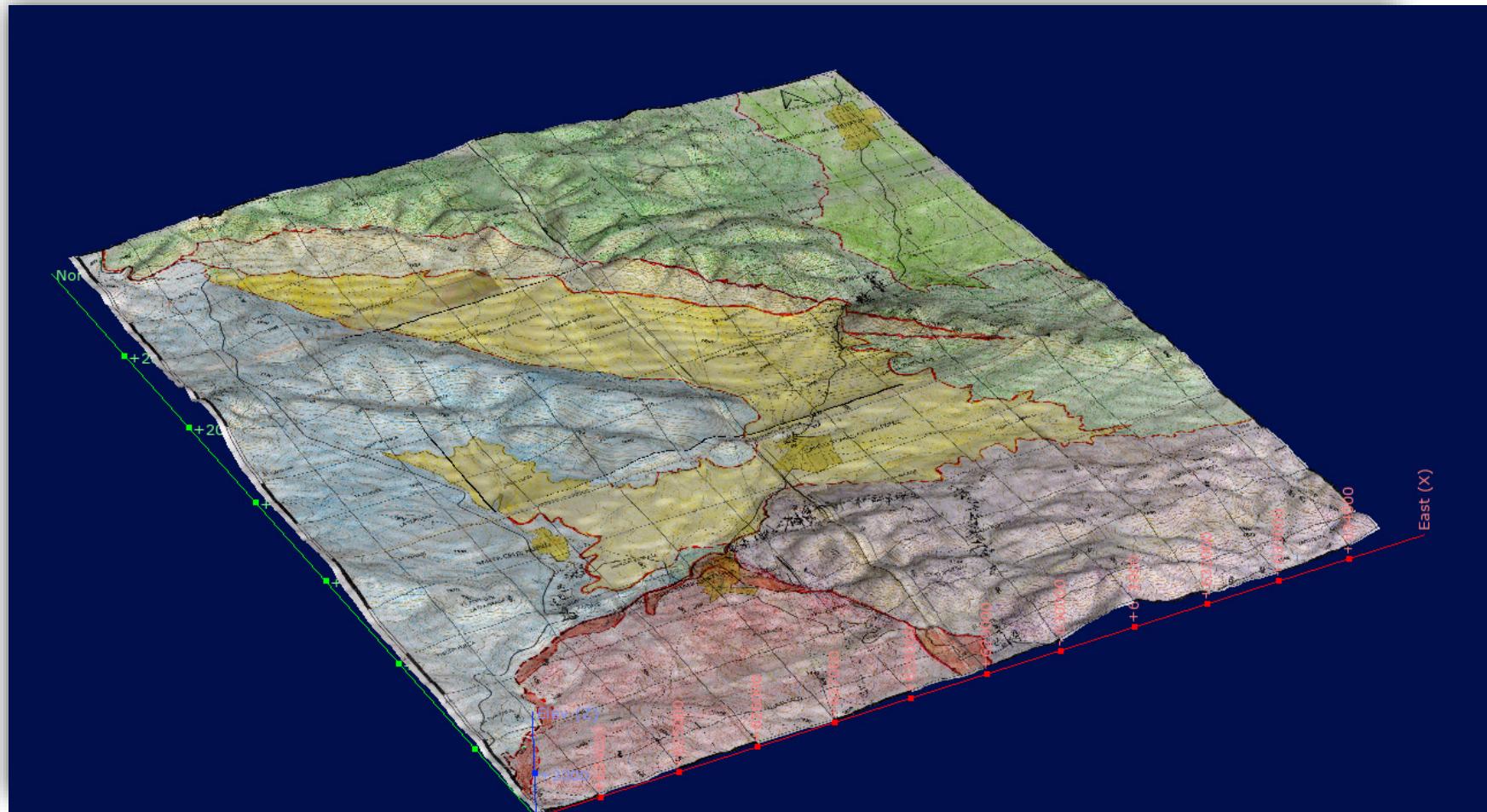


Figura 46. Mapa geológico de clase de San Juan Ixcaquixtla traslapado con la superficie tridimensional, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

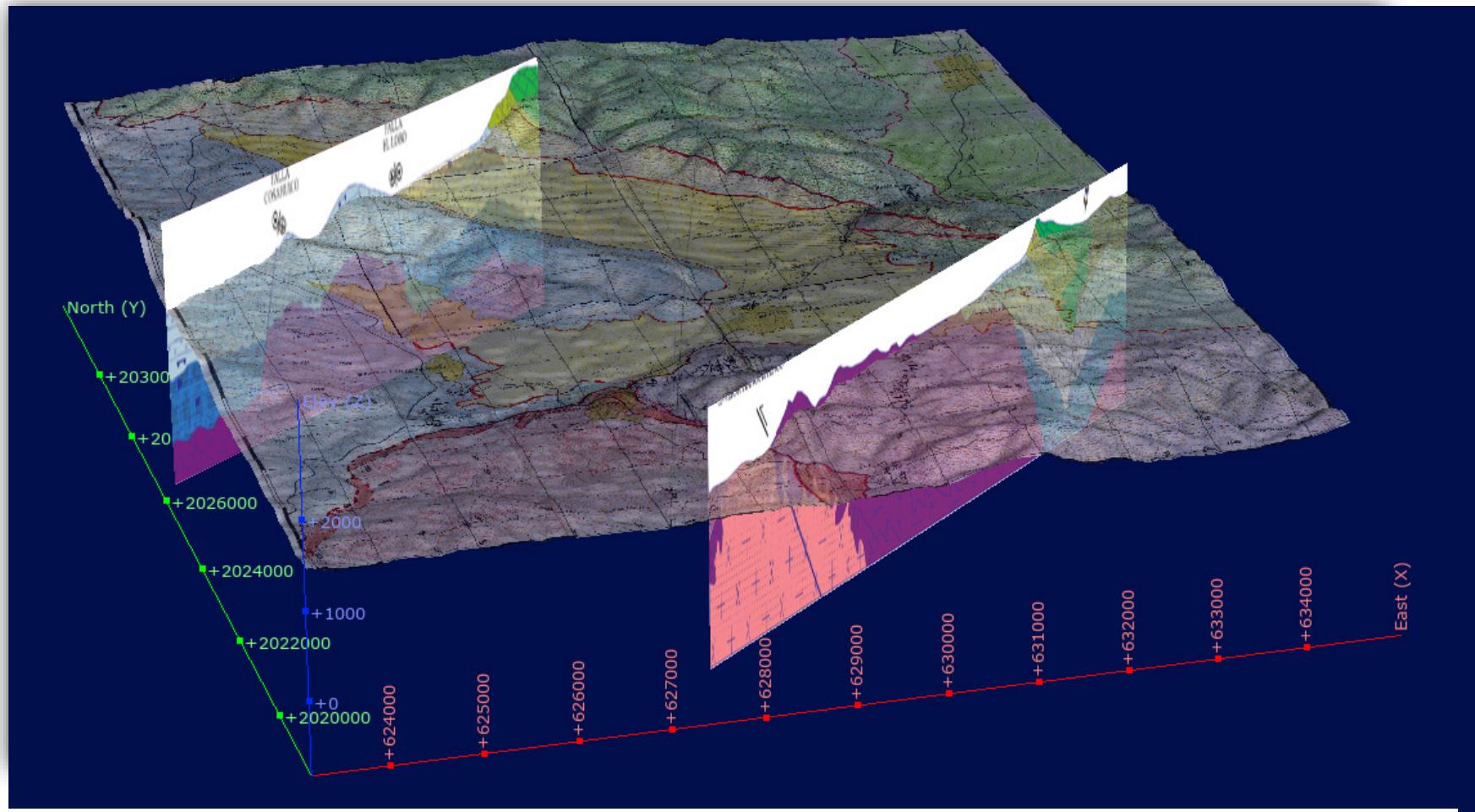


Figura 47. Imágenes verticales importadas sobre la superficie tridimensional con un 70% de transparencia.

