



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización, dinámica, simulación y
afectaciones por efecto de caída de
bloques en la zona arqueológica de
Chalcatzingo, Morelos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Gustavo Daniel Cruz Gutiérrez



DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Sergio Salinas Sánchez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Agradecimientos

Contenido

Tabla de Figuras	4
Resumen	9
Abstract	11
I. Introducción	13
I.1. Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos particulares	16
II. Antecedentes	17
II.1 Procesos de remoción en masa	17
II.2 Caída de bloques	19
A) Causantes de la caída de bloques	22
B) Tipos de movimientos durante la caída de bloques	26
C) Peligros por caída de bloques	30
II.3 Modelos de caída de bloques	33
A) Clasificación de los modelos para la caída de bloques	34
B) Enfoques de los modelos utilizados	37
III. Métodos	44
III.1 Modelo digital de superficie	44
A) VANT	45
B) Modelo Digital de Superficie (MDS)	46
III.2 Método empírico	49
III.3 Método basado en procesos	53
III.4 Método basado en un SIG	56
IV Estudio de caso	63
IV.1 Área de estudio	63
A) Geología regional	67
B) Geología local	70
C) Geomorfología	74
D) Análisis de fracturas	79
V. Resultados	83
V.1 Datos obtenidos en campo	83
A) Bloques depositados	84
B) Fotografías de las paredes	89
C) Fotografías aéreas y generación del MDS	93
V.2 Resultados con Flow R	95
V.3 Resultados de Rocfall	98
V.4 Resultados de RAMMS::RockFall	101

A)	Simulaciones	102
V.5	Cuadro con los softwares y los resultados	109
V.6	Discusión	111
VI.	Conclusiones	118
	Referencias	120
	Anexo	125
A)	Tabal de densidad Datos para el cálculo de densidad con fotografías de las muestras utilizadas Cha01a y Cha01b pertenecen al cerro delgado, Cha02 pertenece al cerro gordo al igual que Cha03a y Cha03b pero se encuentran alteradas.	125
B)	Ficha descriptiva de la muestra de mano recogida en campo con sus características de textura y su mineralogía.....	126
C)	Registro fotográfico de los bloques descritos.....	128

Tabla de Figuras

<i>Figura 1. A) Imagen de satélite que muestra los domos Chalcatzingo y la ubicación de su zona arqueológica (polígono de línea color rojo) (equidistancia de 50 m). B) Localización de la zona de estudio (punto rojo).</i>	15
<i>Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa (Tomado de Alcántara 2000)</i>	18
<i>Figura 2. Parte del Geological Strength Index (GSI), donde se muestra la estructura de la roca así como su grado de fracturamiento (editado de Marinos et al., 2005).</i>	24
<i>Figura 3A) Inestabilidad por meteorización de la roca inferior. B) Inestabilidad por deslizamiento (Tomados de Ferrari et al., 2017).</i>	25
<i>Figura 4. Inestabilidad por volteo (modificado de Ferrari et al., 2017).</i>	26
<i>Figura 5. Tipos de movimiento durante la caída de bloques en relación con el grado de inclinación de la pendiente (modificada de Dorren, 2003).</i>	26
<i>Figura 6. Secuencia de imágenes donde un bloque sub-redondeado de 800 kg desciende por una ladera a gran velocidad (imagen superior izq.), impacta con un árbol (imagen superior der.) lo que causa un rebote(imagen inferior izq.) y un segundo impacto con otro árbol al regresar a la superficie de la ladera continua su recorrido con una menor velocidad (imagen inferior der.). Este experimento fue realizado durante el otoño de 2019 en Schraubachtobel, Schiers (Suiza) en la búsqueda de un mejor entendimiento del efecto del bosque en la mitigación de peligros por caída de bloques, conducido por RAMMS (Numerical Rapid Mass Movement Simulation) de Suiza (modificado de RAMMS, 2019).</i>	30
<i>Figura 7. Peligro por caída de bloques. (modificado de Volkwein et al., 2011).</i>	32
<i>Tabla 2. Tabla con una seleccion de los modelos de trayectorias de caída de bloques (tomada de Volkwein et al., 2011)</i>	35
<i>Tabla 3. Tabla con las características principales de los modelos para caída de bloques más utilizados actualmente (tomada de Vo, 2015)</i>	36

<i>Figura 8. Línea del “Principio Fahrböschung” (F) y “ángulo mínimo de sombra” (M) de una ladera (tomado de Dorren, 2003).</i>	38
<i>Figura 9. La imagen superior (1), es una vista en planta que muestra el camino real por el cual se desplaza la roca durante su caída (a), se muestran las curvas de nivel como referencia. La figura 2 muestra la ladera en segmentos (b), los cuales son usados en modelos de dos dimensiones, siendo (c) la pendiente real de la ladera. La figura 3 muestra las dos fases simuladas, así como las parábolas que pueden llegar a ocurrir (modificada de Dorren, 2003).</i>	41
<i>Figura 10. a) Ventana de 3x3 donde la dirección de caída desde la celda central es la gris oscura. b) Ventana de 5x5 en donde la dirección de caída se determina para la celda central en dirección a la celda gris oscura (tomado de Dorren, 2003).</i>	42
<i>Figura 11. Dron o VANT DJI Mavic Pro. (The DJI Store, 2017)</i>	46
<i>Tabla 4. Insumos ocupados para el método empírico</i>	49
<i>Figura 12. Ilustración de la combinación de información para la evaluación de zonas susceptibles a ser consideradas zonas fuente. Los pixeles excluidos se muestran en color rojo, los favorables en verde y los ignorados en blanco (Tomado de Horton et al., 2013).</i>	50
<i>Figura 13. Localización de las herramientas utilizadas dentro del SIG ArcMap, para redimensionar el MDS, así como el tamaño de la celda.</i>	51
<i>Figura 14. Panel de las características a determinar para realizar la simulación en Flow-R (0.9.8), nótese que permite la introducción de al menos 6 capas de información.</i>	52
<i>Tabla 5. insumos ocupados para el método basado en procesos</i>	53
<i>Tabla 6. Tabla con los dos tipos de superficie utilizados en este trabajo: roca con algo de vegetación y suelo con vegetación (modificado de la tabla Rocscience Coefficient of Restitution, incluida con el programa RocFall versión 4.0)</i>	54
<i>Figura 15. Interfaz del programa RocFall 4.0 en la cual se muestran las opciones de diferentes tipos de superficie, así como la opción de agregar otros a partir de la tabla accesible en el menú principal.</i>	55
<i>Figura 16. Ventana para introducir la masa y velocidad inicial del bloque en el punto deseado.</i>	56
<i>Tabla 7. Insumos ocupados para el método basado en un SIG</i>	56
<i>Figura 17. Ejemplo del tipo de geometrías que se pueden introducir en RAMMS::ROCKFALL, desde cúbicas, platiculares, prismáticas e irregulares (tomado de Bartelt et al., 2015).</i>	58
<i>Figura 18. Interfaz de creación de geometría de rocas en RAMMS:: ROCKFALL, los modelos definen las formas: equidistantes, planas y alargadas.</i>	60
<i>Figura 19. Imágenes tomadas en Chalcatzingo donde se aprecia una superficie definida como Extra dura (arriba) y una Medio Dura (abajo).</i>	60
<i>Figura 20. Archivo de registro generado automáticamente por el programa RAMMS::ROCKFALL, se puede consultar información importante respecto al número de bloques simulados, los valores mínimo, promedio y</i>	

<i>máximo de la altura de los saltos, velocidad, energía cinética, velocidad rotacional y la pendiente. También se incluye la resolución del MDE utilizado, la dureza de la superficie, las coordenadas y densidad y masa de la roca.</i>	62
<i>Figura 21. Pirámide de la zona arqueológica de Chalcatzingo, al fondo el Cerro Delgado.</i>	64
<i>Figura 22. Bajorrelieves de la zona arqueológica de Chalcatzingo, El gobernador sacerdote (izq.) y La fertilidad (der.).</i>	65
<i>Figura 23. Mapa de la zona en donde se incluye la zona arqueológica, así como los Bajorrelieves más próximos a la ladera de los domos al sur, así como otras estructuras arqueológicas y la pirámide.</i>	66
<i>Figura 24. Mapa geológico del área de Chacatzingo, Morelos (Modificado de Rivera et al 1998; Ortega-Gutierrez et al., 2012 y Vázquez Duarte et al., 2015).</i>	68
<i>Figura 25. Mapa del Cinturón Volcánico Mexicano, la zona de subducción y el área de estudio en Chalcatzingo. Además, se muestran algunos complejos volcánicos representativos: LP—La Primavera; C—Colima; CVMG— Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato; VBZ—Valle de Bravo-Zitácuaro; PH-LJ- Z—Palo Huérfano—La Joya—Zamorano; T—Toluca; CVC—Campo Volcánico Chichinautzin; P—Popocatepetl; CG—Cerro Grande; PO—Pico de Orizaba. (modificado de Gómez-Tuena et al., 2008)</i>	69
<i>Figura 26. Fotografía de la pared más vertical y con mayor diferencia altitudinal localizado en el sector oriental del Cerro Gordo.</i>	71
<i>Figura 27. Fotografías de rocas que muestran su apariencia granular y contenido de fenocristales; el bloque (izq.) se encuentra dentro de la zona Arqueológica, se observa la fractura curva y una textura holocristalina; la roca muestra (der., bloque colectado en la cima del Cerro Gordo) una textura porfírica de grano grueso de color gris y beige, con abundantes fenocristales.</i>	73
<i>Fig. 28. Mapa que muestra la localización del complejo de domos de Chalcatzingo, dentro de la amplia llanura lahárica. Las elevaciones principales son 1 Cerro Gordo Norte, 2 Delgado, 3 Ancho o Gordo, 4 Cerro del Coyote, 5 Tenango, 6 Cerro El Mirador y 7 Cerro Santa Cruz. Los puntos son sitios de muestreo geoquímico y de datación (estrella roja en el Cerro Gordo Norte) publicados por Gómez-Tuena y colaboradores (2008).</i>	75
<i>Fig. 29. Mapa geomorfológico del sector noroccidental del domo Gordo. La representación cartográfica se encuentra rotada (nótese el Norte en la esquina superior izq.). Se observa que gran parte de la zona arqueológica se encuentra dentro de un relieve de naturaleza gravitacional.</i>	78
<i>Fig. 30. Ortofotograma de los domos Gordo y Delgado al oriente de la zona arqueológica de Chalcatzingo. Se muestra los fracturamientos o lineamientos reconocidos (el mapa se encuentra rotado 31° al W).</i>	81
<i>Fig. 31. Rosa de fracturas por ocurrencia, se observa tres principales orientaciones, E-W, NW-NE y NE-SW.</i>	81
<i>Figura 32. Mapas de densidad de fracturas por ocurrencia (izq.) y longitud (der.) para cada 25m².</i>	82
<i>Figura 33. Fotografía tomada con el VANT, que muestra la parte central de la zona arqueológica de Chalcatzingo, así como el Cerro Delgado (izquierda) y el Cerro Gordo o Ancho (derecha).</i>	83

<i>Figura 34. Ortomosaico obtenido a partir del vuelo del VANT, con los puntos de posible origen de desprendimiento y bloques ubicados en la zona de depósito.</i>	85
<i>Tabla 8. Lista de bloques medidos, dentro de la zona de talud de caídos o rampa coluvial alrededor de los domos.</i>	86
<i>Figura 35. Fotografía del bloque número 10 el cual se encuentra recargado sobre una de las estructuras cercanas a la pirámide.</i>	87
<i>Figura 36. Algunos bloques pequeños depositados en la zona arqueológica que no fueron considerados por su tamaño (foto izq.), así como un bloque parcialmente cubierto por vegetación por lo cual no fue posible medirlo con las fotografías aéreas. (foto der.).</i>	88
<i>Figura 37. Se muestra de forma esquemática el vuelo manual realizado a manera de rejilla para obtener los orto mosaicos de las paredes que miran en dirección a la zona arqueológica).</i>	88
<i>Figura 38. Modelo de las paredes Sureste del cerro Delgado (fotogramas superiores) y Noreste del Cerro Gordo (fotos inferiores), que miran a la zona arqueológica de Chalcatzingo.</i>	89
<i>Figura 39. Modelo 3D que muestran un par de bloques localizado en la pared del Cerro Delgado. Se presentan las distintas perspectivas utilizadas para determinar si cumplen con las condiciones adecuadas para su desprendimiento.</i>	90
<i>Tabla 9. Tabla con los datos de todos los bloques identificados propenso a caer. 1-5 Cerro Delgado 6-18 Cerro Gordo (localizados en las figuras 41 y 42, respectivamente).</i>	91
<i>Figura 40. Obtención de coordenadas y medidas de uno de los dos bloques propensos a caer que aparecen en la figura anterior.</i>	92
<i>Figura 41. Imagen de la pared del Cerro Delgado con los sitios seleccionados de posibles colapsos para bloques de diversas dimensiones.</i>	92
<i>Figura 42. Imagen de la pared del Cerro Gordo con los sitios de origen de desprendimiento utilizados para las simulaciones.</i>	93
<i>Figura 43. Imagen de la interfaz de Pix4D con el plan de vuelo creado para la adquisición de fotografías aéreas.</i>	94
<i>Figura 44. MDS con árboles dispersos de más de 10m (izq.) y MDS sin los árboles, eliminados de la nube de puntos densa, los huecos fueron rellenados mediante la interpolación de los valores cercanos.</i>	95
<i>Figura 45. Mapa generado a partir de los resultados obtenidos con Flow-R, las zonas de origen en color verde corresponden a lugares con más de 1400 metros de elevación y con una pendiente mayor a 40°, las líneas rojas corresponden a las trayectorias generadas por la simulación.</i>	97
<i>Figura 46. Simulación generada con el software RocFall, las líneas rojas representan las simulaciones que no impactaron a la pirámide mientras que la línea azul representa el bloque que si impacto la pirámide. La línea color café del perfil, representa rocas y vegetación mientras que el suelo con vegetación es la línea verde.</i>	99

<i>Figura 47. Grafica generada por el programa con el número de rocas depositadas desde el punto de origen A hasta el punto B a 300m, la pirámide se encuentra a 240m.</i>	99
<i>Figura 48. Línea del punto de origen del bloque 12 (A) hasta el punto (B) que se encuentra 60 metros por delante de la pirámide, con la cual fue generada el perfil y la gráfica de la simulación del software RocFall (Fig. 46 y 47).</i>	100
<i>Figura 49. Mapa que muestra las 3 zonas de superficie con diferente dureza, las estructuras arqueológicas y los puntos de origen de los posibles bloques a desprenderse.</i>	102
<i>Figura 50. Mapa que muestra todas las trayectorias generadas por el programa a partir de los 18 bloques posibles (10 simulaciones por cada bloque).</i>	103
<i>Figura 51. Mapa que muestra sólo las trayectorias que afectan a algún bajo relieve o estructura arqueológica.</i>	104
<i>Figura 52. Grafica de la velocidad del bloque 11 respecto a la distancia y altura, también se muestra la topografía y la trayectoria del bloque.</i>	106
<i>Figura 53. Gráfica de la energía cinética del bloque 11 respecto a la distancia y altura, también se muestra la topografía y trayectoria del bloque.</i>	107
<i>Figura 54. Sitios de simulación a partir de fuentes de desprendimientos a manera de líneas (izq.) y superficies (der.), se colocan como referencia los sitios de interés arqueológico.</i>	108
<i>Figura 55. Mapas en donde se muestran todas las trayectorias de caída de bloques a partir de un origen lineal (mapa del lado izq.) y de las trayectorias discriminadas de acuerdo con la posibilidad de impactar a alguna estructura arqueológica (mapa de la der.).</i>	108
<i>Figura 56. Mapas en donde se muestran todas las trayectorias de caída de bloques de acuerdo con un origen determinado por un polígono (mapa de la izq.) y de trayectorias depuradas a partir de la posible afectación a alguna estructura arqueológica.</i>	109
<i>Tabla 10. Resumen de los tres programas utilizados</i>	109

Resumen

El estudio de los procesos de remoción en masa es uno de los tópicos con una amplia diversidad de enfoques y aplicaciones. Las simulaciones de estos fenómenos son un paso importante en su prevención y mitigación y concientización de procesos naturales potencialmente peligrosos. Existen distintas metodologías que permiten su simulación, clasificándose a *grosso modo* en métodos empíricos, basados en procesos dentro de un ambiente de Sistema de Información Geográfica. En el presente trabajo se evaluó el fenómeno de caída de bloques en un cuerpo rocoso relativamente homogéneo. Para ello se realizó el estudio de caracterización y simulación de afectaciones por efecto de caída de rocas en la zona Arqueológica de Chalcatzingo, Morelos. El relieve seleccionado para llevar a cabo las simulaciones fueron las paredes cercanas a vertical de los domos riolíticos, con cerca de 100m de altura. Los domos están constituidos por rocas cristalinas con fenocristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, hornblendas, biotitas y piroxenos de hasta 0.5 cm, dentro de una escasa matriz vítrea y microcristalina. Las simulaciones se realizaron en modelos digitales de superficie obtenidos a partir de técnicas fotogramétricas básicas, por medio de la toma de fotografías obtenidas con un Vehículo Aéreo No Tripulado. Con ello se obtuvo un Modelo Digital de Superficie (MDS) (sin puntos de control) con una resolución de 46 cm (y error de GPS interno del VANT es de <10 m, y comparado en terreno con imágenes de satélite es de 2.2 m máximo en la horizontal). Con los ortomosaicos se realizó una cartografía geomorfológica en donde se registraron conos de derrubios, domos disgregados y rampas de bloques caídos. También se hizo un

reconocimiento de fracturas, en donde se encontraron tres direcciones preferenciales, dos de ellas con un arreglo ortogonal (NW-SE y NE-SW). Con las fotos adquiridas de los escarpes se identificaron bloques susceptibles a desprenderse, se determinó su posición y medidas para definir sus geometrías y calcular volúmenes y masas. Con el MDS, el ortomosaico y los volúmenes, masas, ubicaciones, geometrías y medidas de los bloques se realizaron simulaciones con tres programas (*Flow-R*, *Rocfall* y *RAMMS::Rockfall*), para conocer las trayectorias. El primer simulador muestra que la mayoría de los bloques no pueden desplazarse más allá de 50 m de la pared. El segundo simulador muestra que uno de los bloques seleccionados para su desprendimiento puede impactar a la pirámide y a la mayoría de las estructuras arqueológicas. El tercer simulador presenta los resultados más precisos, prácticamente todas las estructuras arqueológicas pueden ser afectadas, con la excepción de la pirámide y elementos cercanos. La evaluación de los bloques caídos y dispersos dentro de la zona arqueológica, la obtención de su densidad, puntos de desprendimiento, geometría y volúmenes fueron parámetros fundamentales al momento de realizar las simulaciones. Por último, se concluye a partir de los resultados que la pirámide de Chalcantzingo se encuentra en una zona de baja vulnerabilidad física para ser afectada por la caída de bloques en la zona. Sin embargo, se deben implementar estrategias que reduzcan la vulnerabilidad de los bajorrelieves, siendo la vegetación una medida de biorremediación que puede tener un alto impacto en la desaceleración de los bloques.