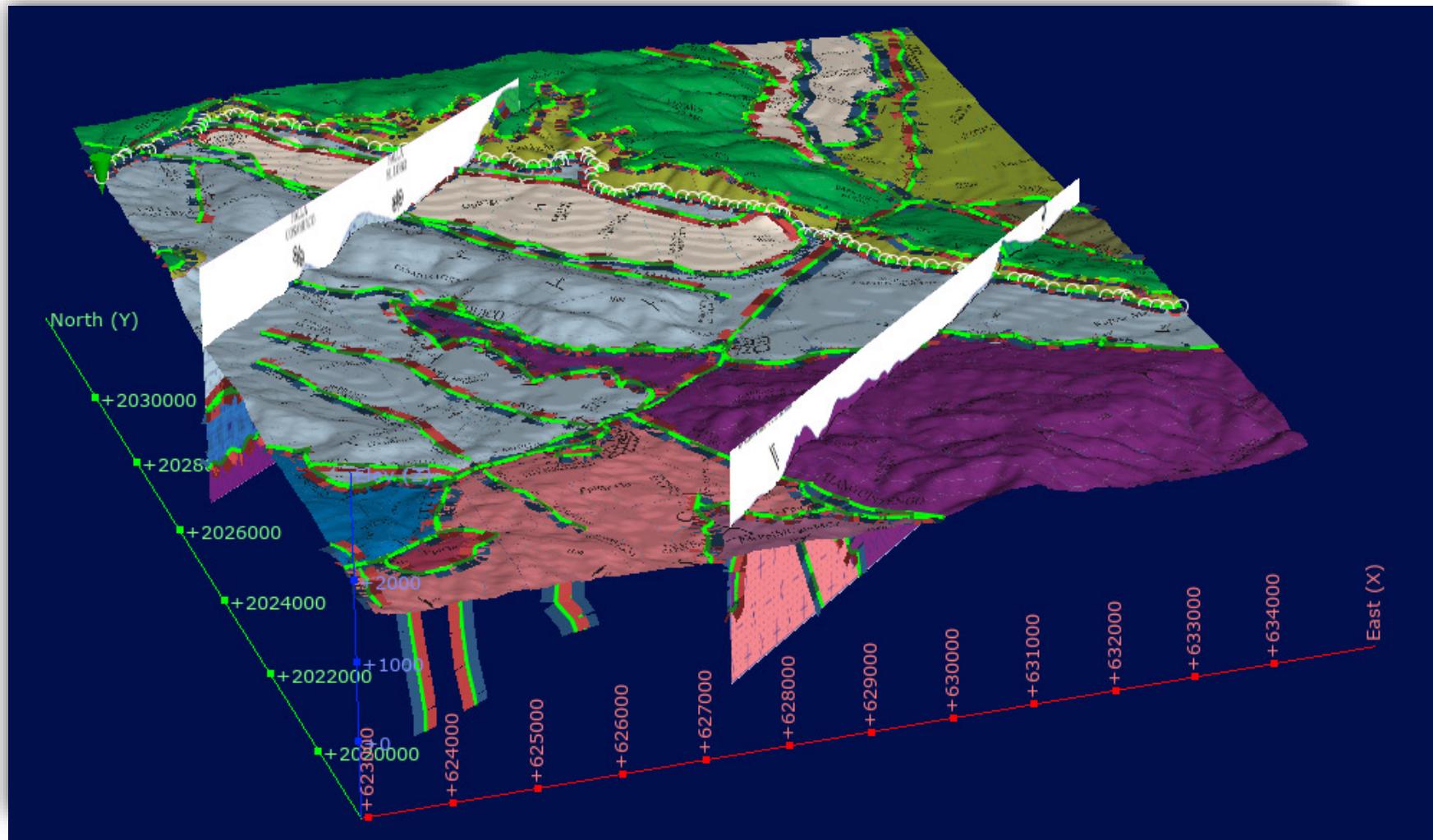


Figura 48. Digitalización tridimensional sobre la superficie e imágenes verticales, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

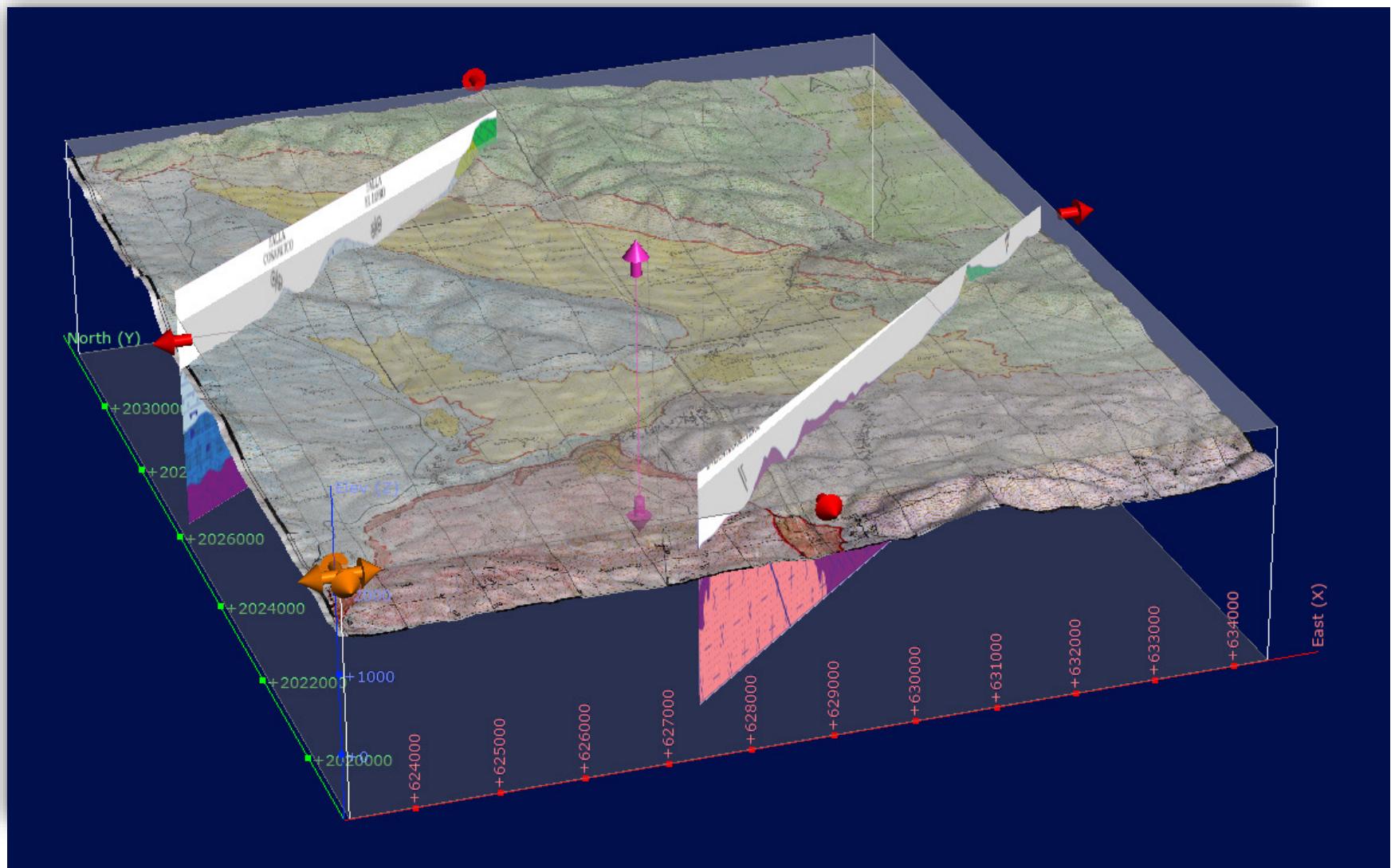


Figura 49. Creación del modelo base respecto a la extensión geográfica del mapa de clase de san Juan Ixcaquixtla, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