Abstract

The study of gravitational processes is a topic with wide diversity of approaches and applications. The simulations of these phenomena are an important step in the mitigation and awareness of potentially dangerous processes. There are different methodologies that allow their simulation, roughly being classified in empirical, based on their mechanics and development in a Geographic Information System environment. In the present work, the rockfalls phenomenon was evaluated in a relatively homogeneous monolith. For this purpose, it was chosen to carry out the simulations on the archeological zone of Chalcatzingo, Morelos. The landform where the simulations were performed are the almost vertical walls of the rhyolitic dome. The rocks consist of almost crystalline texture with phenocrysts of quartz, plagioclase, potassium feldspar, hornblendes, pyroxenes and scarce biotite, in a microcrystalline to glassy matrix. The terrain model was obtained from basic photogrammetric techniques, by pictures taken with an Unmanned Aerial Vehicle. The Digital Surface Model (without control points) with a resolution of 46 cm (and GPS error of <10 m, and compared in terrain of 2.2 m), was the base of the simulations. With the orthomosaic, a geomorphological map was made, where debris cones, disaggregated domes and colluvium ramps were reported. A fracture reconnaissance was also made, where three preferential directions were found, two of them with an orthogonal arrangement (NW-SE and NE-SW). With the photos acquired of the escarpments, susceptible blocks were identified; their positions, geometry, volume and mass were determined. With this information, simulations were performed using three programs (Flow-R, Rocfall and RAMMS::Rockfall), in

order to know the possible trajectories of blocks. The first simulator shows that most of the blocks cannot move further than 50 m from the wall. The second simulator shows that one of the blocks selected for detachment can impact the archeological pyramid in the zone, and other structures. The third simulator presents the best results, where practically all the archeological structures can be affected, except for the pyramid and nearby elements. The evaluation of the fallen blocks dispersed within the archeological zone, the analysis and calculation of density, detachment points, geometry and volumes were fundamental parameters for the realization of the simulations. Finally, it is concluded from the results that the Chalcantzingo pyramid is in a zone of low vulnerability to be affected by rockfall in the area. However, strategies should be implemented to reduce the vulnerability of the *bajorrelieves* sites. Increase the vegetal cover could be a good bioremediation measure that can have a high impact on the deceleration of the blocks.

I. Introducción

La caída de bloques a pesar de ser un evento de alta ocurrencia, en México son pocos los estudios acerca de este tema, lo más cercano son las publicaciones de zonificación de peligros por procesos gravitacionales en donde se mencionan caídas de bloques (e.j.: Capra et al., 2006; Keefer et al., 2006; Carlos-Valerio et al., 2007; Hinojosa-Corona et al., 2011; Salinas-Jasso et al., 2018; Solís-Castillo et al., 2019; Montgomery et al., 2020, por mencionar algunos) o de uso de colapso de bloques para datación (Stoffel et al., 2011; Franco-Ramos et al., 2017). Sin embargo, la caída de bloques es un suceso común ya que nuestro país es de dominio montañoso, con laderas constituidas por rocas heterogéneas en cuanto a tipología y antigüedad, además de ser más susceptibles a colapsar por encontrarse en una zona sísmica como lo es el centro y margen occidental del país.

Aunque el tamaño de estos eventos es pequeño en comparación con otros peligros como terremotos, deslizamientos, inundaciones, etc. su frecuencia suele ser mayor y los daños pueden ser catastróficos e incluso mortales cuando se trata de bloques de gran tamaño. Un ejemplo de esto son los porcentajes de fatalidades por efecto de caídas de rocas en Suiza y Hong Kong, con 8 y 6 %, para un periodo de 70 y 15 años, respectivamente (Chau et al., 2003; Badoux et al., 2016).

Muchos de estos sucesos ocurren de manera natural y en lugares alejados de la población. Con el crecimiento de la mancha urbana la sociedad se acerca a zonas susceptibles de ocurrencia de estos fenómenos. Esto ocurre en la

Ciudad de México, donde cada día se urbanizan laderas o remueven material en ellas con el objetivo de construir infraestructura y equipamiento (Ejemplo: Cae roca sobre dos casas en Xochimilco - Luna, 2020). Esto genera taludes de pendientes pronunciada y en ocasiones sin obra de mitigación para procesos de remoción de masas. A pesar de que es posible identificar los bloques y las zonas susceptibles de ocurrencia de estos eventos, no es posible predecir cuándo caerán por lo que aumenta el riesgo.

El presente trabajo tratará de conocer cómo se desarrollan estos procesos, para así estar preparados e iniciar el diseño de medidas de prevención. De esta manera se pretende obtener resultados con base en un análisis espacial, enfocado al peligro geológico por remoción de bloques y particularmente aplicar el conocimiento geológico ingenieril en la localidad de Chalcatzingo y proximidad a los domos Cerro Delgado y Cerro Ancho, ubicado en el estado de Morelos (Fig. 1).

Para esto fue necesario realizar una búsqueda de simuladores de caída de bloques, los cuales cumplieran los requerimientos de accesibilidad, fácil manejo, económico o de acceso libre, precisos al momento de estimar las características del bloque y el alcance de este al considerar el rebote. A nivel mundial se han desarrollado una gran variedad de *softwares* que simulan estos procesos y con los años muchos autores los han descrito y clasificado de acuerdo con sus características, metodología de cálculo, visualización o aplicaciones (Horton et al., 2013; Filipello y Mandrone 2013; Perret et al 2004; Guzzetti et al., 2002; Pfeiffer y Bowen 1989; por mencionar algunos).

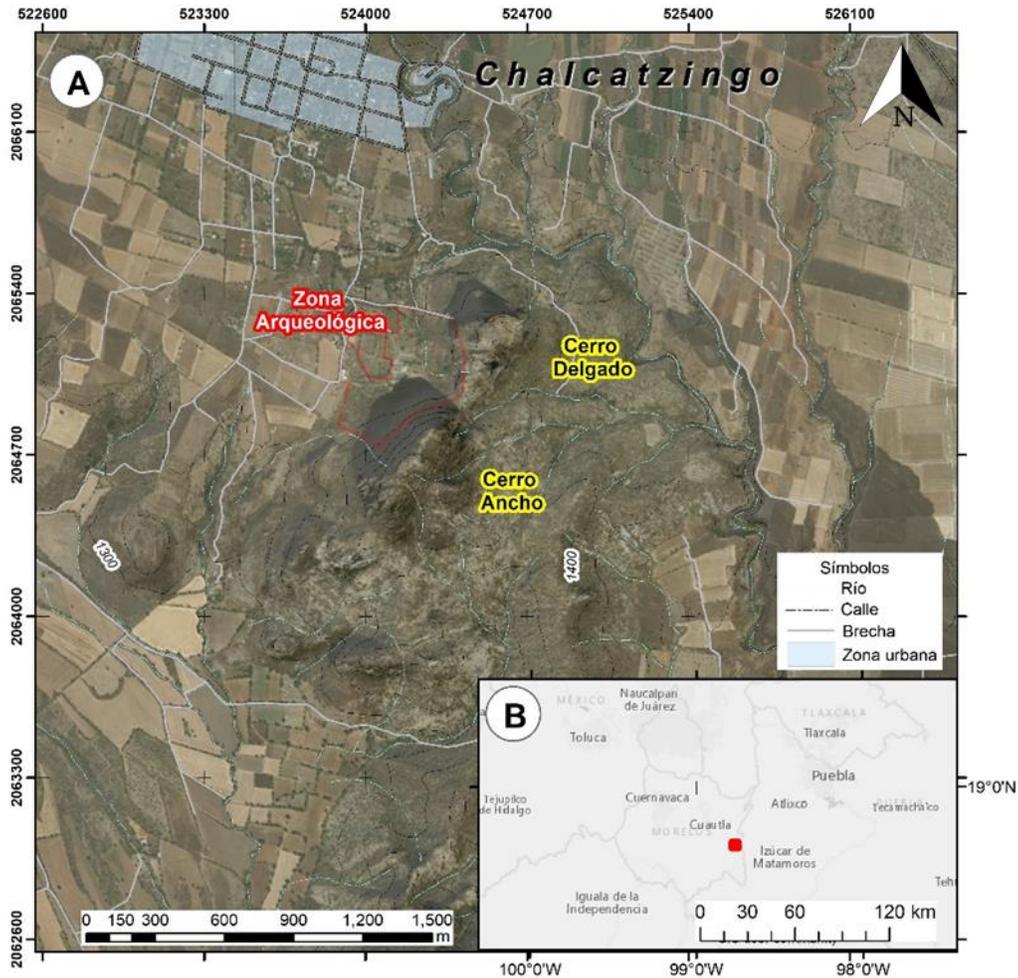


Figura 1. A) Imagen de satélite que muestra los domos Chalcatzingo y la ubicación de su zona arqueológica (polígono de línea color rojo) (equidistancia de 50 m). B) Localización de la zona de estudio (punto rojo).

I.1. Objetivos

Objetivo general

Identificar, definir y simular caídas de bloques que pudieran representar un peligro en las laderas más próximas a la zona arqueológica de Chalcatzingo (Morelos), específicamente la pirámide y determinar su posible afectación.

Objetivos particulares

Obtener un modelo digital de superficie (MDS) y de elevación por medio de fotogrametría a partir de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT o RPAS) mejor conocido como dron.

Obtener e interpretar el ortomosaico (centimétrico) de las laderas más cercanas a la zona arqueológica, pertenecientes a los domos de Chalcatzingo y así determinar puntos potenciales de caída de bloques.

Identificar y caracterizar bloques caídos en la zona para determinar los parámetros previos del fenómeno de remoción.

Calibrar y simular caída de bloques por medio del software *RAMMS::ROCKFALL*, con la intención de determinar corredores de bloques y zonas de potencial afectación.

Identificar el potencial de ser afectados por la caída de bloques, los bajorrelieves, estructuras y la pirámide que se encuentran en la zona arqueológica.

Proponer medidas de mitigación ante el fenómeno de caída de bloques en Chalcatzingo.

II. Antecedentes

II.1 Procesos de remoción en masa

Actualmente los procesos de remoción en masa (PRM) se definen como el movimiento de materiales que constituyen a una ladera en donde el factor movilizador es la gravedad (Huggett, 2007), sin que la influencia principal de otro factor erosivo como el agua, aire o hielo lo desencadene (Dikau, 1996). El movimiento requiere la reducción de fuerzas de resistencia o de un factor externo que aumente la tensión interna (Pedraza, 1996). Existen muchas fuerzas que resisten el movimiento en masa por gravedad. La tensión o estrés en los materiales producto de una fuerza aplicada sobre un área, se manifiesta como fuerzas de cuerpo (*body forces*) y fuerzas de superficies (*surface forces*) (Chapman, 1995). Las fuerzas de cuerpo se aplican a una masa y no necesitan de un contacto directo para su incidencia, tal es el caso de la gravedad y el magnetismo, mientras que las fuerzas de superficie son las tensiones aplicadas directamente a los cuerpos, ejemplo son los esfuerzos extrínsecos al material (Morales, 2018). Estos esfuerzos provocan compresión, distensión, cizalla o deformación pseudoplástica, todo ello de acuerdo con el límite plástico y elástico de los materiales que constituyen a la ladera (Morales, 2018; Bierman y Montgomery, 2014).

La litología y su estructura juegan un papel fundamental al momento de determinar los esfuerzos intrínsecos y extrínsecos. Esto se debe a que la cinemática del campo de esfuerzos y competencia de los materiales determinan el tipo de movimiento y su mecánica de desplazamiento (Bierman y Montgomery, 2014; Dikau, 1996). Cuando las rocas son muy competentes, los cambios en su estructura interna producto de la deformación frágil

producen superficies de ruptura que favorecerán el desprendimiento (Morales, 2018.) lo que origina superficies de debilidad asociadas que en ocasiones son mayores a los 45° de inclinación, lo que incrementa su inestabilidad y favorecen la ocurrencia de PRM.

Los procesos de remoción en masa son movimientos del terreno, que involucran roca, suelo, materia orgánica o una mezcla de estos. Los movimientos suceden posterior a la ocurrencia de una superficie de ruptura. Una vez movilizada la masa puede descender por la ladera de manera coherente o semi coherente independientemente de la presencia de algún agente externo (Highland & Bobrowsky, 2008). Existe una gran cantidad de clasificaciones que acotan a los PRM. Una de las más utilizadas los divide de acuerdo con el tipo de movimiento y material involucrado (Tabla 1) (Dikau, 1996).

Tabla 1. Clasificación de los procesos de remoción en masa (Tomado de Alcántara 2000)

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
Tipo	Roca (Rock)	Escombros (Debris)	Suelo (Soil)
Desprendimientos (<i>Fall</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>Rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de escombros (<i>Debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelo (<i>Soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>Topple</i>)	Vuelco o desplome de roca (<i>Rock topple</i>)	Vuelco o desplome de escombros (<i>Debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelo (<i>Soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>Succesive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>Succesive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>Succesive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>Block slide</i>)	Deslizamiento de escombros en bloque (<i>Block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelo (<i>Slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>Rock slide</i>)	Deslizamiento de escombros (<i>Debris slide</i>)	Colada de barro (<i>Mudslide</i>)
Flujo (<i>Flow</i>)	Flujo de rocas (<i>Rock flow</i>)	Corrientes de escombros (<i>Debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>Soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>Lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en roca (<i>Rock spreading</i>)	Expansiones laterales en escombros (<i>Debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>Soil spread</i>)
Complejo (<i>Complex</i>)	Ej.: alud de rocas (<i>Rock avalanche</i>)	Ej.: Flujo deslizante (<i>Flow slide</i>)	Ej.: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Alrededor del mundo y durante todo el año los procesos de remoción en masa provocan pérdidas humanas y materiales, pero suelen ocurrir más en ciertas estaciones ya que algunos fenómenos son detonados por factores como huracanes o lluvias (Capra et al., 2006; Carlos-Valerio et al., 2007) y en otros pueden ocurrir durante y posterior a actividad sísmica (Saroglou et al., 2018; Li et al, 2013; Larsen et al., 2005).

II.2 Caída de bloques

En las zonas montañosas y taludes (laderas antropogénicas) la caída de bloques es uno de los procesos más comunes, estos ocurren cuando un bloque de roca o fragmentos de roca se desprende de una pared de roca y después viajan una cierta distancia, una vez tocan sustrato se fracturan, rebotan o ruedan ladera abajo. Son imposibles de predecir con certeza, ya que suceden instantáneamente y es poco probable que alguien pueda esquivarlos. Estos eventos constituyen un peligro de gran importancia para estructuras y personas que se encuentran en zonas montañosa, especialmente si se ignora el peligro que representan (Ferrari et al., 2017; Žabota et al., 2019).

A pesar de que los bloques presentan volúmenes limitados, la caída de bloques se caracterizan por ser un fenómeno de alta energía y alto desplazamiento (Lan et al., 2007). Son procesos dinámicos dominados por atributos temporales y espaciales, como las condiciones de desprendimiento, geometría, tamaño y propiedades mecánicas (fricción estática y dinámica,

rugosidad, resistencia al volteo e índice de fragmentación) de los bloques, como de la superficie sobre la cual se desplazará (Lan et al., 2007). La caída de rocas es el movimiento en masa de sustrato rocoso más común en laderas muy inclinadas y fracturadas. Tanto la meteorización diferencial, discontinuidades erosivas y estructura interna deformada, facilitan el inicio del desprendimiento (Brideau y Roberts, 2015). Los escombros de las caídas de rocas se acumulan en un *talus*, *apron* o zona de depositación al pie de la ladera, también conocida como cono de eyección o coluvial. El arreglo del depósito comúnmente muestra que, fragmentos gruesos recorren una mayor distancia lo que facilita encontrarlos en el borde del coluvión, en cambio los materiales pequeños en la base del escarpe (Brideau y Roberts, 2015).