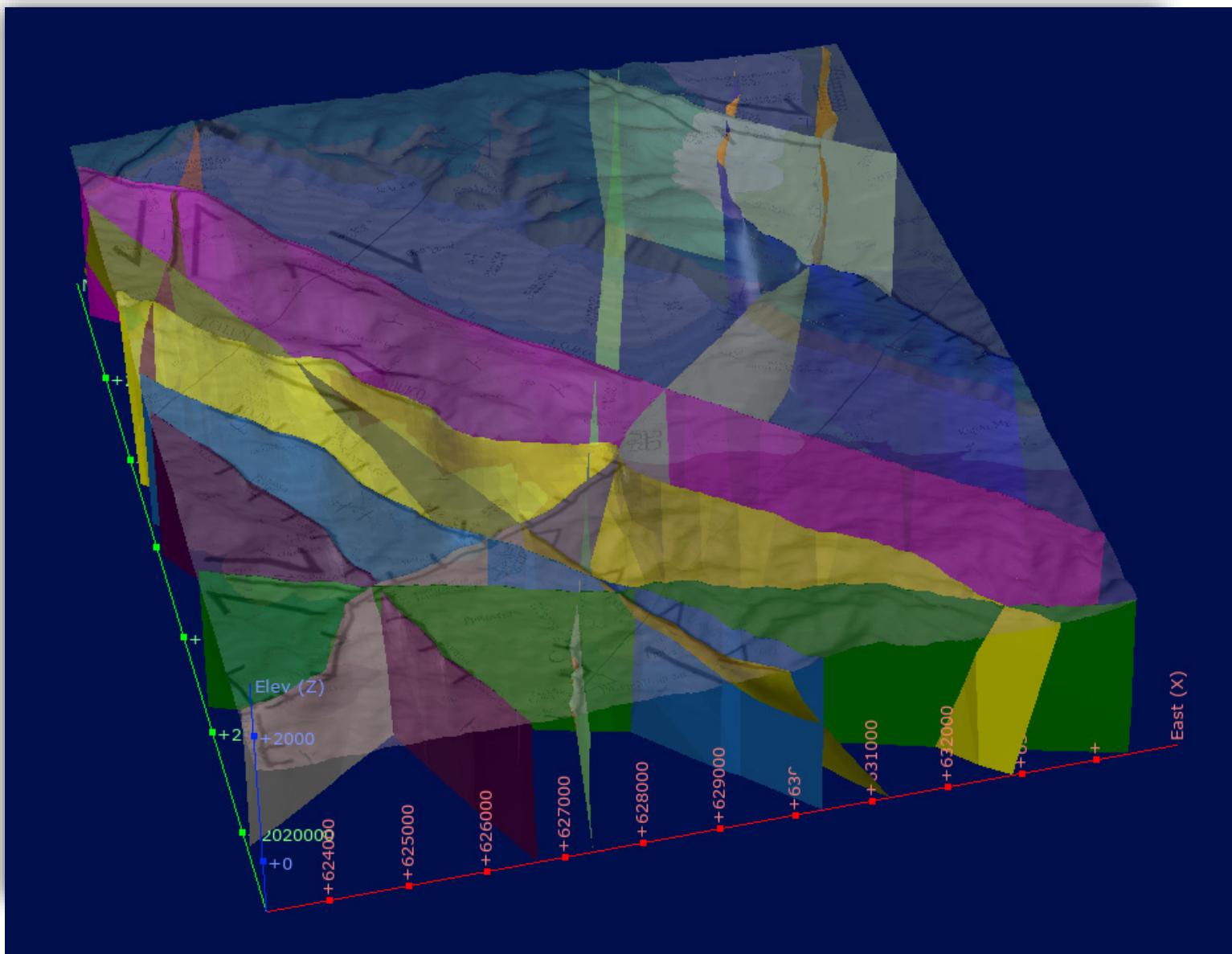


Figura 50. Superficies de planos de falla con extensión máxima del modelo base elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

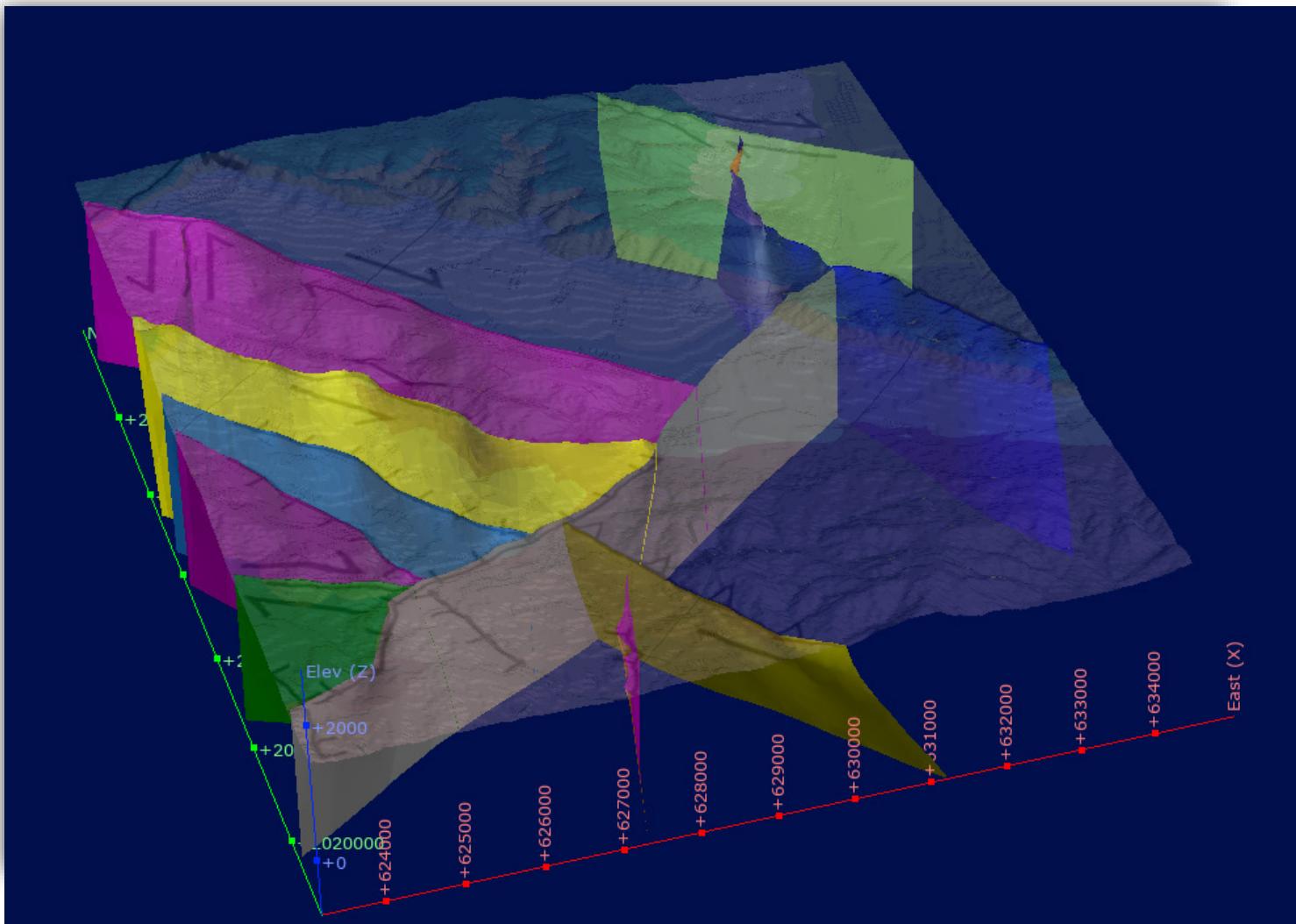


Figura 51. Planos de falla modificados respecto a el mapa de fracturas y fallas con transparencia del 20%, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

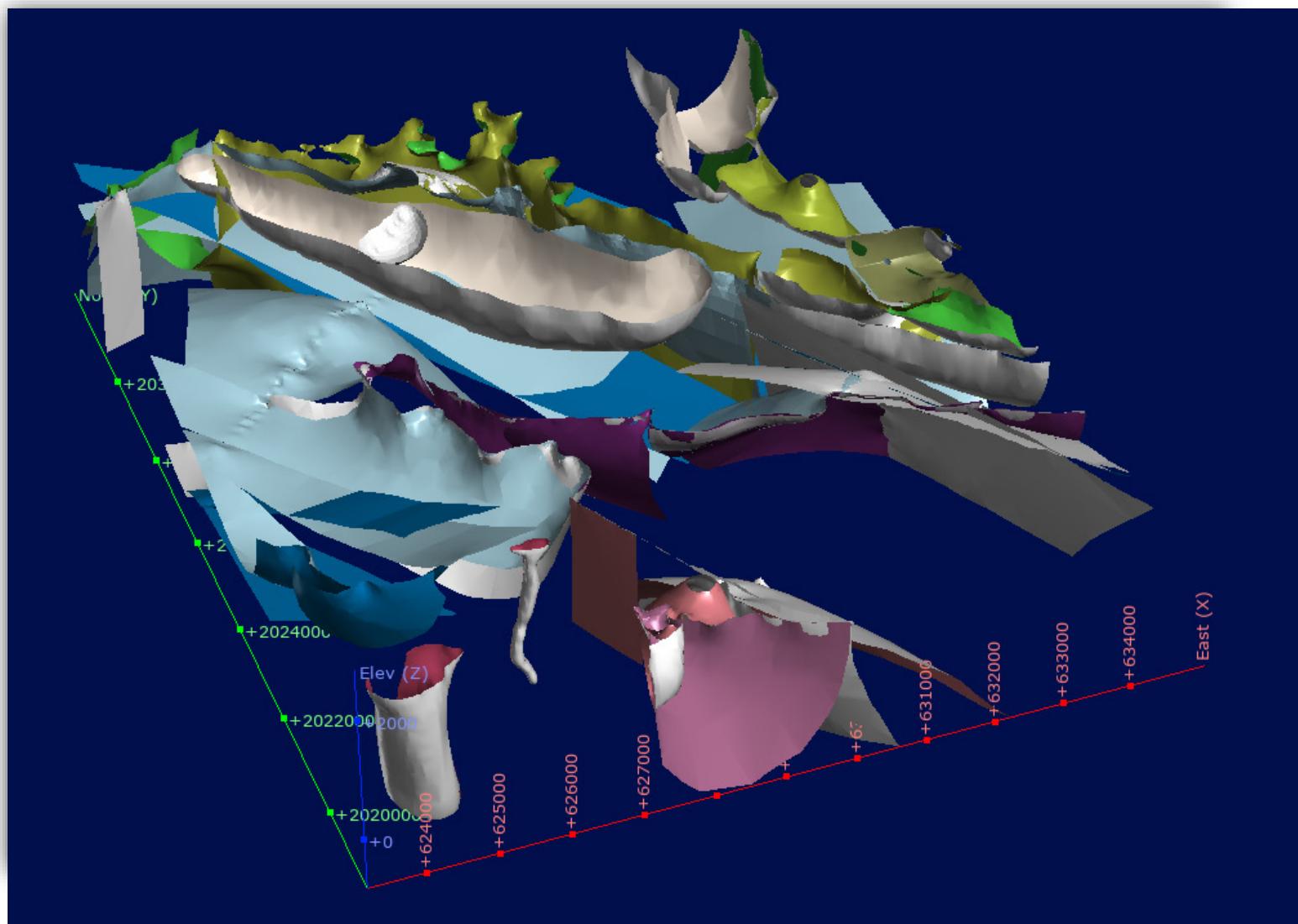
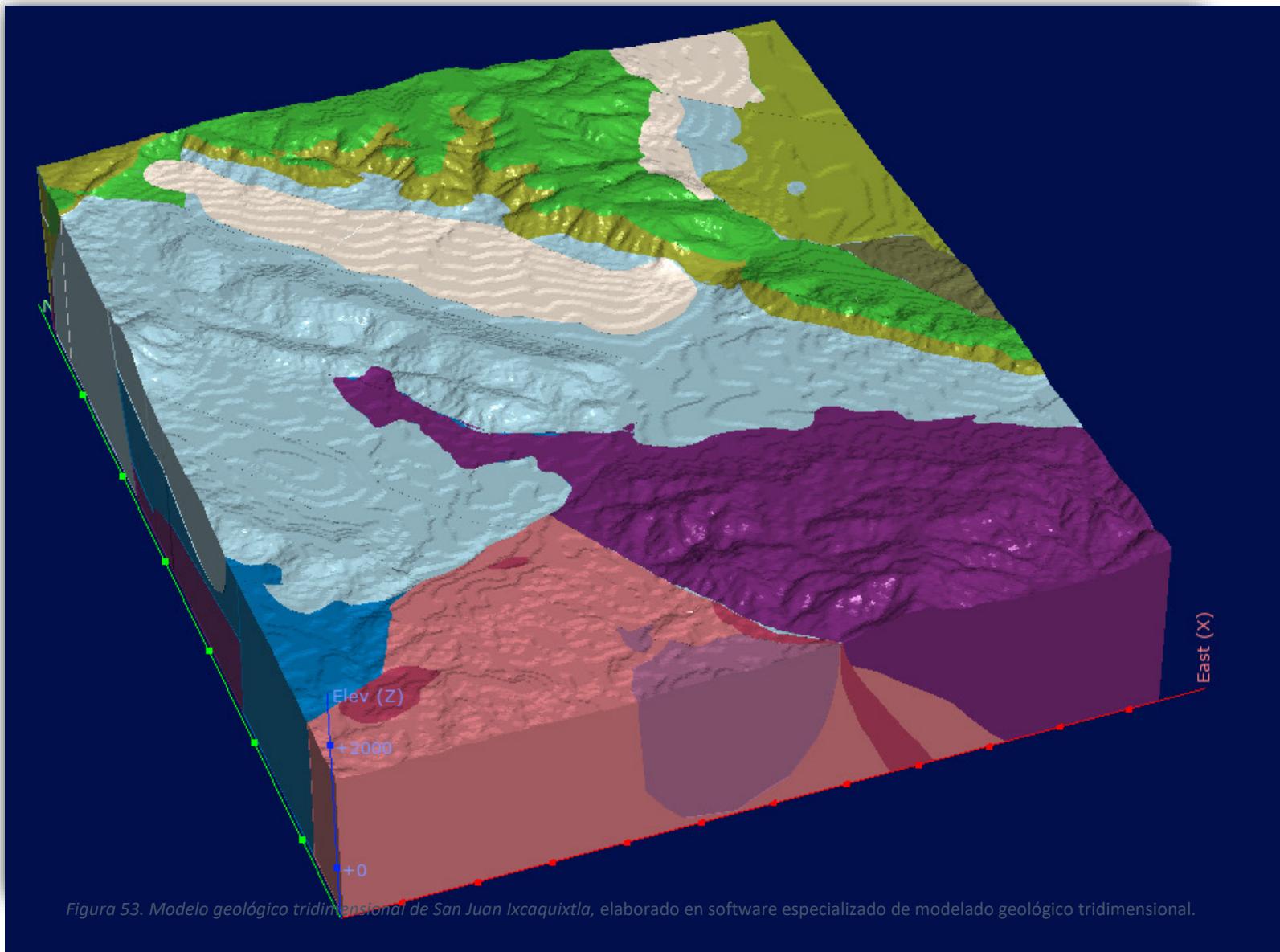


Figura 52. Superficies tridimensionales clasificadas por litología, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.



ii. Modelo de Yacimiento Mineral de Pórfido de Cobre, de Tiámaro, Estado de Michoacán.

Se tienen un mapa geológico (Figura 54) y una sección transversal (Figura 55) tomados del documento de Tesis de doctorado, Metalogenia del pórfido de cobre de Tiámaro, Estado de Michoacán, González, 2007.