Los desprendimientos o caída de bloques también se engloban dentro de los procesos de remoción del “lecho rocoso” (*bedrock*) o sustrato rocoso (Brideau y Roberts, 2015). Estos procesos involucran mecanismos de emplazamiento rápido, lo mismo para un rango de pequeños bloques y frecuentes a grandes pero infrecuentes. De acuerdo con Cruden y Varnes (1996), los desprendimientos de rocas o movimientos de sustrato rocoso pueden dividirse en cinco tipos: Caída de bloques (*rockfall*), vuelco de bloques (*rock topple*), deslizamiento de rocas (*rock slide*), expansión de rocas (*rock spread*) y avalancha de rocas (*rock avalanche*). Hungr y colaboradores (2014), realizaron una actualización de los movimientos en masa de sustrato rocoso (MMSR o *BMM* por sus siglas en inglés *bedrock mass movement*), en donde incluyen la “deformación del sustrato” como un sexto tipo también descrita como *DSGSD* (*Deep Seated Ground Slope Deformation*). Los *DSGSD* o “sackungen” apelan a lentas deformaciones de carga de amplios sectores de las montañas, estas pueden incluir “grábenes”, trincheras, facetas o escarpes triangulares, crestas de compresión y abombamientos al

pie de la ladera (Brideau y Roberts, 2015). Este fenómeno responde a una carga de largo plazo en una zona montañosa o ladera; en sentido estricto, no representan un peligro, pero si es posible que la deformación provoque otros movimientos del sustrato rocoso como los mencionados anteriormente.

Por otra parte, los deslizamientos de rocas pueden ocurrir con distintas geometrías para la superficie de resbalamiento, tanto planar o rectilínea, circular como compuesta (en dos planos o a manera de cuña). Este tipo de deslizamiento no tiene una profunda superficie de resbalamiento, pero en algunas ocasiones movilizan un gran volumen de material (Brideau y Roberts, 2015; Pedrazzini et al., 2013). Estos deslizamientos de rocas pueden ser extremadamente rápidos y viajar distancias de varias decenas de kilómetros (Pedrazzini et al., 2013). Similar a los deslizamientos de rocas, pero más masivos, son las avalanchas de rocas. Estas resultan de una rápida fragmentación que involucra a grandes volúmenes de roca ($> 1\text{Mm}^3$) se asocian principalmente con el colapso de una parte de edificio volcánico; indistintamente del mecanismo que lo origine (Siebert, 1984). Debido al volumen de material que involucran pueden recorrer grandes distancias e incorporar agua a su paso, por medio de su canalización, lo cual permite se transforme en flujos o lahares.

Las expansiones de sustrato rocoso ocurren por efecto de carga y basamento deformable, típicamente por efecto de licuefacción sísmica (Hunggr et al., 2014). Aunque pueden desplazarse en cm/s, e involucrar varios millones de m^3 , este tipo de fenómeno se presenta de forma localizada o puntual.

Los movimientos complejos de sustrato rocoso son aquellos que incorporan varios tipos de remoción, distribuidos espacial y temporalmente en un mismo sitio (Brideau y Roberts, 2015). El cambio en la dinámica del movimiento

puede ocurrir por permutaciones en el mecanismo de desplazamiento, incorporación de agua o sólidos, así como cambios en la superficie de avance, lo que permitiría fenómenos de fluidización.

A) Causantes de la caída de bloques

Las razones por las cuales un bloque se desprende de una pared de roca dependen de las características de la pared. La cual puede tener diferentes niveles de meteorización, que puede provocar fracturas. Estas fracturas dependerán del tipo de roca y de los factores ambientales que hayan provocado la meteorización física o química. Además del grado de meteorización, los distintos mecanismos detonantes determinan si las caídas de bloques sucederán o no (Dorren, 2003).

Los mecanismos detonantes pueden tener varios orígenes, hielo y deshielo en las grietas de las rocas, actividad sísmica de la región, tormentas, derretimiento rápido de nieve, penetración de raíces, acuñamientos por fracturas, liberación de presión en zona de desglaciación y actividades humanas. La actividad humana como causante de la desestabilización de una ladera es un factor de poco alcance comparado con los eventos geológicos, pero localmente es de gran importancia, como en minas a cielo abierto, cortes carreteros o para construcción. A pesar de la gran variedad de detonantes de la caída de bloques, por lo general se trata de una combinación de factores, desde algún tipo particular de configuración topográfica, heterogeneidad geológica, clima y el tiempo atmosférico (Dorren, 2003).

Otro factor importante para la caída de bloques es el tipo de roca, cuando hablamos de la geología de la roca nos podemos referir a muchos aspectos, pero algunos de los más importantes son su tipo: ígnea, metamórfica o sedimentaria, ya que cada uno de ellos tiene diferentes características y se verán afectados de diferente manera por distintos factores externos. Por lo general las rocas metamórficas e ígneas suelen ser macizas un tanto competentes, mientras que las sedimentarias tienen un origen que facilita su separación en bloques, ya sea por su estratificación y su basculamiento (Ferrari et al., 2017).

Grado de fracturamiento

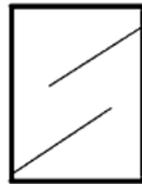
La estructura de las paredes rocosas y la cantidad de bloques en la zona de depósito dependen del grado de fracturamiento, el cual lo condiciona el número, orientación y frecuencia de discontinuidades (Ferrari et al., 2017).

El sistema de clasificación geomecánica más popular y de mayor uso es el *Geological Strength Index (GSI)*, el cual es un método numérico inicialmente utilizado para el diseño de túneles; evalúa la calidad de la roca, en donde incluye información acerca de las características del macizo rocoso así como sus discontinuidades (Fig. 2), todo ello basado en datos obtenidos a partir de observaciones geológicas básicas (Ferrari et al., 2017; Marinós et al., 2005).

Meteorización de la roca inferior o socavación

Esto sucede cuando la roca menos competente se erosiona de una manera más rápida que las rocas que la rodean (Fig. 3A). Cuando una roca más resistente se encuentra por encima de otra que lo es menos, ésta quedará colgando, su inestabilidad aumente y su probabilidad de caer también. Esto puede ocurrir debido a que una de las dos litologías tiene un mayor número de fracturas, lo cual hará que bloques pequeños caigan, de esta manera dejan

un bloque de mayor tamaño sin soporte. Este efecto es común en estratificaciones alternantes que se encuentren subhorizontales (Ferrari et al., 2017).



INTACTO O MASIVO – roca sin aparente fracturamiento, continua in situ, con algunas discontinuidades ligeramente espaciadas.



EN BLOQUE – roca masiva poco perturbada de apariencia ajustada en forma de bloques cúbicos y con discontinuidades en conjuntos de tres intersecciones.



ALTAMENTE EN BLOQUE – roca parcialmente perturbada con múltiple facetado angular en bloques y conjuntos de 4 intersecciones.



BLOQUES PERTURBADOS, SÓRDIDO – roca con deformación, bloques angulares con múltiples intersecciones de discontinuidades. Persisten los planos de las capas y/o esquistosidad.



DESINTEGRADO – pobre bloqueo de fracturas, roca muy fracturada, con mezclas de clastos angulares y redondeados.



LAMINADO / CIZALLADA – falta de bloqueo entre las discontinuidades, esquistosidad y/o planos de cizalla.

Figura 2. Parte del Geological Strength Index (GSI), donde se muestra la estructura de la roca así como su grado de fracturamiento (editado de Marinós et al., 2005).

Deslizamiento de bloques

El desprendimiento de un bloque debido a deslizamiento está directamente relacionado con la orientación de las discontinuidades del macizo rocoso (Fig. 3B), específicamente cuando estas se encuentran con una dirección hacia la ladera (Ferrari et al., 2017).

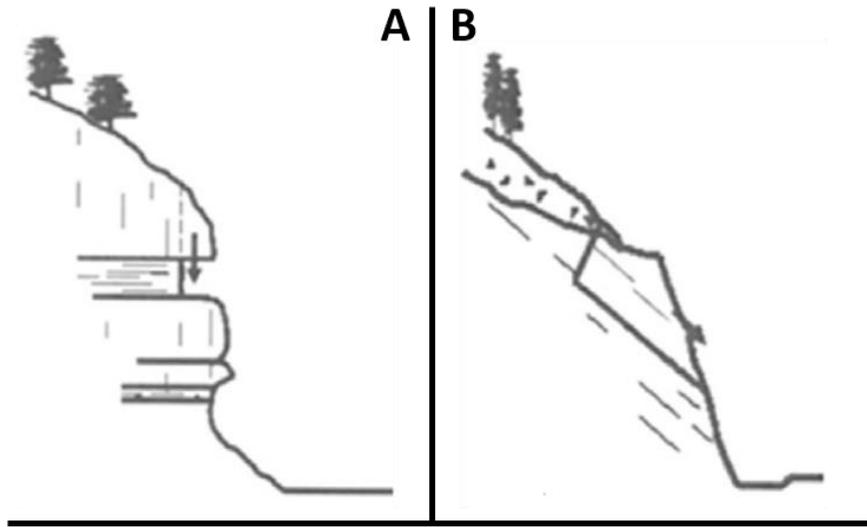


Figura 3A) Inestabilidad por meteorización de la roca inferior. B) Inestabilidad por deslizamiento (Tomados de Ferrari et al., 2017).

Volteo de bloques

El volteo de bloques ocurre principalmente como respuesta a la orientación de un conjunto de discontinuidades en el macizo rocoso y su relación respecto al muro de roca (Fig. 4). Este tipo de desprendimiento se presenta cuando la orientación de las discontinuidades tienen un ángulo pronunciado (sub vertical) y una dirección de inclinación opuesta a la dirección de inclinación del muro (Ferrari et al., 2017), denominada como extraplomo.



Figura 4. Inestabilidad por volteo (modificado de Ferrari et al., 2017).

B) Tipos de movimientos durante la caída de bloques

Posterior al desprendimiento del bloque este descenderá por la pendiente con diferentes tipos de movimientos, los cuales están condicionados principalmente por el grado de inclinación (Fig. 5). Hay tres tipos de movimientos principales: caída libre, rebote en la superficie y rodadura o translación sobre la superficie (Dorren, 2003).

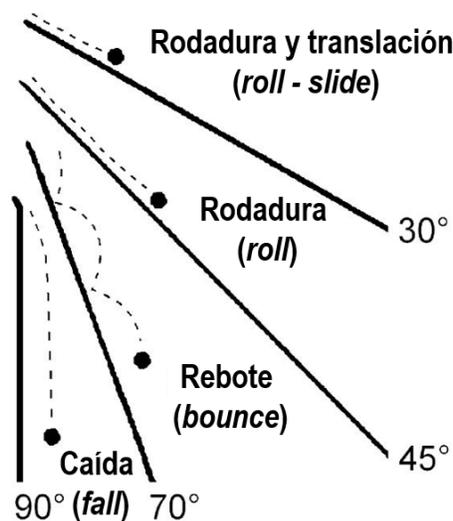


Figura 5. Tipos de movimiento durante la caída de bloques en relación con el grado de inclinación de la pendiente (modificada de Dorren, 2003).

Caída libre

La caída libre de los bloques ocurre en pendientes muy pronunciadas por lo general superior de 70° (Fig. 5). En dicha inclinación el movimiento se transforma gradualmente de caída libre a rebote. En la caída libre pueden ocurrir dos fenómenos: la translación del centro de la roca y la rotación del bloque alrededor de dicho centro. Es casi imposible que un bloque de caída inicie con una geometría esférica, por lo que la rotación puede provocar que al impactar la dirección cambie. La fricción con el aire no tiene efectos visibles sobre el bloque y aunque el choque con otros bloques, que también caen, si pueden afectar la dirección, es muy difícil analizar o simular dichos sucesos (Dorren, 2003).

Movimiento sobre o cerca de la superficie

A medida que el bloque cae, la pendiente de la ladera disminuye lo que provoca que la roca impacte con la superficie y comience a rebotar (Fig. 5). Comúnmente en el primer rebote la roca tiende a romperse, especialmente las rocas poco competentes. Se rompa o no la roca en el primer impacto, la roca perderá del 75% al 86% de la energía obtenida durante la caída libre en ese primer golpe (Dorren, 2003).

Cuando la inclinación de la ladera este por debajo de 45° los rebotes comenzarán a obtener momento rotacional y gradualmente iniciará la rodadura sobre la superficie. Cuando el bloque se encuentra rodando, la mayor parte del tiempo permanece en contacto con la superficie y durante la transición de rebote y rodar, el bloque girará a una alta velocidad y solo los bordes con mayor radio estarán en contacto con la superficie (Dorren, 2003). Por lo cual, el centro de gravedad tenderá a moverse en una línea recta que

le hará perder la menor cantidad de energía, por ello el movimiento de rodar con pequeños rebotes es la manera más eficiente de desplazamiento (Dorren, 2003).

Los bloques también pueden deslizarse o trasladarse sobre la superficie de la ladera (Fig. 5), pero esto generalmente solo ocurre al inicio o fin del movimiento (Dorren, 2003). Si la pendiente aumenta el deslizamiento puede convertirse en alguno de los otros tipos de movimiento y si la pendiente no cambia, durante el deslizamiento, el bloque tenderá a detenerse debido a la pérdida de energía causada por la fricción contra la superficie (Dorren, 2003).

Retardantes del movimiento de los bloques

La velocidad y el punto en el cual el o los bloques se detienen, depende directamente de la pendiente de la ladera. Pendientes pronunciadas aumentarán la velocidad y pendientes más subhorizontales la disminuirán. La velocidad también se puede ver afectada por las condiciones de la superficie de la ladera como la tierra suelta o suelo, grava y/o vegetación (Dorren, 2003).

Las rocas de menor tamaño son más susceptibles a estos efectos retardantes que las rocas más grandes. Primero, porque la energía cinética total es menor en bloques pequeños; segundo, es más sencillo que un objeto masivo, como un árbol detenga a los bloques pequeños; tercero, porque es más fácil que un bloque pequeño se detenga en las depresiones de la ladera. Es por esto que ocurre una distribución específica del tamaño de los bloques, los bloques más pequeños se encuentran más cerca del origen en una ladera cuando no se mueven por caída libre, donde ocurre lo opuesto (Dorren, 2003).

El movimiento de un bloque cesa típicamente de manera abrupta, más que gradual. Esto se debe a la pérdida de energía que ocurre debido a la fricción y colisión con la superficie de la ladera. Las fuerzas de fricción no solo

dependen de la forma de la roca, sino que también se ven afectadas por las características de la superficie. Estas características pueden variar en poca distancia, por lo que las fuerzas de fricción son representadas, de manera más sencilla, por el ángulo de fricción dinámico, el cual depende de la rugosidad de la superficie, entendida como la variación de la altura perpendicular a la pendiente en un cierto tramo de la zona de depósito (Dorren, 2003).

Ecuación del ángulo de fricción dinámico para una roca que cae (Dorren, 2003):

$$\tan\phi_{\mu d} = \tan\phi_0 + k * \frac{d}{(2 * R)}$$

Donde:

$\phi_{\mu d}$ = ángulo de fricción dinámico (°)

ϕ_0 = ángulo de fricción interna (°) (entre 20.3° y 33.8°)

k = constante (entre 0.17 y 0.26)

d = el diámetro medio de las rocas en la superficie de la pendiente (m)

R = radio de la roca (m)

La vegetación es un factor retardante importante durante la caída de bloques, principalmente cuando se trata de bosques. Una zona boscosa puede detener de tres a diez veces más la caída de los bloques, que una zona ausente de árboles (Fig. 6). Por lo tanto, para eventos de baja magnitud, los bosques representan una muy buena protección (Dorren, 2003).

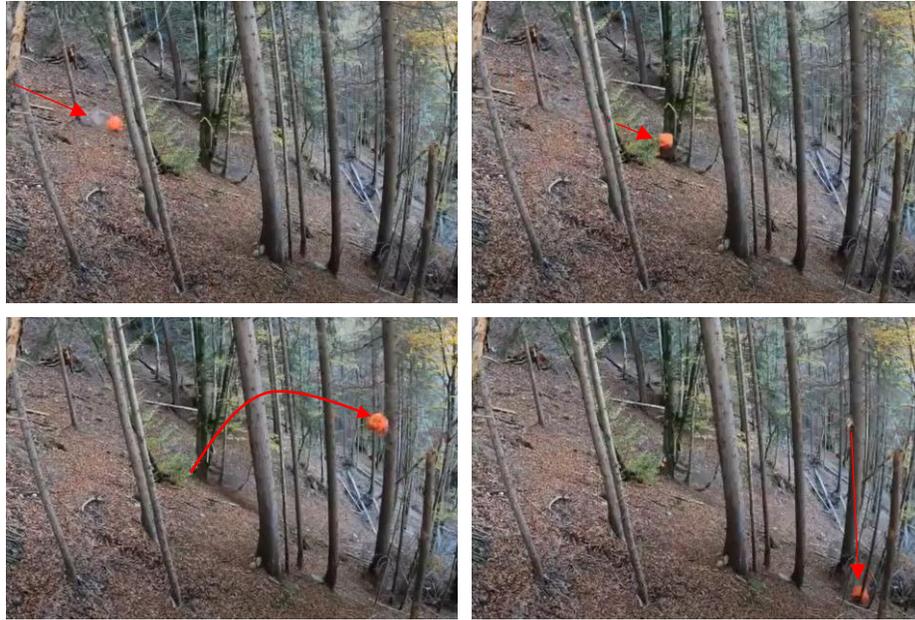


Figura 6. Secuencia de imágenes donde un bloque sub-redondeado de 800 kg desciende por una ladera a gran velocidad (imagen superior izq.), impacta con un árbol (imagen superior der.) lo que causa un rebote (imagen inferior izq.) y un segundo impacto con otro árbol al regresar a la superficie de la ladera continua su recorrido con una menor velocidad (imagen inferior der.). Este experimento fue realizado durante el otoño de 2019 en Schraubachtobel, Schiers (Suiza) en la búsqueda de un mejor entendimiento del efecto del bosque en la mitigación de peligros por caída de bloques, conducido por RAMMS (Numerical Rapid Mass Movement Simulation) de Suiza (modificado de RAMMS, 2019).

C) Peligros por caída de bloques

Los peligros por PRM han sido definidos como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de cierta magnitud, en un área definida durante un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo, para los PRM que poseen una zona de depósito alejada del origen como la caída de bloques, la probabilidad de ocurrencia debe incluir el concepto de propagación. Esto se refiere a la transferencia de masa y energía desde el origen a la zona de depósito más alejada; que para la caída de bloques corresponde a varios cientos de metros. Es por esto por lo que el peligro por caída de bloques, de acuerdo con Volkwein y colaboradores (2011), depende de:

- Una probabilidad de inicio obtenida a partir de la probabilidad de que una caída de bloques de cierta magnitud ocurra a partir de un determinado origen.
- La probabilidad de que los bloques que caen alcancen una ubicación específica en la ladera.
- La intensidad de la caída de bloques.

Por lo tanto, el peligro por caída de bloques puede ser definido como la probabilidad de que una ubicación específica en una ladera sea alcanzada por un bloque que cae con una cierta intensidad (Fig. 7). Puede ser expresada de la siguiente manera (Volkwein et al., 2011):

$$H_{ijk} = P(L)_j * P(L|L)_{ijk}$$

Donde:

$P(L)_j$ = Probabilidad de inicio de una caída de bloques de una magnitud j (determinada por su volumen)

$P(L|L)_{ijk}$ = Probabilidad de alcance, probabilidad de que un bloque pueda llegar a una ubicación i dada una cierta intensidad k (energía cinética)

Evaluación del peligro: Variables que condicionan el peligro

Para la evaluación del peligro es necesario tomar en cuenta una gran cantidad de variables que afectan a la ladera. Estas pueden ser clasificadas en parámetros internos y externos. Los parámetros internos son aquellas características intrínsecas de la ladera, a continuación algunos ejemplos dados por Volkwein y colaboradores (2011):

- Morfología: el tipo de ladera (ángulo, altura, perfil, etc.), geometría de superficie expuesta y tipología del relieve (en función del principal proceso erosivo), entre otros.
- Geología: tipo de roca, intemperismo, continuidad de las estructuras geológicas, estratos, tipo de depósitos, pliegues, etc.

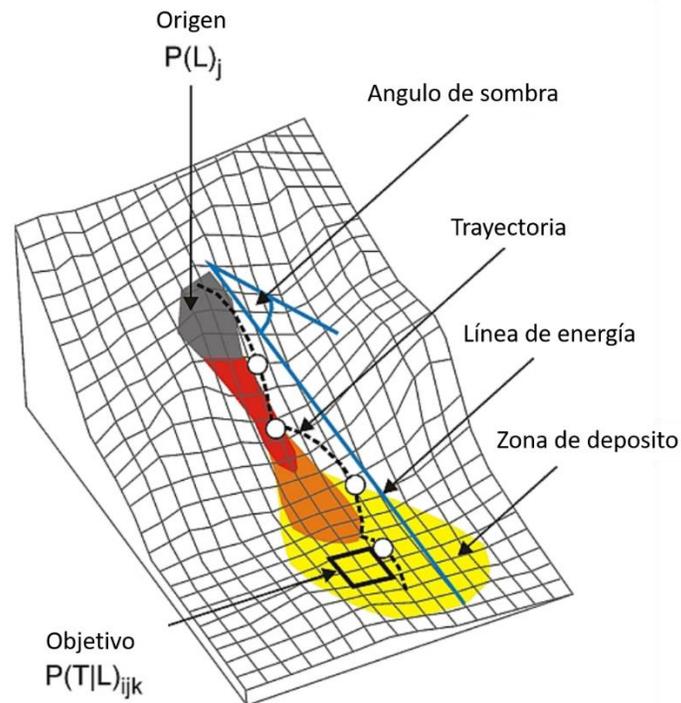


Figura 7. Peligro por caída de bloques. (modificado de Volkwein et al., 2011).

- Fracturamiento: espaciamiento, densidad de fracturas, profundidad de discontinuidades, etc.
- Propiedades mecánicas de la roca y del suelo: cohesión, ángulo de fricción, etc.
- Actividad: frecuencia de caídos anteriormente o la evidencia de otros PRM.

- Hidrogeología: permeabilidad, continuidad de flujo, nivel freático, etc.

Los parámetros internos pueden evolucionar con el tiempo debido a factores externos, los cuales son (Volkwein et al., 2011):

- Efectos gravitacionales.
- Circulación del agua: hidrología o hidrogeología, clima, precipitación en forma de lluvia o nieve, tasa de infiltración, flujo subterráneo, etc.
- Intemperismo: Intensidad y tipo.
- Erosión: Procesos dominantes y frecuencia de estos.
- Sismicidad y actividad tectónica: Cercanía, recurrencia y aceleración, entre otros.
- Microclima: ciclos de hielo y deshielo, exposición al sol, permafrost, etc.
- Actividades humanas: factores antropogénicos, es decir prácticamente cualquier actividad humana.

II.3 Modelos de caída de bloques

Es de gran importancia la identificación de zonas de peligro para así poder reducir o mitigar riesgos potenciales, los modelos espaciales pueden ser de gran utilidad al definir estas zonas, ya que podemos identificar las áreas de desprendimiento, la trayectoria que seguirían los bloques y las zonas de depósito a diferentes escalas (Bühler et al., 2016; Žabota et al., 2019)

Para el análisis de caída de bloques es necesario un buen procesamiento de información espacial. Existen dos tipos de modelos para caída de bloques siendo el primero el bidimensional, que se basa en un perfil de ladera, éste se

ve limitado al no ofrecer una representación espacial de la distribución de las trayectorias. El segundo tipo de modelo es el tridimensional que usan información topográfica obtenida de otras fuentes como Modelos Digitales de Elevación (MDE o *DEMs* en inglés), rejillas o redes de triángulos irregulares (*GRIDs* y *TINs* por sus siglas en inglés), que son estructuras de uso común en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La conversión a estos formatos consume tiempo, especialmente en áreas de gran tamaño. Estos modelos solo usan la información proporcionada por los SIG, pero no realizan ni dependen de procesos realizados por ellos (Lan et al., 2007).

A) Clasificación de los modelos para la caída de bloques

A través de los años muchos autores han dividido los modelos de caída de bloques en diferentes grupos o tipos. Azzoni (1995; en Vo, 2015) los divide en dos tipos: los modelos que consideran el bloque como un objeto sin una masa propia (masa cinemática) o con la masa ubicada en un solo punto o masa compacta (*lumped mass*) y los modelos que consideran al bloque como un cuerpo con su propia forma y volumen (Tabla 2).

Dorren (2003) en cambio, divide los modelos en tres grupos (Tabla 3): (1) los modelos empíricos, (2) los modelos basados en procesos y (3) los modelos basados en un SIG:

1. Los modelos empíricos para la caída de bloques generalmente se basan en la relación entre factores topográficos y la distancia de la zona de depósito de uno o más eventos. En ocasiones estos modelos son llamados modelos estadísticos (Vo, 2015).

Tabla 2. Tabla con una selección de los modelos de trayectorias de caída de bloques (tomada de Volkwein et al., 2011)

Modelo/nombre del programa	Referencia/año*	Dimensión espacial	Enfoque	Probabilístico	Bosque*
S.N.	Ritchie, 1963	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	No	No
Método de elementos discretos	Cundall, 1971	2-D (perfil de ladera)	Cuerpo rígido	No	No
Modelo de cómputo de caída de rocas	Piteau y Clayton, 1976	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	Parcialmente	No
S.N.	Azimi et al., 1982	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	Si	No
S.N.	Falcetta, 1985	2-D (perfil de ladera)	Cuerpo rígido	No	No
ROCKSIM	Wu, 1985	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	Si	No
SASS	Bozzolo y Pamini, 1986	2-D (perfil de ladera)	Híbrido	Si	No
EBOUL-LMR	Descoedres y Zommermann, 1987; Labiouse et al., 2001	3-D (x, y, z)	Cuerpo rígido	No	No
PROPAG/CETE Lyon	Rochet, 1987	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	No	No
S.N.	Hungr y Evans, 1988	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	No	No
CRSP (4.0)	Pfeiffer y Bowen, 1989; Jones et al., 2000	2-D (perfil de ladera)	Híbrido	Si	No
S.N.	Van Dijke y van Westen, 1990	2-D (x, y)	Masa compacta	No	No
S.N.	Kobayashi et al., 1990	2-D (perfil de ladera)	Cuerpo rígido	No	No
Rotomap	Scioldo, 1991	3-D (x, y, z)	Masa compacta	Si	No
CADMA	Azzoni et al., 1995	2-D (perfil de ladera)	Híbrido	Si	No
Rockfall (Dr. Spang)	Spang y Sönser, 1995	2-D (perfil de ladera)	Cuerpo rígido	Si	Si
ROFMOD 4.1	Zinggeler et al., 1990; Krummenacher y Keusen, 1996	2-D (perfil de ladera)	Híbrido	Si	Si
3-D-Geotest-Zinggeler	Krummenacher et al., 2008	3-D (x, y, z)	Híbrido	Si	Si
RocFall	Stevens, 1998	2-D (perfil de ladera)	Masa compacta	Si	No
Sturzeschwindigkeit	Meissl, 1998	2-D (x, y)	Masa compacta	No	No
STONE	Guzzetti et al., 2002	3-D (x, y, z)	Masa compacta	Si	No
STAR3-D	Dimnet, 2002; Le Hir et al., 2006;	3-D (x, y, z)	Cuerpo rígido	No	Si
Rocky3	Dorren y Seijmonsbergen, 2003	2.5-D (x,y acoplado con el perfil)	Híbrido	Si	Si
HY-STONE	Crota et al., 2004; Frattini et al., 2008; Agliardi et al., 2009	3-D (x, y, z)	Híbrido	Si	Si
RockyFor	Dorren et al., 2004; Dorren et al., 2006; Bourrier et al., 2009	3-D (x, y, z)	Híbrido	Si	Si
DDA	Yan et al., 2007	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.
RAMMS::Rockfall	Christen et al., 2007	3-D (x, y, z)	Cuerpo rígido	Si	Si
RockFall Analyst	Lan et al., 2007	3-D (x, y, z)	Masa compacta	Parcialmente	No
PICUS-ROCKnROLL	Woltjer et al., 2008; Rammer et al., 2007	3-D (x, y, z)	Masa compacta	Si	Si

S.N. Sin nombre reportado; * las referencias son las reportadas por Volkwein et al. (2011), y no aparecen necesariamente en este trabajo; x Considera la cobertura boscosa; S.D. Sin dato.

Un enfoque **Híbrido** implica un sistema de cálculo dinámico que exhibe tanto un comportamiento discreto como continuo, por lo que el sistema integra tanto el movimiento de un flujo (o translación) como de salto. El **Cuerpo rígido**, implica una idealización de un cuerpo sólido en donde la deformación es ignorada. La **Masa compacta** solo considera que se asume un concentrado de masa que forma parte de un cuerpo rígido (Vo, 2015).

2. Los modelos basados en procesos describen o simulan los tipos de movimientos, durante la caída de bloques sobre las superficies con una pendiente definida.

Los modelos basados en un SIG están basados en procesamiento de modelos ráster, cuya información proviene del análisis del sitio en estudio. Consisten en 3 pasos, el primero, identificar las zonas de origen en el área de interés; el segundo, determinar la ruta del bloque; y tercero, definir la extensión de la zona de depósito o área de influencia.

Volkwein y colaboradores (2011) agrupan los modelos existentes primero por sus dimensiones espaciales (Tabla 3) en:

- 1) Modelos de trayectoria bidimensionales (2D): Simula la trayectoria de la caída del bloque en un espacio reducido. La inclinación del perfil en donde se proyecta la trayectoria es definida enteramente por el usuario con la definición de los valores x , y , que suelen ser la línea de máximos valores.

- 2) Modelos de trayectoria 2.5-D o cuasi 3-D: Son modelos asistidos por un SIG en donde se predefinen rutas de caída. La característica que los distingue de los modelos bidimensionales es que la dirección de la trayectoria del bloque en x , y , es independiente de la cinemática del bloque y de la trayectoria en el plano vertical.

- 3) Modelos de trayectoria 3-D: En estos modelos se estiman las trayectorias del bloque en x , y , z , para cada punto de potencial desprendimiento.

Tabla 3. Tabla con las características principales de los modelos para caída de bloques más utilizados actualmente (tomada de Vo, 2015)

Modelo	Empírico	Con base en el proceso	Con base en el SIG	Dimensión	
				2-D	3-D
CADMA*		•		•	
CONEFALL+		•		•	
Flow-R+	•			•	
NMM+		•		•	
RAMMS::Rockfall◊		•	•		•
RocFall+		•		•	
Rockfall Analyst (RA)+		•	•		•
Rockyfor3D*		•	•		•

* Enfoque Híbrido; + Masa Compacta; ◊ Cuerpo rígido.

B) Enfoques de los modelos utilizados

Para calcular las trayectorias y zonas de depósitos de los bloques caídos, existe una gran variedad de modelos (Tabla 3). De acuerdo con lo descrito en la sección anterior se agrupan en: 1. empíricos 2. basados en procesos 3. basados en un SIG (Dorren, 2003).

Modelos empíricos

Los modelos empíricos de caída de bloques tienen un sustento estadístico y se basa en la correlación entre factores topográficos, las trayectorias y zonas de depósito de uno o más eventos. Los modelos empíricos se enfocan sólo en determinar los puntos de origen, así como los puntos de depósito de los bloques. No se obtienen las trayectorias ni el tipo de movimientos que presentan los bloques durante su caída o desplazamiento a través de la ladera (Dorren, 2003).

Existen dos relaciones estadísticas que utilizan este tipo de modelos. La primera es la correlación logarítmica inversa entre el volumen del bloque y la relación entre la máxima caída vertical y la máxima distancia horizontal

recorrida. La segunda es la relación logarítmica entre el volumen del bloque y el área que cubre el depósito (Dorren, 2003).

Existe algo llamado el “Principio de *Fahrböschung*” puede utilizarse como predictor de las zonas de depósito o lugar de reposo que tendrá un bloque después de su caída. El “Principio de *Fahrböschung*” es el ángulo entre el plano horizontal y una línea que se forma al unir el punto más alto del posible origen de desprendimiento, con el bloque más alejado en la zona de depósito (Fig. 8), esta línea se considera como la que alcanzaría la trayectoria hipotética de una caída del bloque, denominada también como, línea de energía (Dorren, 2003). Otro principio que puede ser utilizado es el del “ángulo mínimo de sombra”, que se forma por una línea recta entre el punto más alto de la ladera con pendiente determinada (sin incluir la zona de caída libre) hasta el bloque en la zona de depósito más alejado del origen (Fig. 8) (Dorren, 2003).

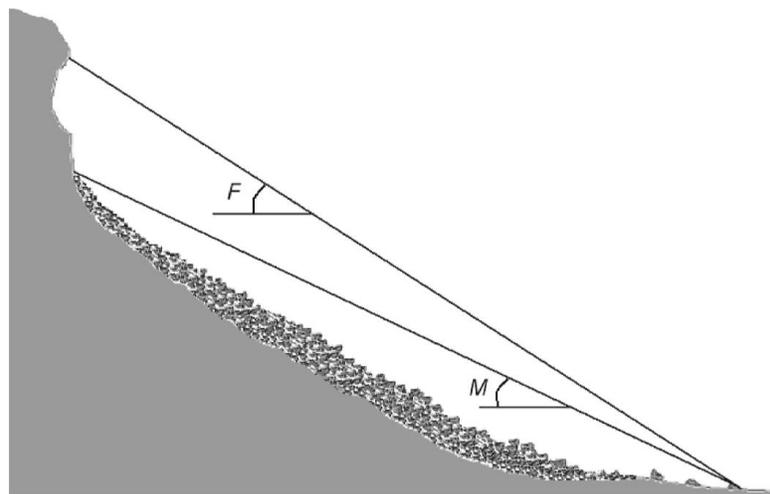


Figura 8. Línea del “Principio *Fahrböschung*” (F) y “ángulo mínimo de sombra” (M) de una ladera (tomado de Dorren, 2003).