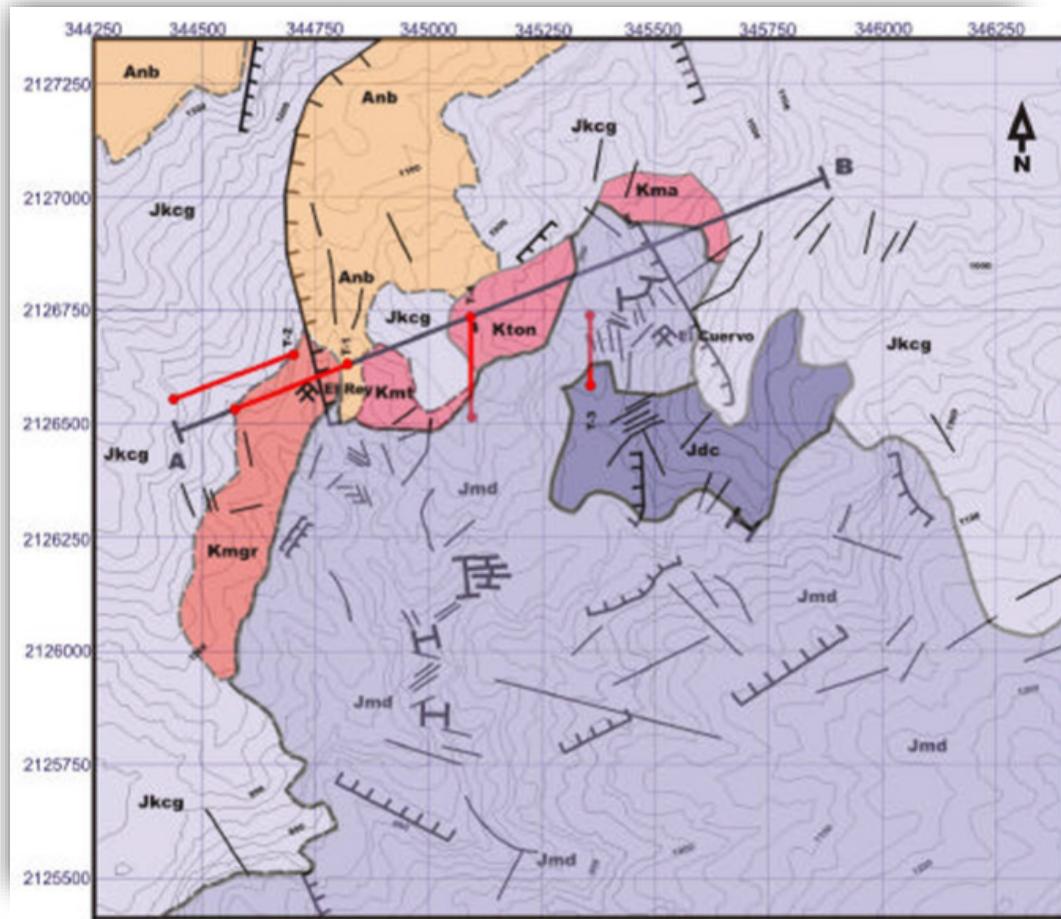


Figura 54. Mapa geológico tomado de *Tesis de doctorado, Metalogenia del pórfido de cobre de Tiámaro, Estado de Michoacán, González, 2007*, p38.

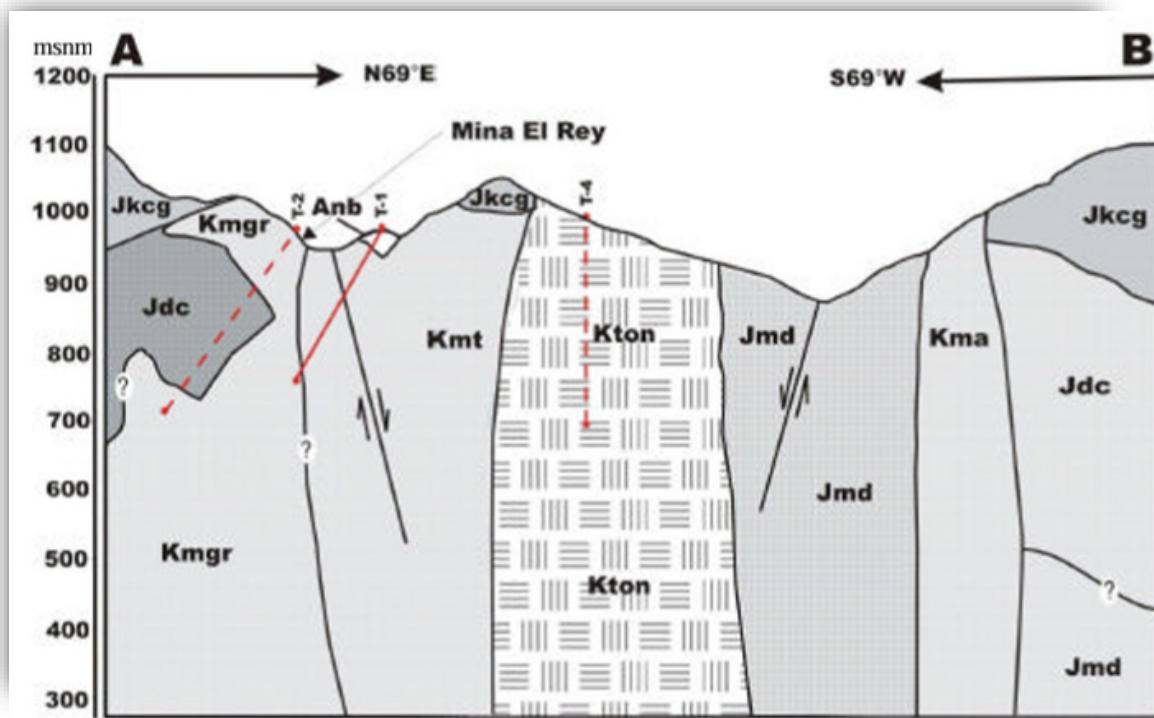


Figura 55. Sección geológica tomada de *Tesis de doctorado, Metalogenia del pórfito de cobre de Tiámaro, Estado de Michoacán* González, 2007, p39.

Se modifica la imagen del mapa geológico para reducir espacio y visualizar el área donde la sección está marcada, se importa al programa especializado para su creación tridimensional, se crea una superficie tridimensional con ayuda de un modelo de elevación digital de la localidad (Figura 58)

Se traslata la imagen del mapa geológico del pórfito con la superficie tridimensional para digitalizar las litologías. Se importa la imagen de la sección geológica para de igual forma digitalizar sobre ella (Figura 59)

Se realiza un modelo base que cubra la extensión geográfica del mapa. (Figura 60)

Se propone una litología y su leyenda (Figura 56) que corresponda al mapa geológico, con ello tomar en cuenta que las líneas tridimensionales y los datos estructurales tengan el mismo nombre (Figura 57).

Se realiza la creación de superficies tridimensionales por cada litología, se debe cuidar los datos estructurales. (Figura 61)

Al finalizar las superficies activarse con su cronología para generar los volúmenes que darán como resultado el modelo geológico tridimensional. (Figura 62)



Figura 56. Litología propuesta para el modelo tridimensional.

Anb	Kmgr
Anb (vtc)	Kmgr (vtc)
Jkcg	Kmt
Jkcg (vtc)	Kmt (vtc)
Jmd	Kton
Jmd (vtc)	Kton (vtc)
Kma	Veta ?
Kma (vtc)	

Figura 57. Clasificación de las líneas de digitalización del mapa geológico y la sección geológica.