El ángulo mínimo de sombra se encuentra entre los 22° y los 30° (siendo 27.5° el ángulo promedio que se obtiene en campo). El ángulo mínimo de sombra

es preferible al ángulo obtenido mediante el “Principio de *Fahrböschung*”, aunque ambos deben ser utilizados para una aproximación inicial si se desea conocer la máxima distancia de desplazamiento de un bloque y por lo tanto su zona de depósito (Dorren, 2003).

Otras formas empíricas de predecir las máximas distancias de desplazamiento, así como las zonas de depósito con parámetros topográficos sencillos son las utilizadas en los “Modelos con base en la altura”. En estos se determina a la máxima distancia más allá de la base de la ladera, puede ser obtenida al derivar la combinación de las dos alturas verticales la de caída libre y la de la ladera. Otro es el “Modelo α - β ” que se basa en la correlación de energías promedio entre un evento fuera de lo común (un bloque que se detiene más allá de la base de la ladera) y un evento promedio (un bloque que se detiene en la base de la ladera). El “Modelo de la relación de la máxima distancia” tiene como base la relación entre la distancia horizontal de la zona de depósito con la distancia horizontal de la ladera, siendo este último uno de los modelos más precisos (Dorren, 2003).

Modelos basados en procesos

A diferencia de los modelos empíricos los modelos basados en procesos describen o simulan los tipos de movimiento durante la caída de bloques sobre las laderas (Dorren, 2003). Uno de estos modelos es el que determina el transporte de las rocas sobre una ladera, para ello se requiere suponer que las rocas solo se deslizan sobre la ladera. Por lo cual, lo primero es calcular la velocidad del bloque en la base de la ladera con la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{2 * g * h}$$

Donde:

v = velocidad (m/s)

g = aceleración por la gravedad (9.81 m/s²)

h = altura de la caída (m)

Las componentes de la velocidad de caída tangenciales o paralelas a la superficie son calculadas una vez se asume que las componentes de la velocidad se conservan durante el primer impacto del bloque con la superficie. Finalmente, la posición última se calcula por la relación de la velocidad de caída con la fuerza de fricción, determinada a partir de la ecuación del ángulo de fricción dinámico ($\tan\phi_{\mu d} = \tan\phi_0 + k * \frac{d}{(2*R)}$; vista en el apartado de [Retardantes del movimiento de los bloques](#)).

Existe una gran variedad de modelos basados en procesos, pero entre ellos comparten tres factores principales: que son bidimensionales con una escala que solo se enfoca en la ladera, lo cual restringe al modelo a solo determinar el comportamiento vertical del bloque y no es posible simular los movimientos laterales que éste presenta. La trayectoria de caída está compuesta de segmentos en línea recta los cuales poseen una pendiente igual a lo largo de su extensión (Fig. 9). Finalmente, el movimiento es simulado con dos fases: una en contacto con la superficie (rodando o deslizándose) y otra en la cual el bloque no se encuentra en contacto (rebota) sobre la superficie (Fig. 9). Estas fases de rebote son simuladas con una ecuación parabólica basada en la velocidad inicial en las componentes x, y, y una aceleración debida a la gravedad (Dorren, 2003).

Algunos problemas con los modelos bidimensionales basados en procesos es que algunos consideran que la masa del bloque que cae está concentrada en un solo punto, mientras que otros modelos consideran al bloque como un

elipsoide. Además, algunos modelos distinguen entre rebotar, deslizar y rodar sobre la superficie y otros los agrupan en una serie de impactos y rebotes (Dorren, 2003). Todos los modelos mencionados no simulan el comportamiento de varios bloques cayendo, ni las interacciones que tienen entre ellos.

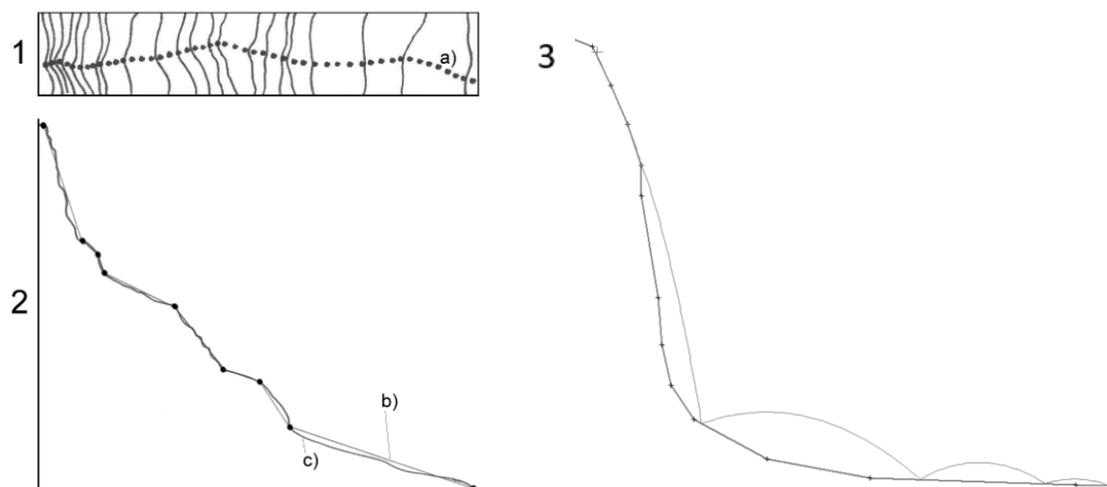


Figura 9. La imagen superior (1), es una vista en planta que muestra el camino real por el cual se desplaza la roca durante su caída (a), se muestran las curvas de nivel como referencia. La figura 2 muestra la ladera en segmentos (b), los cuales son usados en modelos de dos dimensiones, siendo (c) la pendiente real de la ladera. La figura 3 muestra las dos fases simuladas, así como las parábolas que pueden llegar a ocurrir (modificada de Dorren, 2003).

Modelos basados en un SIG

Los modelos basados en un SIG son aquellos que están corriendo dentro de un ambiente de cómputo georeferido o están basados en la información proporcionada por un *raster* generado o preprocesado en un SIG. Estos modelos están compuestos de tres procesos principales, el primero, es el de identificar las zonas de desprendimiento de bloques en las áreas de interés, el segundo determina las rutas por las cuales el bloque pasará y el último calcula la longitud de la zona de depósito (Dorren, 2003).

Los primeros modelos en utilizar un SIG surgen 1987, en ellos el único criterio utilizado fue el ángulo de la ladera, al cual eventualmente se añadió la información estructural de la ladera. Las maneras más sencillas de obtener las zonas de desprendimiento son los gradientes de inclinación de alto valor o las áreas próximas a un escarpe (Volkwein et al., 2011).

Para la determinación de las trayectorias los modelos basados en un SIG utilizan un análisis de vecindario sobre un *raster* en secciones de 3X3 o 5X5, a partir de una celda central. También consideran la máxima diferencia en alturas calculada con las celdas adyacentes de 8 o 16 (Fig. 10), de acuerdo con el caso y dividido entre la distancia que hay entre las dos celdas a evaluar. Para representar el terreno se utilizan múltiples *rasters* los cuales representan una cierta propiedad o variable, cómo la elevación, vegetación, geología y rugosidad (Dorren, 2003).

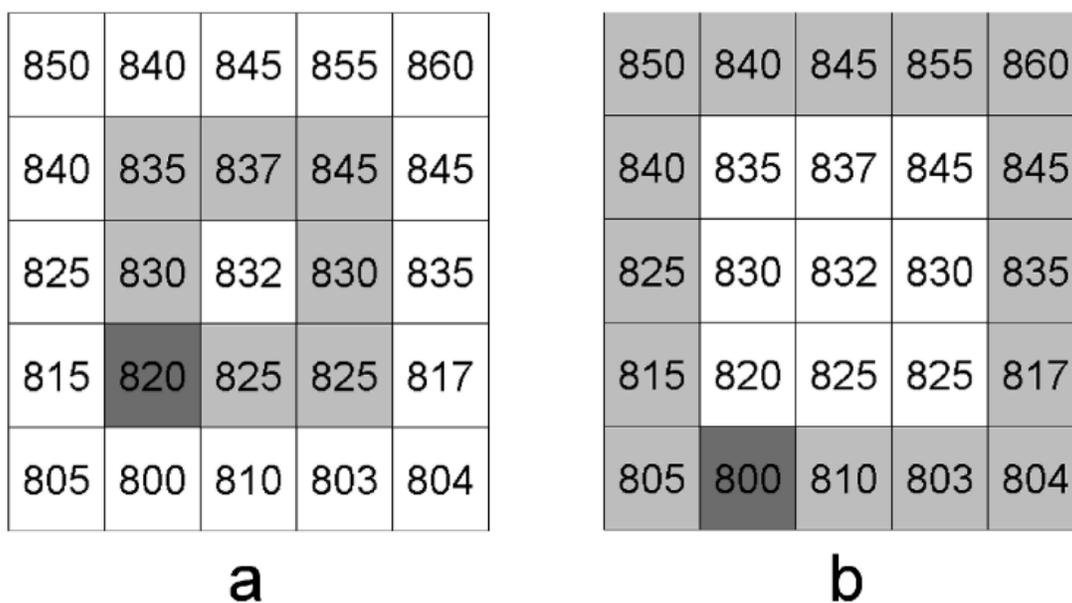


Figura 10. a) Ventana de 3x3 donde la dirección de caída desde la celda central es la gris oscura. b) Ventana de 5x5 en donde la dirección de caída se determina para la celda central en dirección a la celda gris oscura (tomado de Dorren, 2003).

De acuerdo con Meissl (1998; en Dorren, 2003) y Van Dijke y Van Westen (1990), para la obtención de las zonas de depósito es posible utilizar uno de los modelos basados en el principio del mínimo ángulo de sombra (o “*Schattenwinkel*”) y el de tipo “*Geometrische Gefälle*” o Pendientes geométricas basado en el ángulo de la línea más corta desde el punto de origen al punto depósito.

La ventaja de usar modelos 3D que trabajan en conjunto con los SIG es que no es necesario pasar la información a otro programa, sino que se puede procesar dentro del mismo, por lo cual es de gran utilidad para áreas de mayor tamaño.

Como ya hemos visto la mayoría de los modelos se usan para predecir los posibles riesgos que pueda provocar la caída de bloques ya sea en una escala regional o en una a local. En los últimos años los modelos tridimensionales basados en un SIG han tenido un gran avance ya que son muy útiles para diagnosticar las zonas de depósito, así como las trayectorias en escalas regionales.

III. Métodos

Para cumplir con el objetivo del estudio fue necesario la obtención de un MDS en el cual se realizaron simulaciones de caída de bloques específicos, los cuales fueron identificados con ayuda de modelos en 3D generados a partir de las fotografías del VANT. Las simulaciones obtenidas fueron elaboradas a partir de tres métodos: un método de tipo empírico, otro con base en procesos y el último dentro de un SIG, para así tener una comparación entre los diferentes enfoques y poder obtener una variedad de resultados más amplia. Los tres métodos seleccionados tuvieron un enfoque que permitió determinar las rutas de los caídos, así como la zona potencial de depósito. De esta manera los resultados fueron comparados, tanto en sus características intrínsecas como con su capacidad de determinar un daño o peligro potencial.

III.1 Modelo digital de superficie

Un MDS contiene las elevaciones de todo lo que se encuentre sobre la superficie (vegetación, edificios, etc.) mientras que el MDE muestra el relieve del suelo sin ninguna estructura, también existe el Modelo Digital del Terreno (MDT) es similar al MDE, pero muestra algunos lineamientos de la superficie (calles, ríos).

Debido a que la resolución de las imágenes satelitales que se encuentran disponible libremente (ASTER, SENTINEL 2) no permitía tener un par

estereoscópico que tuviera una resolución de 10 o 5 m, se decidió obtener imágenes de alta resolución mediante dron. Como el MDE y el MDS son la base para correr cualquiera de las simulaciones seleccionadas, se prefirió probar los simuladores en un mosaico fotogramétrico sin puntos de control (en donde se reconoció un error de ± 42 cm hasta 2.2 m en la horizontal respecto a sitios específicos comparados en imágenes de satélite *Quickbird*). El hecho de no emplear puntos de control se debió al elevado costo de los *GPS* de alta resolución en el mercado, por tal razón solo se utilizó el receptor *GPS* del VANT.

Los tres programas definidos para simular la caída de rocas utilizaron el mismo pre-proceso, que incluía un vuelo de dron para obtener imágenes de la zona de estudio, el procesamiento de estas imágenes para la formación de una imagen de ortomosaicos de luz visible y el MDS de alta calidad (46 cm). De esta manera fue posible considerar los obstáculos que representa la cobertura arbustiva y boscosa. Se considera que de esta manera se obtienen las simulaciones más aproximadas a la realidad. El ortomosaico es una pieza fundamental para poder ubicar los puntos de desprendimiento favorables vistos en campo así como los de depósito.

A) VANT

Los drones pueden ser llamados UAV por sus siglas en inglés (Untripulated aerial vehicle), RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) o VANTs (Vehículos Aéreos No Tripulados) y existe una gran variedad de modelos y marcas (Fig. 11). Para este estudio se usó un VANT de 4 rotores (*DJI Mavic Pro*) que posee un rango de transmisión de señal de 7 km, un sistema de posicionamiento *GPS/GLONASS* y una cámara capaz de tomar video en 4K y fotografías de

alta calidad gracias a su lente de 26 mm $f/2.2$ y un sensor de $1/2.3''$ con 12.35 Megapíxeles (DJI, 2017).

Gracias a estas características y la habilidad de ser controlado a distancia, un VANT de este tipo es una herramienta esencial para poder realizar vuelos sobre áreas pequeñas y la adquisición de fotografías con una georreferencia de error de 10 m.



Figura 11. Dron o VANT DJI Mavic Pro. (The DJI Store, 2017)

B) Modelo Digital de Superficie (MDS)

Para la creación de un MDS es necesario la toma de fotografías que posean una georreferencia en un patrón de rejilla a una altura constante u homogénea al terreno circundante y con una superposición del 80 a 70% entre cada imagen, tanto en dirección de la línea de vuelo, y con un 60-65% con cada línea de imágenes laterales. También se requiere de una buena iluminación y marcado contraste de sombras, por lo cual el mejor horario para la ejecución del vuelo fotogramétrico del terreno se sugiere sea entre las 9 y 11 am o las 1 pm y 3 pm. Este horario además de permitir una buena calidad de imágenes

debido a la iluminación, también evita las sombras alargadas o de gran tamaño que pudieran ocultar rasgos de la superficie o elementos importantes, así como los errores de *hotspot* y *sunlight* que están relacionados con la posición del sol respecto al VANT (Agisoft, 2020; Saroglou et al., 2018).

Para la correcta planeación de un vuelo es necesario definir los objetivos que se desean capturar, su tamaño, localización, la elevación del terreno, obstáculos físicos (antenas, vehículo, etc.), obstáculos vivos (personas, aves, ganado, etc.), posibles permisos y ráfagas de viento, como de acceso a señal de satélites. Así mismo es importante planear la fecha y obtener los pronósticos del tiempo atmosférico más próximo a la campaña de vuelo para evitar días lluviosos o nublados (con cobertura de nubes preferible menor al 10%) y en caso de tener que caminar al punto de despegue considerar el tiempo de traslado para tener la mejor iluminación posible.

Para planear la ruta de vuelo es posible utilizar aplicaciones como *DroneDeploy*, *Pix4d Capture* y *DJI Ground Station Pro (GS Pro)*; que ayudan a generar patrones de vuelo tomando en cuenta el tamaño del área de estudio, así como el punto de despegue, el ángulo de la cámara, esto permitirá calcular el tiempo de vuelo y el consumo de baterías. Solo la última aplicación permite definir una altura de vuelo constante respecto con el terreno, pero sólo está disponible para VANTs de mayor tamaño (*Matrice 200* y/o *300*).

C) Fotogrametría

Para generar un MDS a partir de las imágenes tomadas con el VANT es necesario la utilización de técnicas fotogramétricas. Se puede simplificar la metodología de procedimiento en tres pasos principales:

- El primer paso es la alineación de las fotografías adquiridas. Aquí se considera la triangulación aérea y el ajuste por paquete de bloques de

las líneas voladas. En este paso se buscan puntos representativos en las imágenes y se correlacionan a través de puntos de enlace con las fotografías sobrepuestas. También se identifica la posición de la cámara para cada imagen y se refinan los parámetros de calibración (se estiman los parámetros de orientación internos y externos de la cámara) (Agisoft, 2020).

El resultado de este procedimiento se muestra como una nube de puntos dispersa (npdis) que es la representación en tres dimensiones de los puntos de enlace y con la localización de las posiciones de las cámaras al momento de la toma. También puede ser exportada y a partir de ella se pueden crear mapas de profundidad (Agisoft, 2020).

- El segundo paso es la generación de una Nube de Puntos Densa (NPD), a partir de las posiciones estimadas de las cámaras y las imágenes mismas. Posteriormente se pueden crear una superficie en 3D (en forma de rejilla o malla) y/o 2.5D (MDE con obstáculos). El modelo poligonal (malla) puede ser combinado con una textura para representar digitalmente un objeto o una superficie. Sí el MDE es creado a partir de la nube de puntos densa este puede incluir el terreno y además objetos como árboles, edificios y otras estructuras creadas por lo que el nombre a este tipo de modelo se le conoce como MDS (Agisoft, 2020).
- El tercer paso es la creación del ortomosaico el cual será georreferido automáticamente y usado como una capa base para mapas o para realizar otro tipo de análisis y procesos más complejos. El ortomosaico es generado a partir de la proyección de las imágenes de acuerdo con sus parámetros de orientación internos y externos de la cámara (Agisoft, 2020).