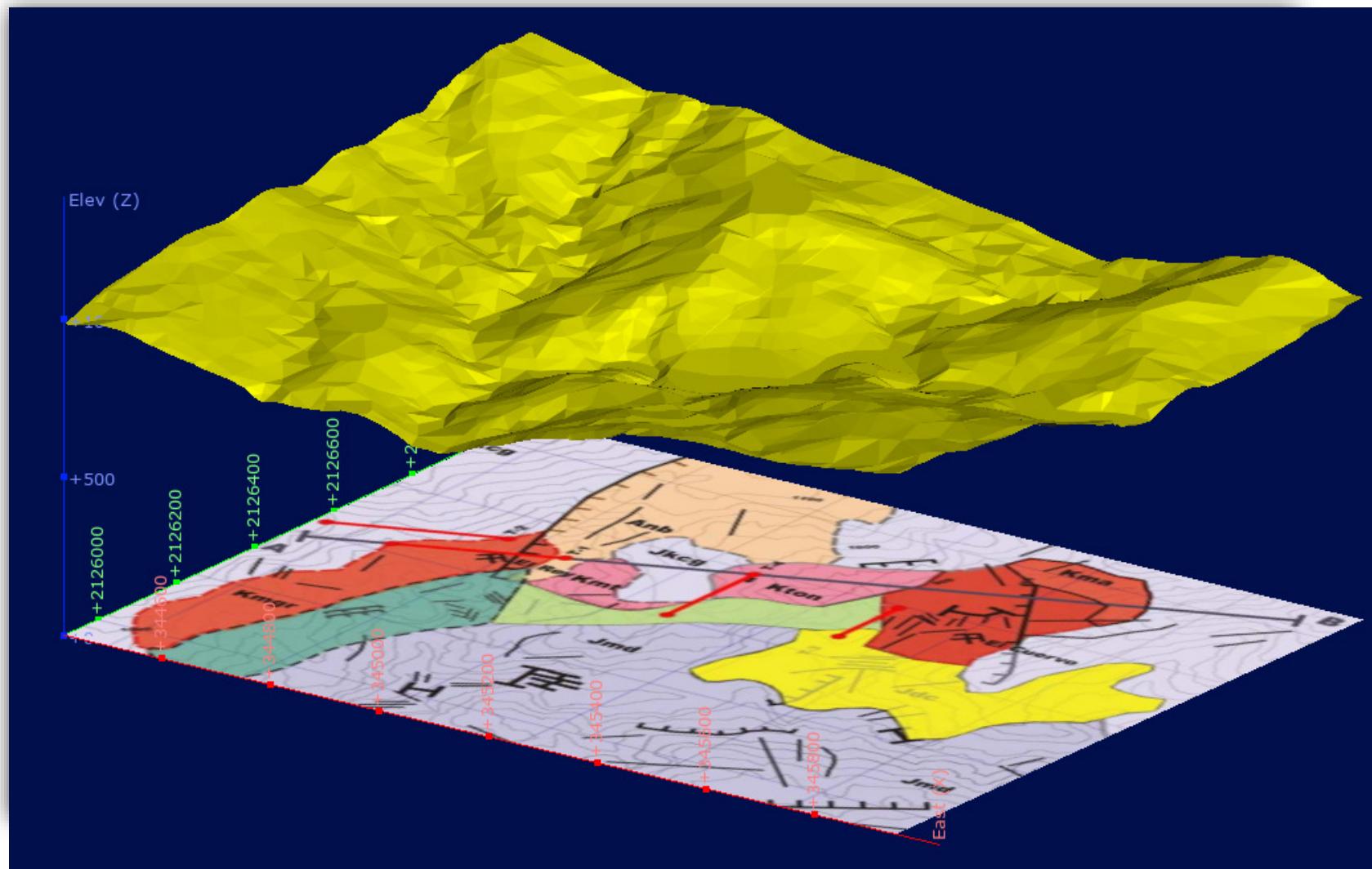


Figura 58. Superficie tridimensional e imagen tridimensional del mapa geológico, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

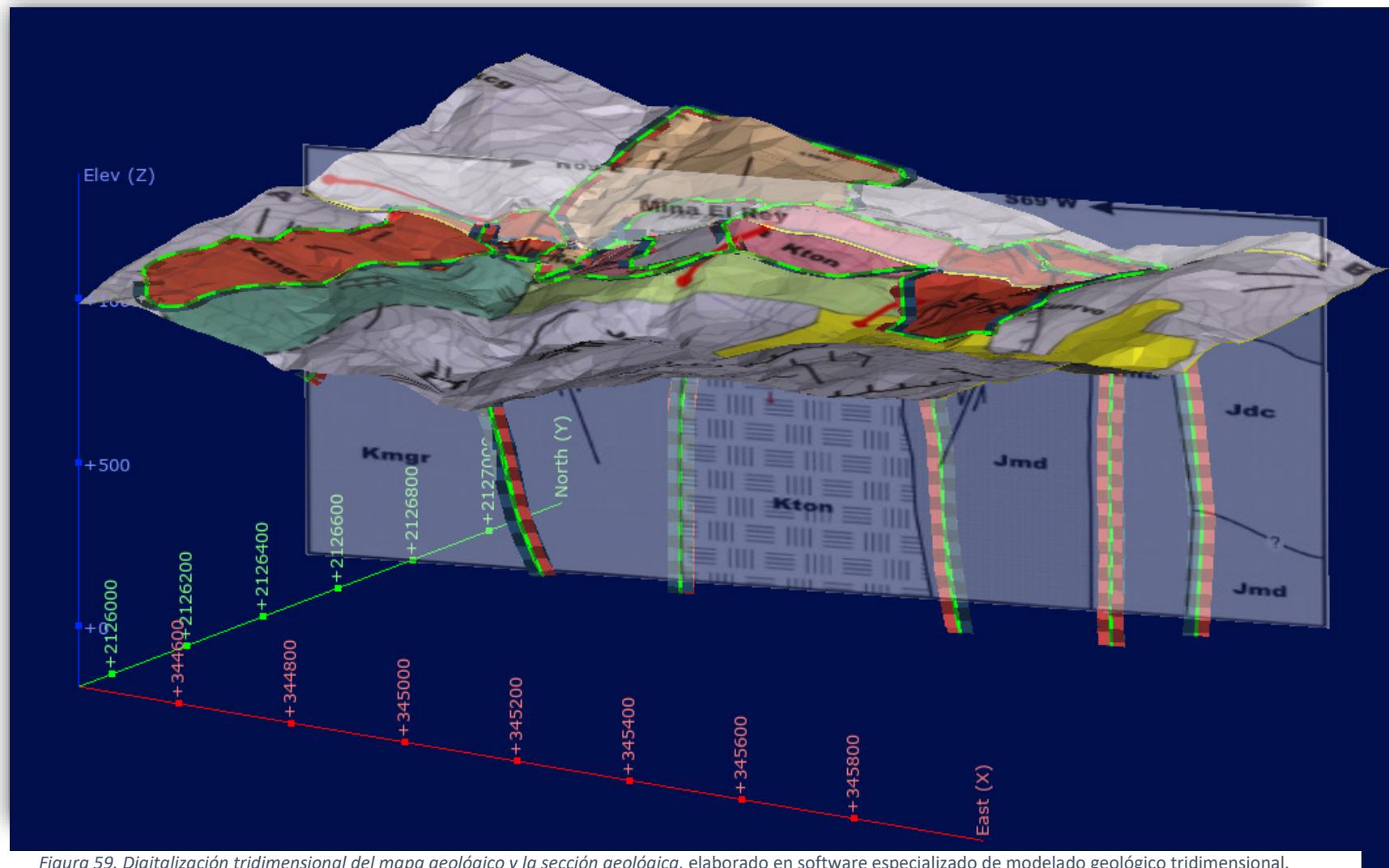


Figura 59. Digitalización tridimensional del mapa geológico y la sección geológica, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