III.2 Método empírico

Es un modelo empírico de distribución espacial que está desarrollado en el ambiente *Matlab* (tabla 4). La utilización de este modelo requirió dos pasos, los cuales están basados en un MDS. Primero, fue necesario identificar las zonas potenciales de desprendimiento. Este reconocimiento fue hecho por medio de las características morfológicas de las paredes occidentales de los domos en cuestión de acuerdo con la pendiente, así como el reconocimiento de bloques con fracturas o parcialmente libres de la pared y que pudieran ser fácilmente desprendibles.

Tabla 4. Insumos ocupados para el método empírico

Espaciales	Datos	Software
Mapa de pendientes	Altura, pendiente, algoritmo de dirección(k), algoritmo de inercia(k), función de pérdida por fricción(k)	Flow-R
MDS		ArcGis

k = constante

En el segundo paso se determinó la propagación del caído (en este caso el *software* lo determina como flujo de escombros ya que lo trata como un conjunto de bloques a partir de las zonas fuentes seleccionadas. De esta manera, con base en aspectos de fricción y usar algoritmos de dirección de flujo dominado principalmente por una componente de partículas del tamaño de arena; se obtiene una simulación, en donde se evidencian corredores, que ponen de manifiesto canales dentro del MDS (Horton et al., 2013).

El modelo Flow-R o de Determinación de canales para la evaluación de peligros gravitacionales a escala regional (*Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale*, disponible gratuitamente en www.flow-r.org) admite la utilización de múltiples capas (Fig. 12) las cuales al sobreponerse permiten obtener celdas que cumplen con las características necesarias para generar y movilizar flujos. La naturaleza del cálculo también ha sido evaluada para la caída de bloques (rockfall), siendo aparentemente, bastante preciso en la obtención de las zonas fuentes de caídos (Michoud et al., 2012; Lari et al., 2011).

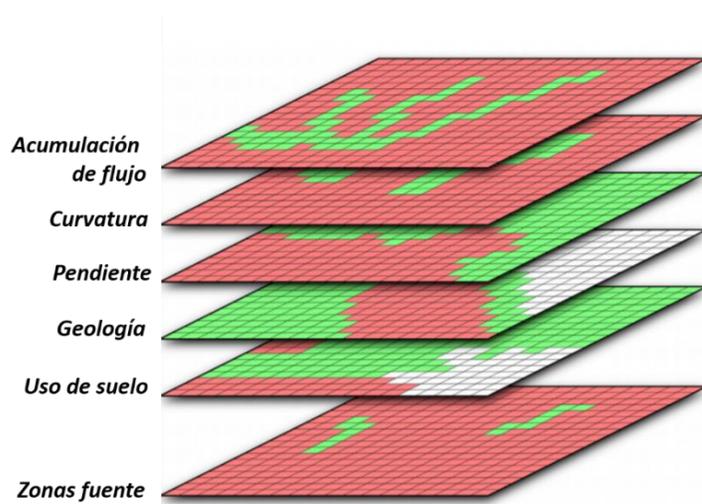


Figura 12. Ilustración de la combinación de información para la evaluación de zonas susceptibles a ser consideradas zonas fuente. Los píxeles excluidos se muestran en color rojo, los favorables en verde y los ignorados en blanco (Tomado de Horton et al., 2013).

De inicio se requiere introducir las capas base como la pendiente y las zonas fuente, que se generan dentro del SIG, se convierten y localizan dentro de una carpeta específica, en formato *ASCII* con la cual el programa pueda leerlas. Un problema de lectura de los datos en este primer paso se debe a que el número de bandas y columnas del MDE debía encontrarse en múltiplos de 10, por ejemplo: 312,197 valores incorrectos, 190,200 valores correctos.

Lo anterior debido a que es la única manera en que el programa identifica las dimensiones del área de trabajo y realiza el proceso. Esto es relevante, ya que todas las capas que se van a sobreponer para determinar las zonas susceptibles de potencial caído deben tener las mismas dimensiones de rejilla o tabular.

Para corregir este problema se tuvo que configurar el tamaño de celda y los límites del proyecto, en las configuraciones del ambiente de trabajo en donde se cambió la extensión de procesamiento a valores que fueran divisibles entre 10, así como el tamaño de celda a 10 x 10 (Fig. 13) dentro de cualquier SIG.

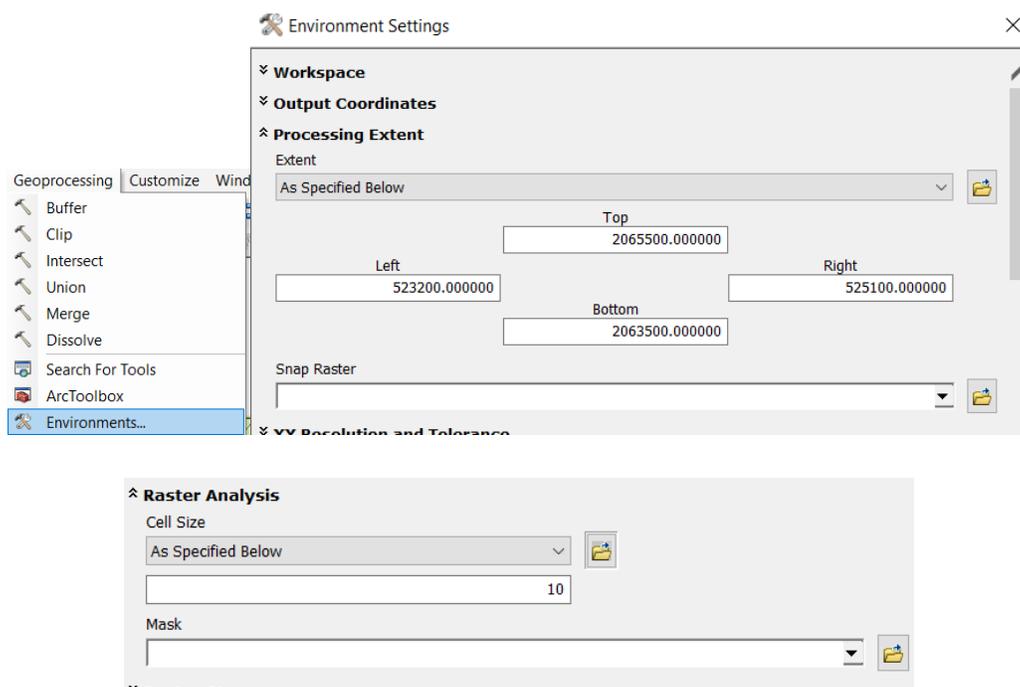


Figura 13. Localización de las herramientas utilizadas dentro del SIG ArcMap, para redimensionar el MDS, así como el tamaño de la celda.

Un detalle importante es que, a mayor cantidad de capas a introducir en el programa los resultados obtenidos típicamente se consideran de mayor calidad. Una vez creadas las capas del MDS y de pendientes se introdujeron en la carpeta de lectura específica. Aunque el programa nos permite añadir

otras capas el lugar seleccionado como estudio de caso (Chalcantzingo, Morelos) presenta una sola litología, por lo que se consideró como una variable constante o invariante. Respecto a la resolución de la información de uso de suelo, mapas de curvatura y acumulación (*flow accumulation*) no presentaban valores relevantes debido a la resolución de los mapas base (1:50,000) por lo que se decidió no utilizarlos.

De esta manera con las dos capas introducidas los parámetros a modificar fueron los valores de altura y pendiente a considerar (Fig. 14). Se decidió que los valores óptimos para que un bloque se desprendiera fueran una pendiente mayor a 30° y una altura mayor a 1400 metros (msnm) ya que todos los bloques que se identificaron en campo y que eran susceptibles a desprenderse tenían estas características.

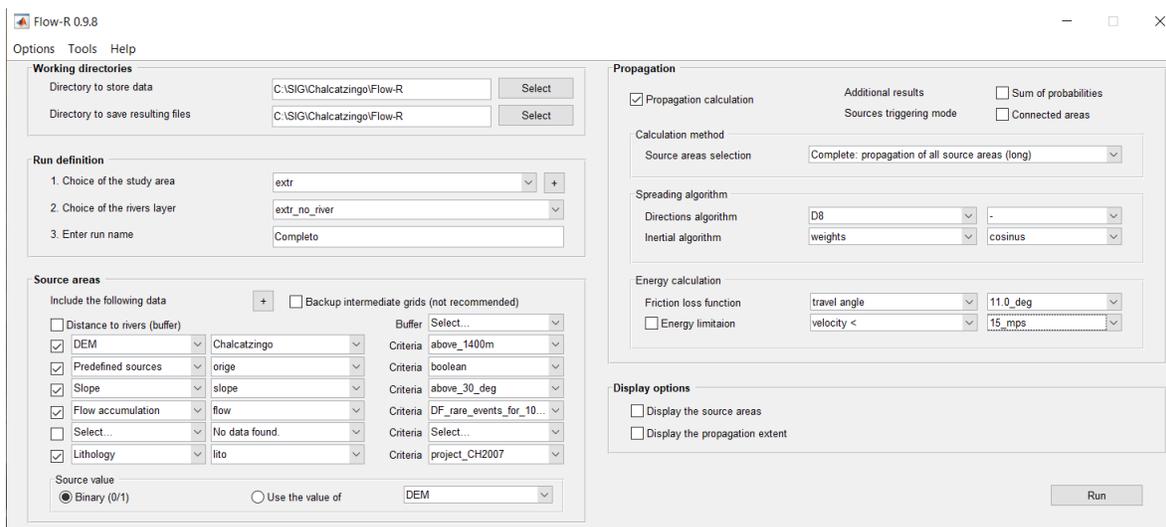


Figura 14. Panel de las características a determinar para realizar la simulación en Flow-R (0.9.8), nótese que permite la introducción de al menos 6 capas de información.

Una vez establecidos los parámetros en el programa, se modificaron las características de la propagación de los bloques. Para lo cual utilizamos las

características establecidas por los desarrolladores, para un ejemplo de caída de bloques.

- Algoritmo de direcciones = D8
- Algoritmo de inercia = *weights* (que controla el balance de velocidad inercial) y *cosinus*
- Función para pérdida por fricción
 - *Travel angle* 11.0_deg.
 - *Velocity* < 15_mps.

Los resultados obtenidos se presentan en formato ráster, por lo que fueron introducidos posteriormente en un SIG para su visualización, evaluación y comparación.

III.3 Método basado en procesos

Rocfall versión 4.0 es un programa de análisis estadístico, diseñado para asistir en la evaluación de laderas susceptibles a presentar caída de bloques (tabla 5). Es un programa de análisis determinístico en 2D basado en las leyes de movimiento, así como en las teorías de colisión lo cual permite calcular la ruta de un hipotético bloque, su energía cinética, velocidad y puntos de depósito, así como la altura de los rebotes en cada punto del perfil (RocScience, 2004). El programa permite crear de forma expedita el alcance de un cuerpo rígido que cae de forma libre desde un punto en la ladera. También permite simular el fenómeno con distintas medidas de mitigación.

Tabla 5. insumos ocupados para el método basado en procesos

Espaciales	Datos	Software
Curvas de nivel	Perfil, elevación, masa, datos del material de la superficie(ver tabla 6)	Rocfall
MDS		ArcGis

Prácticamente todas las variables de entrada pueden seleccionarse de forma arbitraria, tanto el punto de caída, propiedades de la roca y las condiciones iniciales pueden ser definidas probabilísticamente (Li y Lan, 2015). Es un programa que, de acuerdo con las condiciones establecidas, presenta simulaciones que pueden ser reproducibles por cualquier usuario. Los valores utilizados para esta simulación se determinaron en función del modelo 3D texturizado (en donde se observa la pared y los bloques susceptibles a desprenderse).

Para su uso primero se define el tipo de material a movilizar. Esto con el objetivo de determinar el tipo de análisis, ya sea de una masa agregada compacta o de un cuerpo rígido. Posteriormente se selecciona el material del cual está constituido la superficie a simular, es posible seleccionar uno de los ya establecidos como asfalto, talud con vegetación, talud cubierto, etc. (Fig. 15). Los datos se pueden seleccionar a partir de una tabla que posee una gran variedad de superficies, así como ejemplos de ubicaciones que poseen ciertas características; por ejemplo, suelo cubierto de vegetación y roca con algo de vegetación (Tabla 6).

Tabla 6. Tabla con los dos tipos de superficie utilizados en este trabajo: roca con algo de vegetación y suelo con vegetación (modificado de la tabla Rocscience Coefficient of Restitution, incluida con el programa RocFall versión 4.0)

<i>RN (Normal)</i>		<i>RT (Tangential)</i>		<i>Tipo</i>	<i>Verificación</i>	<i>Ubicación</i>
<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>			
0.300	0.330	0.800	0.830	Roca con algo de vegetación	Probado usando simulación de caída	Glenwood Canyon,

0.280	0.320	0.780	0.820	Suelo con vegetación	de rocas con tamaños y formas similares a eventos pasados	Colorado, USA
RN= Valores aproximados de coeficiente de restitución normal para distintas morfologías; RT= Valores aproximados del coeficiente de restitución tangencial para distintas morfologías.						

Para introducir el terreno, es necesario conocer las coordenadas X, Y, del punto inicial de desprendimiento y hasta más allá del objetivo (en línea recta). Posteriormente la introducción de puntos es manual uno por uno hasta conseguir la reconstrucción de la ladera en cuestión.

El paso siguiente es determinar el punto desde el cual el bloque será “soltado” se puede definir una velocidad inicial y la masa del bloque. Finalmente se establece la masa a soltar (mismo bloque y ubicación), siendo 10 kg el valor predefinido, siendo 50 kg el que mejor define trayectorias según nuestras pruebas (Fig. 16).

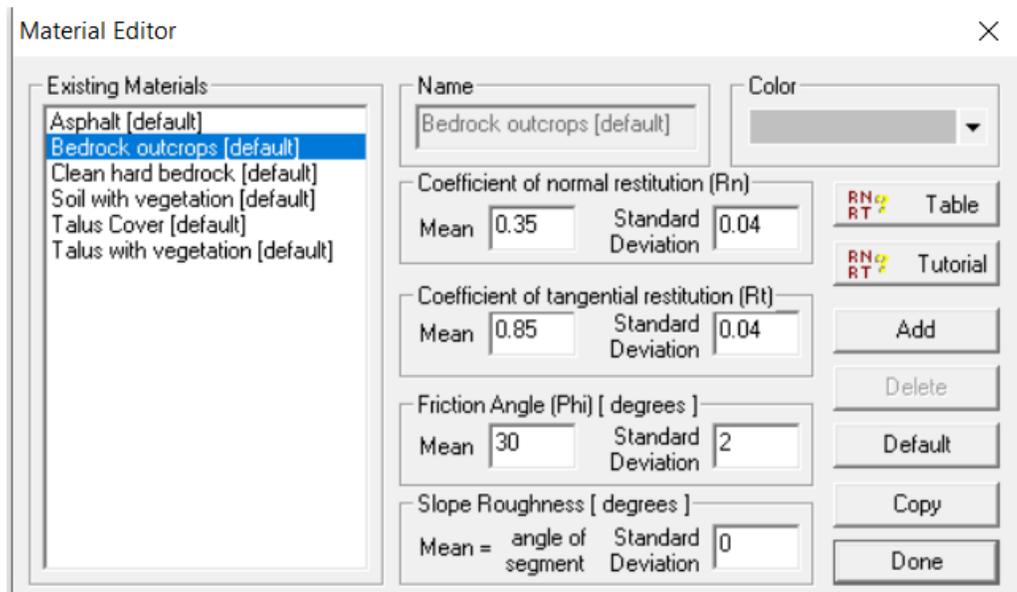


Figura 15. Interfaz del programa RocFall 4.0 en la cual se muestran las opciones de diferentes tipos de superficie, así como la opción de agregar otros a partir de la tabla accesible en el menú principal.

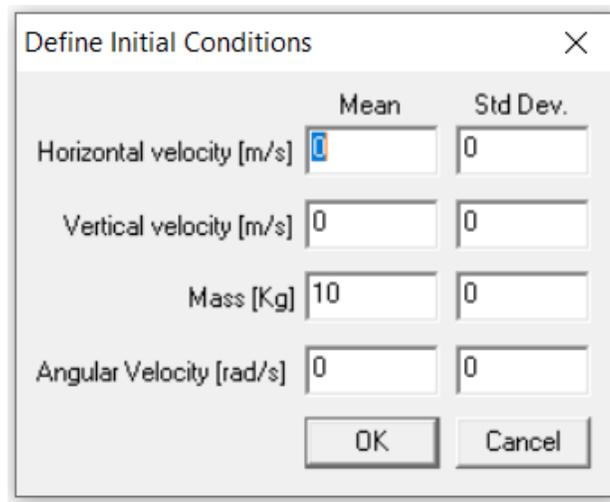


Figura 16. Ventana para introducir la masa y velocidad inicial del bloque en el punto deseado.

Los resultados muestran en una vista de perfil las trayectorias y los rebotes en dos dimensiones.

III.4 Método basado en un SIG

El software RAMMS (*RApid Mass Movements System*) fue desarrollado por el Centro de Mecánica de la *ETH Zurich* y el Instituto de Investigaciones de Nieve y Avalanchas de Suiza (Bartelt et al., 2015). El programa contiene un módulo que simula la caída de rocas; utiliza variables que describen la mecánica de movimiento de un bloque rígido en contacto directo con un sustrato duro (*hard-contact*) (Cavaziel et al., 2019). Está conformado por tres módulos, uno enfocado en avalanchas, otro a flujos de escombros y el último a caída de bloques.

Tabla 7. Insumos ocupados para el método basado en un SIG

Espaciales	Datos	Software
Mapa de pendientes	Densidad, masa*, volumen*, medidas de los bloques, forma, punto, polígono o línea de origen	RAMMS::ROCKFALL
MDS		ArcGis
Mapa con las durezas de la superficie		
Ubicación de los bloques		

*= generado por el software a partir de la densidad y las medidas

El módulo para caída de bloques, llamado RAMMS::ROCKFALL evalúa los movimientos de caída de bloques de rocas, simula el desplazamiento de bloques de acuerdo con su forma y predice las trayectorias en terrenos tridimensionales (Bartelt et al., 2015; Leine et al., 2014). Estas trayectorias son obtenidas a través de la interacción que ocurre entre las rocas y el sustrato por lo que considera los rebotes para determinar su alcance máximo (Arpin y Arndt, 2016).

El modelo funciona con 6 variables principales, 3 que consideran la velocidad transicional y 3 la velocidad rotacional del bloque. A partir de estas, se obtiene energía cinética, máxima distancia y altura de los rebotes simulados. Es posible realizar el modelo con diferentes formas de roca. Estas geometrías se pueden predecir a partir del desarrollo de discontinuidades en la vertiente por lo que el sistema de fracturas gobierna el tipo de bloque que colapsará, estas geometrías ya vienen cargadas dentro del programa (Fig. 17).

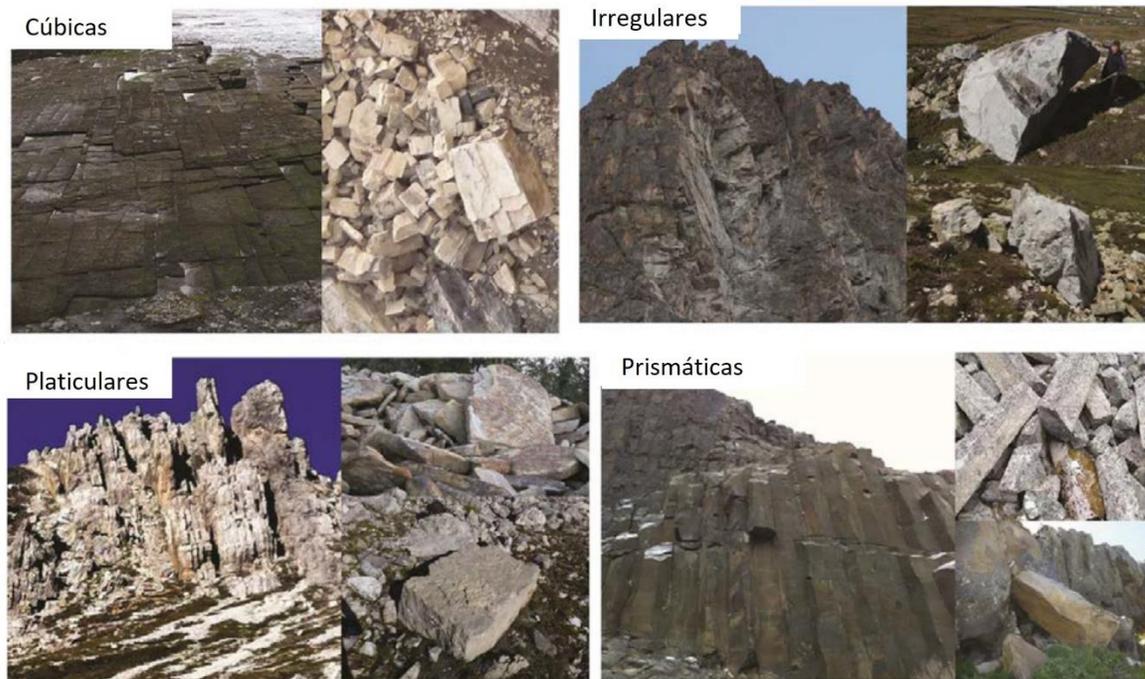


Figura 17. Ejemplo del tipo de geometrías que se pueden introducir en RAMMS::ROCKFALL, desde cúbicas, platiculares, prismáticas e irregulares (tomado de Bartelt et al., 2015).

Este programa tiene una interfaz sencilla además de que posee un manual con información concreta y que enumera los pasos a seguir para obtener la simulación. En el manual también se muestra que además de simular las trayectorias también se generan de manera automática capas ráster con los valores de la velocidad de éstas, la altura de los rebotes y la energía cinética.

Para su uso, la primera acción fue seleccionar el MDS creado a partir de las fotografías del VANT, de la zona de estudio, la configuración de preferencias de carpetas y los parámetros generales del programa. El asistente de proyectos requiere la selección del nombre y ubicación de archivos seguido de la selección del MDS y la extensión a estudiar.

Las fuentes del desprendimiento de los bloques son introducidas como un punto o una serie de puntos, como una línea o como un polígono. Los puntos

individuales fueron introducidos a partir de sus coordenadas; las líneas y polígonos en cambio se colocan de forma gráfica sobre el MDS, con base en indicadores como la elevación, la pendiente y/o líneas de fracturas vistas en campo.

El programa incluye un creador de geometría de rocas, en el cual se puede seleccionar la forma más similar a la que se tenga en la zona. La forma se toma de una librería de formas equidistantes, planas y alargadas (Fig. 18). Las características de dimensión, densidad, masa y volumen se definen de acuerdo con el tipo de roca específico para el estudio. Para realizar una simulación es necesario seleccionar un nombre, el tipo de superficie, cobertura de bosque, tipo de roca y, ya sean puntos, líneas o polígonos de desprendimiento

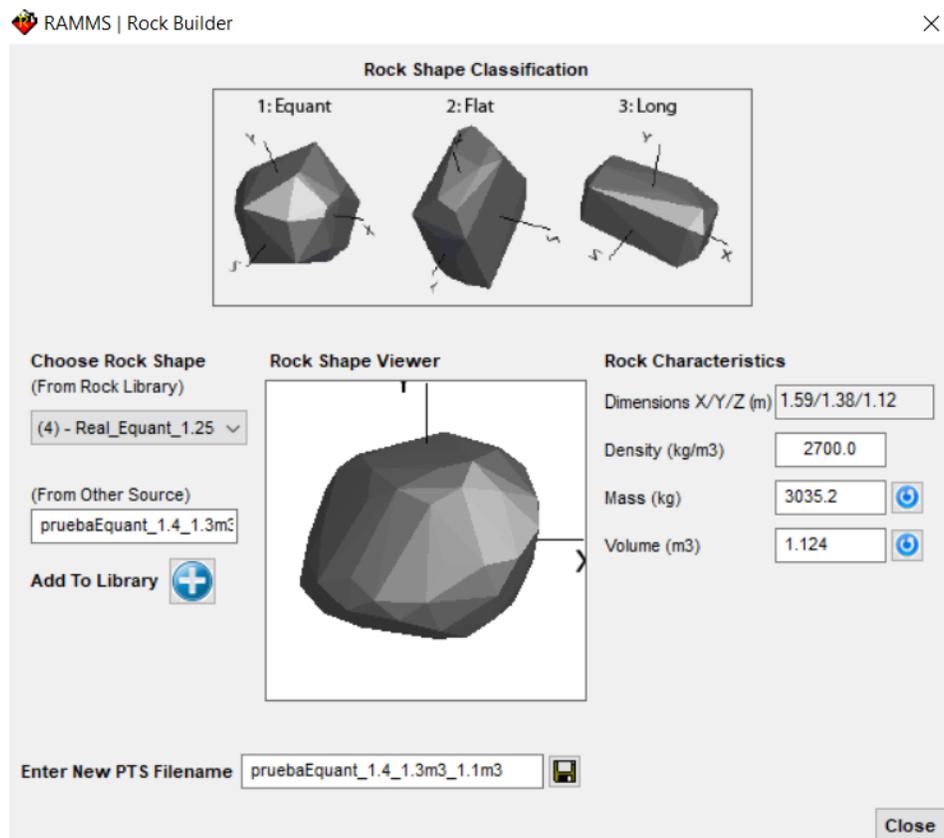


Figura 18. Interfaz de creación de geometría de rocas en RAMMS:: ROCKFALL, los modelos definen las formas: equidistantes, planas y alargadas.

El tipo de superficie tiene un papel importante en el resultado de la simulación, para definirla es posible establecer una dureza general para toda la simulación o, es posible generar polígonos y asignar a cada uno, una de ocho durezas predefinidas: Extra suave, Suave, Medio suave, Medio, Medio duro, Duro, Extraduro y Nieve. Estas durezas y sus características vienen explicadas en el manual de usuario de RAMMS::ROCKFALL v1.6 (Bartelt et al., 2015).

En particular, para la zona de estudio se definieron tres diferentes superficies:

- Extradura: la ladera de roca sólida (Fig. 19).
- Dura: la zona de transición que presenta una mezcla de rocas grandes y pequeñas.
- Medio dura: suelo con una cubierta de vegetación principalmente de pasto, poca pendiente, hay algunos bloques depositados.



Figura 19. Imágenes tomadas en Chalcatzingo donde se aprecia una superficie definida como Extra dura (arriba) y una Medio Dura (abajo).

Para la cobertura de bosque se pueden generar polígonos sobre el MDS a los cuales se les asignó el valor de una de tres categorías establecidas por el programa, bosque abierto, bosque medio y bosque denso. Sin embargo, en la zona de estudio, la cantidad de árboles era menor o se trataba de árboles aislados, por lo que se decidió no elegir opción alguna y dejar este rubro vacío, esto también debido a que si se trataba de árboles aislados es posible eliminarlos desde la nube de puntos densa durante la generación del MDS.

Para la roca además de sus medidas fue necesario obtener los datos de densidad, masa y volumen. Para ello se debe calcular la densidad de una muestra de la roca. Esto se puede hacer calculando su masa y el volumen desplazado dentro de un líquido (Anexo a). Una vez obtenida la densidad y con ayuda de las medidas, el programa calcula de manera automática los valores de masa y volumen.

Finalmente se procesó la información y confirma en pantalla los datos a utilizar para comenzar el análisis. En la carpeta de resultados se generan capas tipo vectorial de las trayectorias las cuales se pueden abrir en un SIG para su mejor visualización y creación de mapas. También se guarda en la carpeta capas de velocidad, altura de saltos y energía cinética, un archivo de registro con los datos importantes y se pueden exportar graficas con la información de velocidad y energía cinética (Fig. 20).

```

*****
RAMMS::ROCKFALL - Simulation Scenario Logfile
Version 1.6.70
Scenario Name: 8
Scenario Folder: C:\SIG\RAMMS\ChalFinal1\output\8\
Simulation Started: Mon Sep 14 00:42:23 2020
Simulation Finished: Mon Sep 14 00:42:57 2020
Simulation Time (min): 0.6
Simulation Settings:
Nr_Source_Points: 1
Nr_Simulated_Rocks: 1
Nr_Random_Orientations: 10
Nr_Z-Offset_Iterations: 1
(Nr_Simulations_Per_Source_Point: 10)
Total_Nr_Simulations: 10
Simulation Results:
(Min/Mean/Max Values)
Jumpheights (m): 0.81 / 6.42 / 30.57
Velocities (m/s): 0.05 / 16.03 / 38.56
Kin. Energies (kJ): 0.04 / 3906.82 / 15933.63
Rot. Velocities (rot s-1): 0.00 / 1.43 / 2.80
Average Slope (Degrees): 40.53 / 52.28 / 65.56
*****
Input Settings:
General:
Time Step (s): 0.010
Dump Step (s): 0.020
DEM File: ChalFinal1\ChalFinal1.xyz
DEM Resolution (m): 0.46
Calculation Domain: .\
Friction:
Overall Type: Medium Hard
Additional Friction Areas:
ExtraHard.shp: Extra Hard
Hard.shp: Hard
MedHard.shp: Medium Hard
Release:
Type: Point
Coordinates (m): 524249.00 / 2064876.00 / 1496.00
Automatic Z-Offset(s): 2.64 - 2.64 m
Rock:20162.2kg
Rock Density (kg/m3): 2000.00
*****

```

Figura 20. Archivo de registro generado automáticamente por el programa RAMMS::ROCKFALL, se puede consultar información importante respecto al número de bloques simulados, los valores mínimo, promedio y máximo de la altura de los saltos, velocidad, energía cinética, velocidad rotacional y la pendiente. También se incluye la resolución del MDE utilizado, la dureza de la superficie, las coordenadas y densidad y masa de la roca.

IV Estudio de caso

IV.1 Área de estudio

La zona arqueológica de Chalcatzingo se ubica al oriente del Estado de Morelos en las cercanías del poblado del mismo nombre. Se considera como la zona más representativa del arte monumental e iconográfico de la cultura Olmeca en el centro del país (Córdova et al., 2015). El asentamiento actual, se fundó aproximadamente en el siglo XV a.C. el registro arqueológico ha sido catalogado como perteneciente a los periodos Preclásico medio y tardío (siglos VII y V a.C.), fechas en donde se considera que floreció el arte monumental en piedra, convirtiéndolo en un centro político-religioso de mayor importancia a nivel regional (Córdova et al., 2015). Actualmente en la zona se hallan bajorrelieves que consisten de imágenes talladas en roca donde la figura resalta del fondo; dichos tallados se encuentran sobre las paredes de los cerros de Chalcatzingo y/o en fragmentos de roca que se cree proceden de los cuerpos rocosos cercanos (Córdova et al., 2015; Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010).



Figura 21. Pirámide de la zona arqueológica de Chalcatzingo, al fondo el Cerro Delgado.

Estos tallados son de gran importancia debido a que son únicos en su clase, ya que reportan ser una mezcla de las tradiciones y técnicas de los asentamientos Olmecas del Centro de México junto con los de la Costa del Golfo y resaltan por sus técnicas artísticas e iconográficas siendo muy diferentes a los encontrados en los asentamientos de La Venta y de San Lorenzo, mismos que se consideran los mayores exponentes de la Cultura Olmeca (Córdova et al., 2015).



Figura 22. Bajorrelieves de la zona arqueológica de Chalcatzingo, El gobernador sacerdote (izq.) y La fertilidad (der.).

En la actualidad en la zona arqueológica de Chalcatzingo se encuentran 44 monumentos formados por bajorrelieves, estelas, altares y una pirámide; los cuales son una pieza fundamental y de gran importancia en la historia prehispánica de nuestro país (Fig. 22 y Fig. 23). Por estas razones, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), se encuentra realizando trabajos para su preservación, cuidado y mantenimiento. La zona arqueológica está expuesta a un clima cálido subhúmedo, con temperaturas promedio de más de 22 °C y precipitación promedio que va de los 800 y 1000 mm anuales (Córdova et al., 2015; Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010).

Chalcatzingo

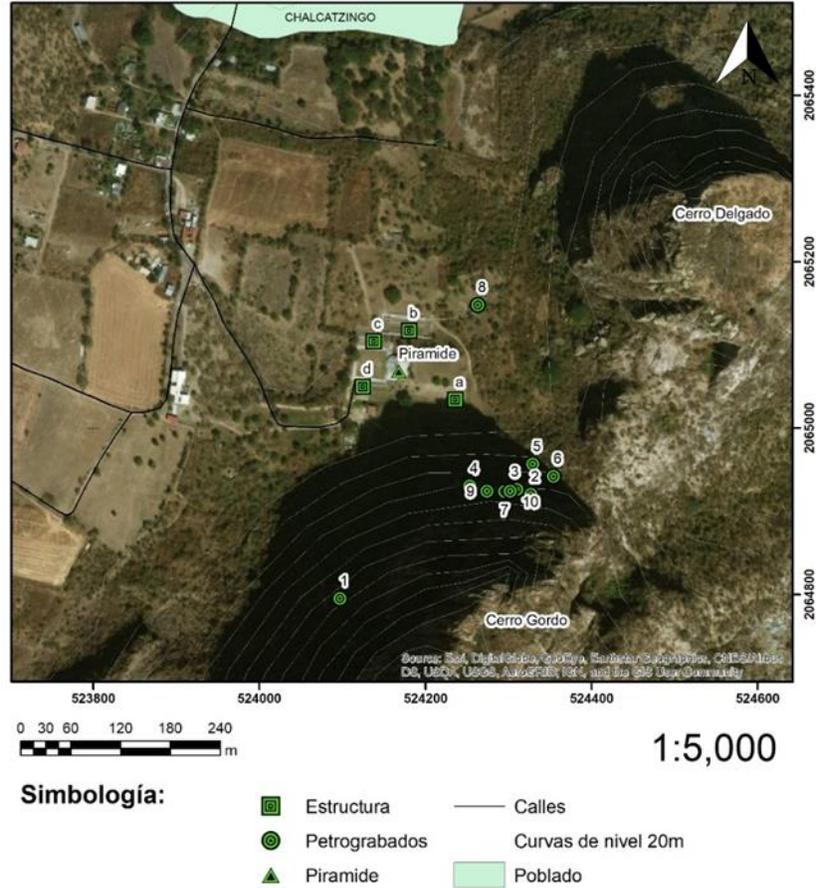


Figura 23. Mapa de la zona en donde se incluye la zona arqueológica, así como los Bajorrelieves más próximos a la ladera de los domos al sur, así como otras estructuras arqueológicas y la pirámide.