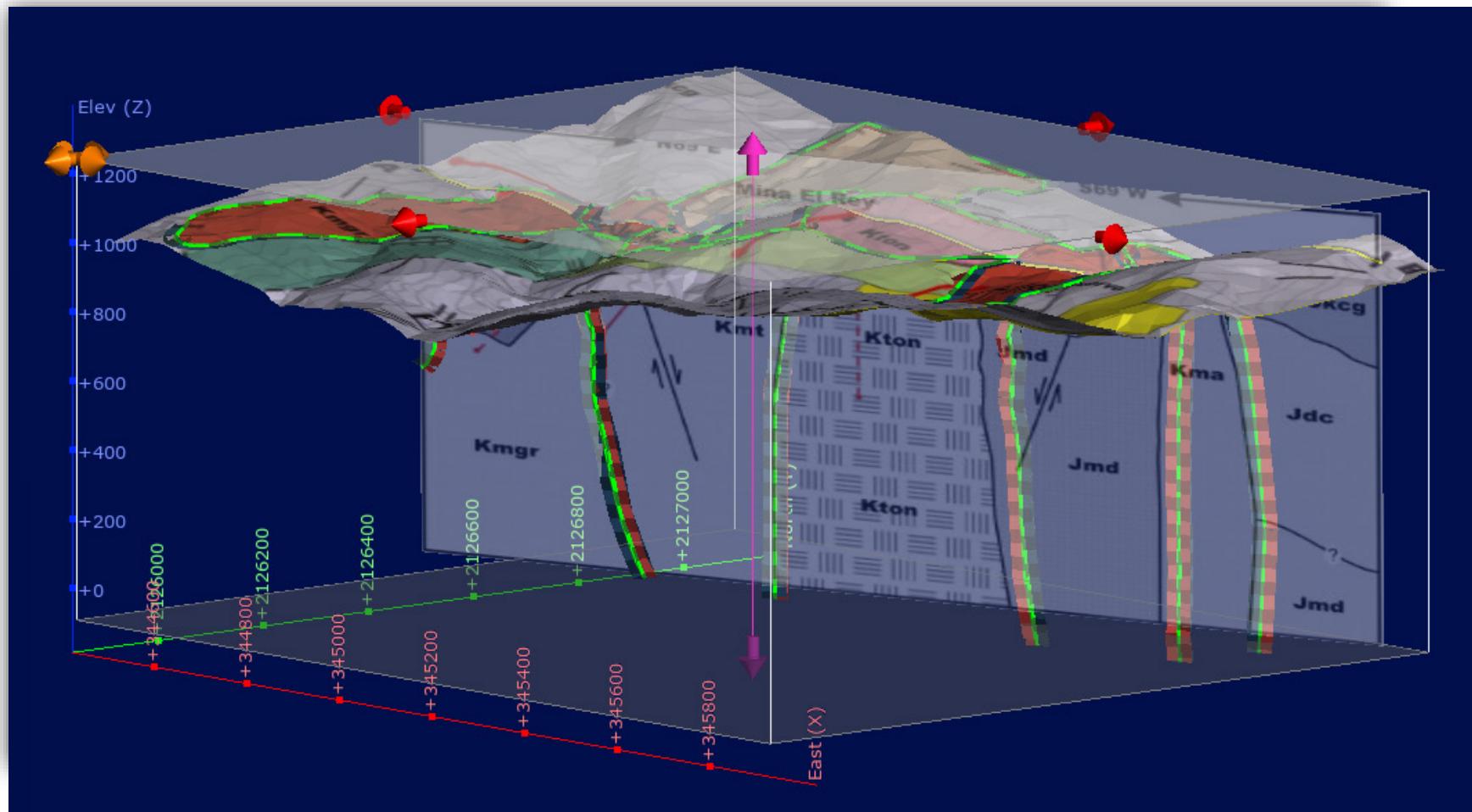


Figura 60. Modelo base con extensión geográfica del mapa geológico, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

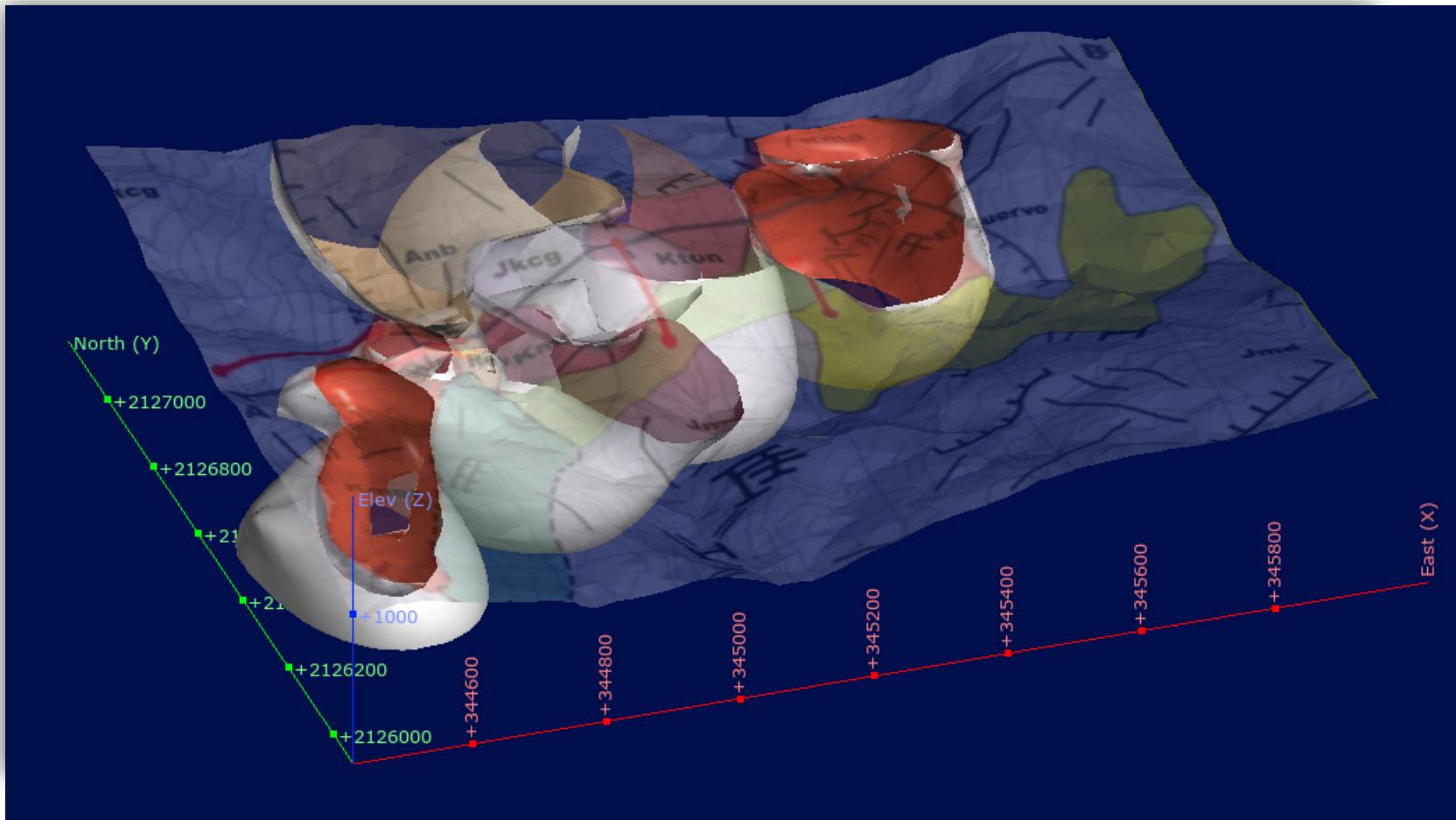


Figura 61. Superficies creadas en base a su litología, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

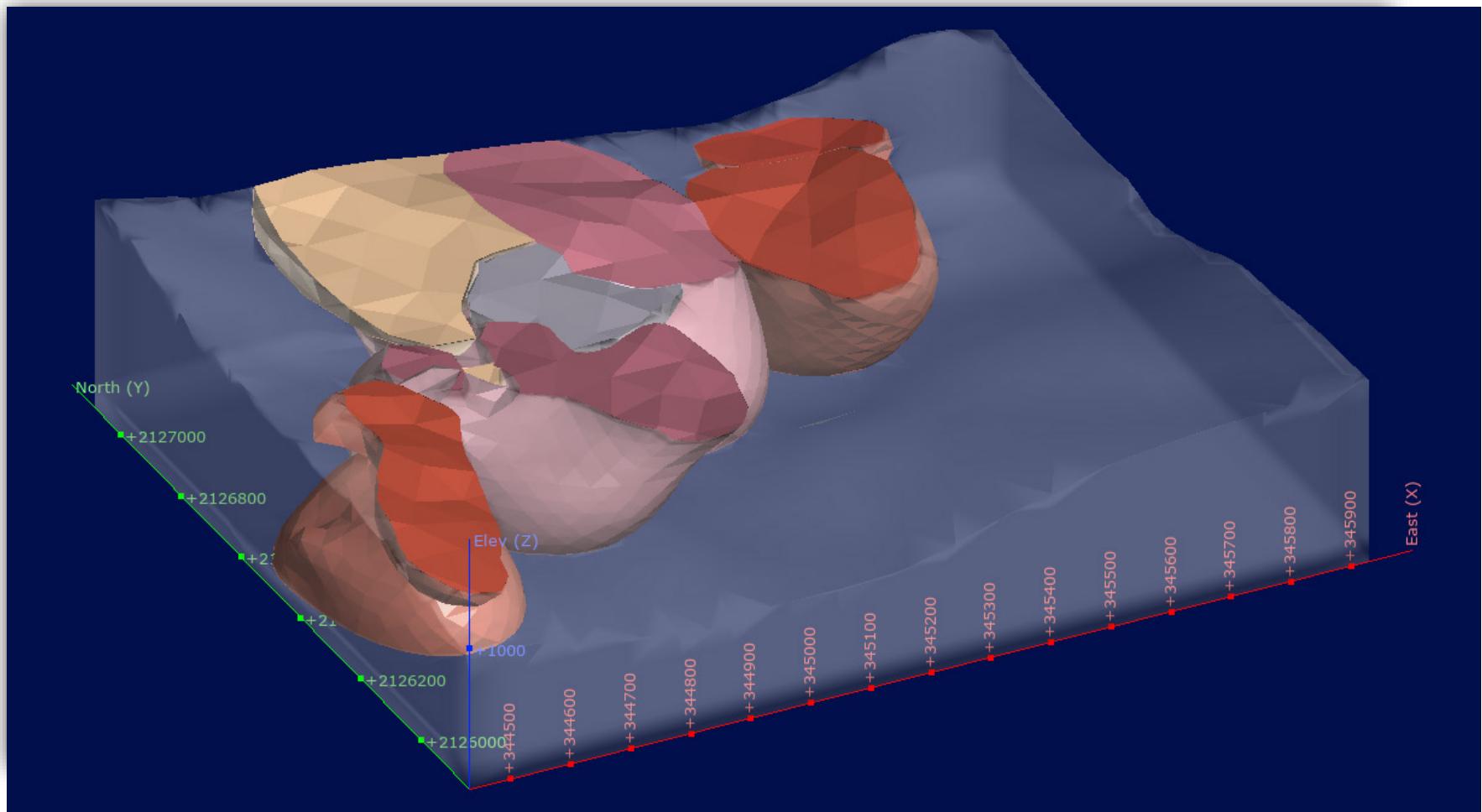


Figura 62. Volúmenes finalizados para el modelo geológico tridimensional, elaborado en software especializado de modelado geológico tridimensional.

V. CONCLUSIONES

- La capacidad de crear modelados tridimensionales por medio de diferentes conceptos y métodos de complejidad y diseño puede variar respecto a los datos que se le agreguen a cada interpretación.
- Se pueden generar modelos de aprendizaje para el área geológica, así como modelos de interpretaciones de un estudio completo.
- Este trabajo escrito abarca una gran variedad de modelos geológicos tridimensionales que se recomiendan realizar y visualizar en asignaturas del plan de estudios relacionadas a Ciencias de la Tierra.
- La importancia de este trabajo es guiar con una mejor perspectiva con modelos tridimensionales y complementar tiempos de enseñanza.
- Estos ejemplos son modelos dinámicos, mas no estáticos; por lo que no es recomendable crear impresiones 3d porque no se muestra la modelación digital del subsuelo comparado con el modelo generado con software con el cual una vez terminado se puede deshacer y deshacer el diseño, rehacer la edición y mejorar la visualización de todo el cuerpo tridimensional.
- El tipo de herramienta no sustituye a la elaboración de secciones geológicas a mano, sin embargo, funge un complemento versátil en la interpretación de cualquier modelo geológico local o regional de cualquier parte del país.
- Es posible llegar a datos concretos sin la información completa sosteniéndose de la cartografía respetando la teoría llevada a la práctica del área geológica.
- A pesar de que no se incluyó datos de barrenación reales se trató de manejar el concepto detallado de como insertar este tipo de datos

- Aunque son ejemplos de clase, se desarrolló una metodología para llegar a completar estos ejemplos. Así pues, se trata de tener un nivel alto en los procedimientos de cualquier *software* sin alejarse de la manera en que se puede llegar a un resultado efectivo.

VI. FUENTES DE INFORMACIÓN

Allmendinger, R. W. 2020 GMDE: Extracting quantitative information from geologic maps. *Geosphere* 16: 1495-1507 (DOI 10.1130/ges02253.1).

Carta Geológico Minera de la localidad de San Juan Ixcaquixtla, del estado de Puebla. Cartografía y Edición por el Servicio Geológico Mexicano Boulevard de Felipe Ángeles km.93.50-4 col.ventaprieta,c.p.42083 Pachuca, Hgo. Primera edición febrero del 2018 © 2018 derechos reservados servicio geológico mexicano.

González Vélez, C. E. G. (2007). *Metalogenia del pórfito de cobre de Tiámaro, Estado de Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, p 38-39

Padilla y Sánchez, R. J. (2021). *Geología Estructural. Métodos Modernos. Anexo 1. Modelos de papel para estudiantes de Geología Estructural.* del Dr. Ricardo José Padilla y Sánchez, (2021, p5). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Alonso-Manuel, F. L., Fitz-Díaz, E., & Gutiérrez-Navarro, R. (2020). *Estimación de desplazamiento mínimo en fallas inversas de alto ángulo: Caso de estudio en la Falla de San Marcos, Coahuila*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72(1). <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a031019>

Gilberto, S. R., Cristina, M. R. C., & Emiliano, C. M. (2016). Elementos de Cartografía Geológica. <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/291>

Carta Geológico-Minera, San Juan Ixcaquixtla E14-B74 [Mapa], Puebla y Oaxaca. Cartografía y Edición Por El Servicio Geológico Mexicano. Boulevard Felipe Ángeles Km. 93.50 – 4. Col . Venta Prieta, C.P. 42083 Pachuca, Hgo. Primera Edición Febrero Del 2018. © 2018 Derechos Reservados Servicio Geológico Mexicano.

Carta Geológico-Minera, San Juan Ixcaquixtla E14-B74 [Imágenes], Puebla y Oaxaca. Cartografía y Edición Por El Servicio Geológico Mexicano. Boulevard Felipe Ángeles Km. 93.50 – 4. Col . Venta Prieta, C.P. 42083 Pachuca, Hgo. Primera Edición Febrero Del 2018. © 2018 Derechos Reservados Servicio Geológico Mexicano. Autores De Imágenes: Ing. Criso Daniel Martínez De La Paz. Ing. David Morales Delgado

Seequent. (s/f). Fundamentos de Leapfrog Geo. On Demand Learning. Recuperado 2023,

<https://my.seequent.com/learning/2933/2934/2946>

Seequent. (s.f.). Construcción de un modelo a partir de un mapa. On demand learning. Recuperado 2023, de <https://my.seequent.com/learning/3051/3052/3056>

Seequent. (s.f.). Leapfrog Geo Geological Modelling with Interacting Faults. On demand learning. <https://my.seequent.com/learning/3819/3820/3821>

Falla Geológica. (19 de diciembre de 2017). Modelamiento a partir de una mapa geológico. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/0CVvcQgKBwo>

Leapfrog 3D. (11 de agosto de 2021). Leapfrog Geothermal Best Practice: Building a Geological Model without Well Data. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/Avpwcl8W9Uw>

Taller Modelamiento 3D - Geología U. de Chile. (25 de junio de 2020). Geología Regional en 3D: Modelamiento Implícito en Leapfrog GEO. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/7rjKu1jJ7XY>

Roy Supa. (18 de diciembre de 2020). Taller de Geología Estructural - En Leapfrog Geo (Parte 3 de 3). [Video]. YouTube. https://youtu.be/pu_PqyD62Eq

Roy Supa. (14 de diciembre de 2020). Taller de Geología Estructural - En Leapfrog Geo (Parte 1 de 3). [Video]. YouTube. <https://youtu.be/bXEjAdfF58s>

Roy Supa. (15 de diciembre de 2020). Taller de Geología Estructural - En Leapfrog Geo (Parte 2 de 3). [Video]. YouTube. <https://youtu.be/rXIBICdvucM>

Leapfrog 3D. (26 de noviembre de 2017). Additional Geological Modelling Tools. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/731Pe0iqdaw>

Roy Supa. (11 de diciembre de 2020). Ejercicio Aplicado: Categorizar Elementos Punto, en Leapfrog Geo. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/9Qmwds-dACw>

Leapfrog 3D. (23 de marzo de 2020). Edición Avanzada de Superficies en Leapfrog. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/XWx0yFCy9q0>

Carlos Gerardo Rodríguez Montiel. (30 de octubre de 2022). MiniTips SIG. <https://minitipssigsoftgeo3D.blogspot.com/>