A lo largo de los últimos años la zona arqueológica ha estado sujeta a un continuo deterioro debido a condiciones ambientales y antropogénicas, como erosión y corrosión en caminos y áreas expuestas, daños por instrumentos de metal o gises, así como el deterioro por el uso de resinas al fabricar moldes y saqueo entre otros (Córdova et al., 2015). Hasta el momento no se han considerado los factores geológicos como posibles agentes de daño del registro arqueológico o como posibles procesos que pudieran afectar los monolitos y la pirámide.

Conocer el contexto geológico regional le permite al INAH no sólo conocer el material con el cual están constituidos los fragmentos de roca donde se encuentran estos bajorrelieves, sino también saber las razones del deterioro y cómo contrarrestarlo (Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010).

A) Geología regional

La zona arqueológica de Chalcatzingo así como los domos Cerro Delgado y Cerro Ancho o Gordo; se ubican en la parte central del Valle de Morelos, dentro del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). El CVM es un arco magmático producto de la convergencia presente desde el Cretácico tardío, e involucra a las placas oceánicas de Cocos y Rivera que están en constante crecimiento y subducen bajo la placa Norteamérica. Se ha postulado que al llegar a una cierta profundidad entre 57 km y 150 km las placas subducidas liberan volátiles que reducen las condiciones de fundido de las rocas más próximas lo que permite la fusión parcial y su posterior ascenso a niveles más someros, donde eventualmente algunos lotes llegarán a ser extruidos (Ferrari et al., 2012; Gómez-Tuena et al., 2008; Ortega-Gutiérrez et al., 2008; Mori, 2007).

El mapa geológico muestra la proximidad de los domos riolíticos en el área de Chalcatzingo, de acuerdo con Ortega-Gutierrez y colaboradores (2012) se emplazan sobre la Formación Morelos (constituida por rocas carbonatadas y evaporitas del Cenozoico) y la Formación Balsas (consiste de forma general, por rocas sedimentarias continentales y depósitos volcánicos y volcanoclásticos del Paleoceno, Eoceno y Oligoceno). En el mapa están representadas estas unidades como las Calizas y rocas andesíticas,

respectivamente. Las rocas mencionadas se encuentran parcialmente sepultadas por una gruesa secuencia lahárica (Vázquez Duarte et al., 2015), también correlacionada con la Formación Tlayacac (Plio-Cuaternaria, de acuerdo con Ortega-Gutiérrez et al., 2012 y Siebe et al., 2017).

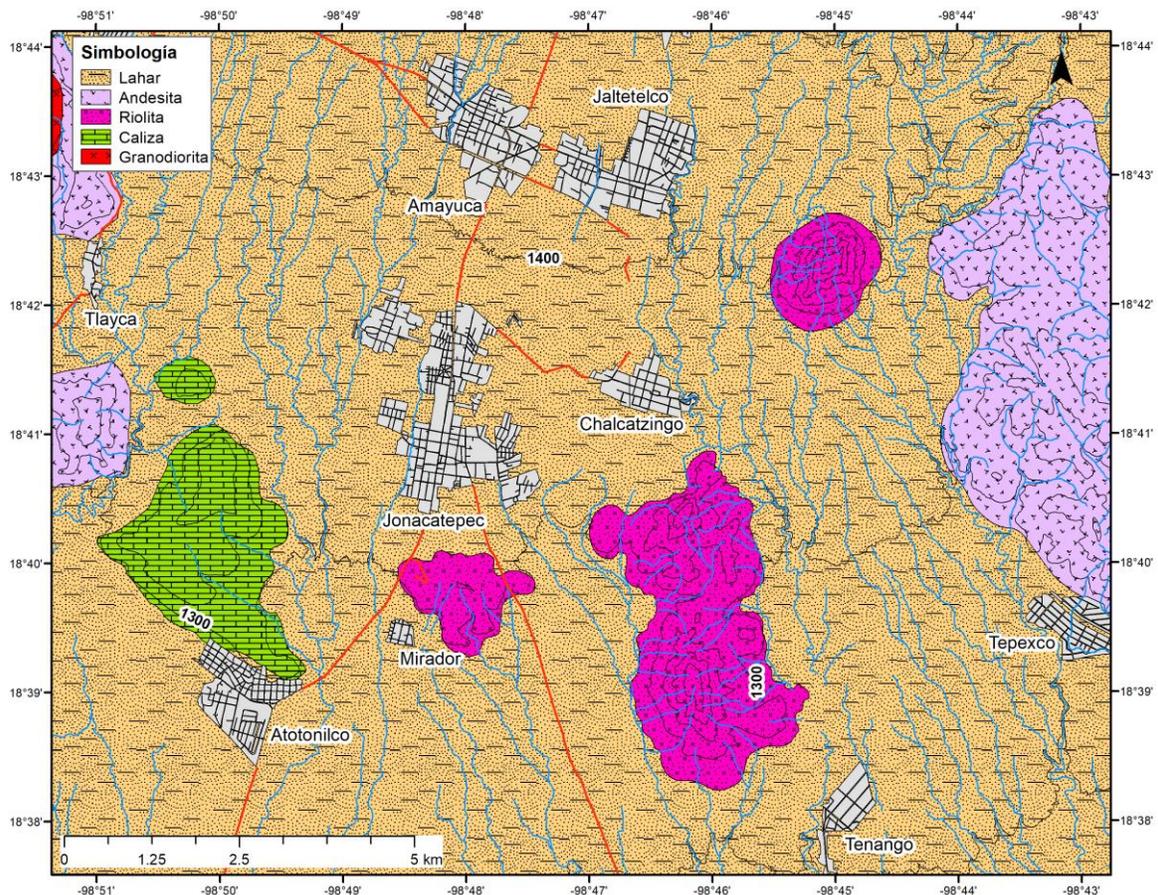


Figura 24. Mapa geológico del área de Chacatzingo, Morelos (Modificado de Rivera et al 1998; Ortega-Gutierrez et al., 2012 y Vázquez Duarte et al., 2015).

El CVM está formado por más de 8,000 estructuras volcánicas, entre las cuales se encuentran grandes poligenéticas, campos de conos monogenéticos (Fig. 25) y algunos cuerpos intrusivos (Mori, 2007). Todos ellos distribuidos a lo largo del centro sur del país en una franja con orientación dominante Este-Oeste que va desde el Nayarit en el Océano

Pacífico hasta la frontera sur de Veracruz, en el Golfo de México. Estas estructuras se encuentran distribuidas a lo largo de 1,000 km de extensión, con una amplitud que varía entre los 80 y 230 km, todo ello delimitados entre los paralelos 19°N y 21°N (Siebe et al., 2017; Mori, 2007).

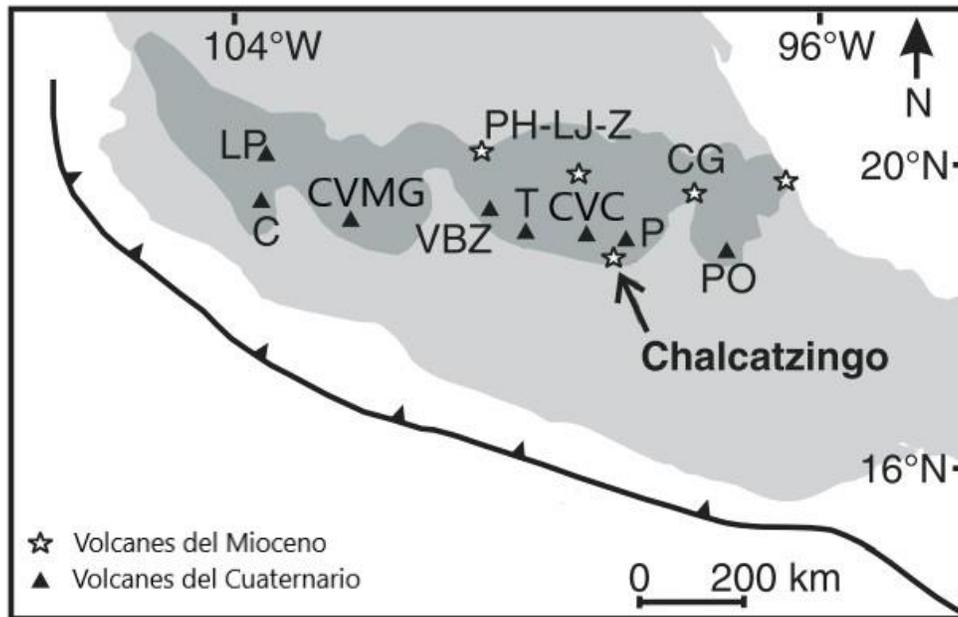


Figura 25. Mapa del Cinturón Volcánico Mexicano, la zona de subducción y el área de estudio en Chalcatzingo. Además, se muestran algunos complejos volcánicos representativos: LP—La Primavera; C—Colima; CVMG— Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato; VBZ—Valle de Bravo-Zitácuaro; PH-LJ- Z—Palo Huérfano—La Joya—Zamorano; T—Toluca; CVC— Campo Volcánico Chichinautzin; P—Popocatepetl; CG—Cerro Grande; PO—Pico de Orizaba. (modificado de Gómez-Tuena et al., 2008)

El CVM representa el más reciente episodio de una longeva actividad magmática que inicio durante el Jurásico con la subducción de la placa Farallón en el Pacífico norte mexicano (Ferrari et al., 2012; Gómez-Tuena et al., 2008). De acuerdo con múltiples autores durante el Cretácico tardío y hasta el Paleógeno se emitieron e intrusionaron extensos cuerpos plutónicos y volcánicos que formaron el Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental (SMO) y que posteriormente se propagaron hasta el sur del actual Bloque Jalisco (Ferrari et al., 2012 y referencias). Después se implementó un

segundo arco magmático durante el Eoceno que fue casi totalmente cubierto por depósitos piroclásticos en el Eoceno tardío y Oligoceno temprano (Ferrari et al., 2012). Se ha postulado que el arco magmático migró al Este durante el Cretácico y Eoceno adquiriendo una rotación antihoraria durante el Oligoceno hasta adquirir la orientación W-E actual del CVM (Gómez-Vasconcelos et al., 2015; Ferrari et al., 2012).

B) Geología local

Los domos aislados de Chalcatzingo han sido clasificados como productos dómicos de composición riolítica (Rincón-Herrera et al., 2007; Ortega-Gutiérrez et al., 2008; Vázquez-Duarte et al., 2009), cuellos o productos subvolcánicos (Ortega-Gutiérrez et al., 2012) o como domos viscosos trondjemíticos o de residuo trondjemítico (Gómez-Tuena et al., 2008; Ramírez, 2018). En el presente trabajo y de acuerdo con la descripción macroscópica de la roca nos referiremos a ellos como domos viscosos de composición riolítica. Su naturaleza ácida y el mecanismo de emplazamiento que los creó permitió la formación de escarpes casi verticales de más de 100 m de altura (Fig. 26).

Se ha propuesto que los domos intrusionaron un basamento calcáreo plegados del Cretácico mismo que aflora a menos de 40 km al Oeste junto con rocas metamórficas del Paleozoico pertenecientes al complejo Acatlán (Siebe et al., 2017; Ortega-Gutiérrez et al., 2008). Es probable que esta capa de rocas metamórficas sea el basamento y que durante el ascenso del magma éste lo haya atravesado (Ortega-Gutiérrez et al., 2012). Aunque la gran variedad de xenolitos de la corteza que se encuentran dentro de los domos

no concuerda con las rocas aflorantes del complejo Acatlán, que se encuentran en la cercanía. Y apuntan más a un basamento de carácter más félsico (Ramírez, 2018).



Figura 26. Fotografía de la pared más vertical y con mayor diferencia altitudinal localizado en el sector oriental del Cerro Gordo.

Los domos presentan una alineación NE-SE lo que ha permitido interpretar la ocurrencia de un régimen tectónico que generó este lineamiento y que se ve reforzado, hasta cierto punto, por un sistema de fracturación evidente en las paredes de los domos (Fig. 26).

Esta extrusión magmática representa uno de los pocos vestigios de la ancestral formación del CVM, emplazado durante el Mioceno Temprano junto con la Sierra de las Mil Cumbres en Michoacán (Gómez-Vasconcelos et al., 2015; Mori, 2007). De acuerdo con Rincón-Herrera et al. (2007) y Gómez-

Tuena et al. (2008) los domos de Chalcatzingo tiene una edad de 20.7 ± 0.3 Ma (datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa y anfíboles, específicamente en el domo Gordo Norte); mientras que de acuerdo con Gómez-Vasconcelos y colaboradores (2015) los productos del complejo volcánico Garnica en Michoacán tienen una edad de 18.3-17.9 Ma siendo los productos volcánicos más antiguos relativos a la subducción de la, en ese momento, incipiente Trinchera Mesoamericana.

La roca que constituye a los domos Cerro Delgado y Gordo (Fig. 27) muestra bandeamiento posiblemente debido a una emisión de tipo de flujo junto con enfriamiento columnar. Estos rasgos pueden señalar que en realidad son una serie de cuellos volcánicos o relictos de una estructura de mayor envergadura. Esto ha sido señalado por algunos autores que postulan un origen más de tipo intrusivo o hipoabisal (Gómez-Tuena et al., 2008; Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010). Aunque debido a su temporalidad, también es posible que en la actualidad solo tengamos acceso al núcleo de los domos y su potencial “*carapace*” ya haya sido disgregado o erosionado.

Un rasgo distintivo de estos domos es la gran variedad de xenolitos (granulitas metapelíticas de alto contenido en Al, ortogneisses y granulitas máficas, gneisses cuarzo-feldespáticos de biotita y granate, gneisses de cuarzo, gabros de hornblenda y clinopiroxenitas) que contiene (Gómez-Tuena et al., 2008; Ortega-Gutiérrez et al., 2008; Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010; Ramírez 2018). Se ha descartado que gran parte de estos xenolitos sean producto de metamorfismo de contacto asociado con la naturaleza “trondhjemitas” de la intrusión, ya que muchos presentan una fuerte foliación y usualmente son blastomiloníticos (Gómez-Tuena et al., 2008).



Figura 27. Fotografías de rocas que muestran su apariencia granular y contenido de fenocristales; el bloque (izq.) se encuentra dentro de la zona Arqueológica, se observa la fractura curva y una textura holocristalina; la roca muestra (der., bloque colectado en la cima del Cerro Gordo) una textura porfirítica de grano grueso de color gris y beige, con abundantes fenocristales.

Su aspecto macroscópico de la muestra recogida en campo muestra una estructura homogénea formada por fenocristales dentro de una matriz vítrea y/o granulada de color beige. Los fenocristales identificados fueron cuarzo, plagioclasas (de 2 cm de tamaño y con forma euhedral) y feldespatos potásicos (de 2 cm de tamaño), mientras que los oscuros presentan características comunes de los minerales ferromagnesianos, siendo clasificados como piroxenos (de hasta 0.5 cm de tamaño) y anfíboles (hornblendas y trazas de biotita). La roca presenta textura típicamente porfirítica, pero existen zonas o muestras donde se observa más afanítica o microcristalina, también encontramos zonas en donde se presenta procesos de biasilitización y/o cloritización, reportados anteriormente por Illescas Salinas y Buitrago Sandoval (2010).

En las descripciones de láminas delgadas reportadas anteriormente, describen una textura holocristalina (solo cristales sin vidrio) como porfídicas (cristales de diferente tamaño), con fenocristales grandes de plagioclasa y anfíboles englobados dentro una matriz rica en microfenocristales plagioclasa, cuarzo y óxidos de Fe-Ti (Gómez-Tuena et al., 2008). También reportan que los cristales tienen una característica forma hipidiomórfica (Illescas Salinas & Buitrago Sandoval, 2010).

C) Geomorfología

Aunque en sentido estricto pueden ser considerados como un complejo efusivo con al menos 6 o 7 elevaciones y/o posibles domos no se tienen registros petrográficos y geoquímicos de todos (Fig. 24). Los domos afloran dentro de una compleja llanura aluvial compuesta por depósitos laháricos y de avalancha de escombros provenientes del volcán Popocatepetl (Siebe et al., 2017).

De acuerdo con las cartas topográficas de INEGI (2016) escala 1:20,000 (con claves: E14B61b y c), la llanura volcanoclástica está siendo disecada por dos principales ríos, el Tequexquia o Amatzinac al oriente de las localidades Huazolco y Jaltetelco y el río Barranca Honda que surca el occidente de las localidades Amayuca y Jonacatepec (Fig. 28). En las inmediaciones de estas localidades afloran los cerros Gordo Norte, Delgado, Ancho o Gordo (referido por los habitantes), Del Coyote, Tenango, El Mirador y Santa Cruz, enumerados de norte a suroeste (Fig. 28).

El domo Gordo Norte se levanta de una altura de 1380 msnm y alcanza cerca de 1840 msnm, dando una diferencia de 450 m de altura. Le sigue el domo Tenango que surge desde los 1200 msnm y alcanzan una altura máxima de 1630 msnm, dando una altura de 430 m. Le siguen los domos Gordo con 280 m, el domo Delgado con 145 m y el domo Santa Cruz con 125 m de altura relativa.

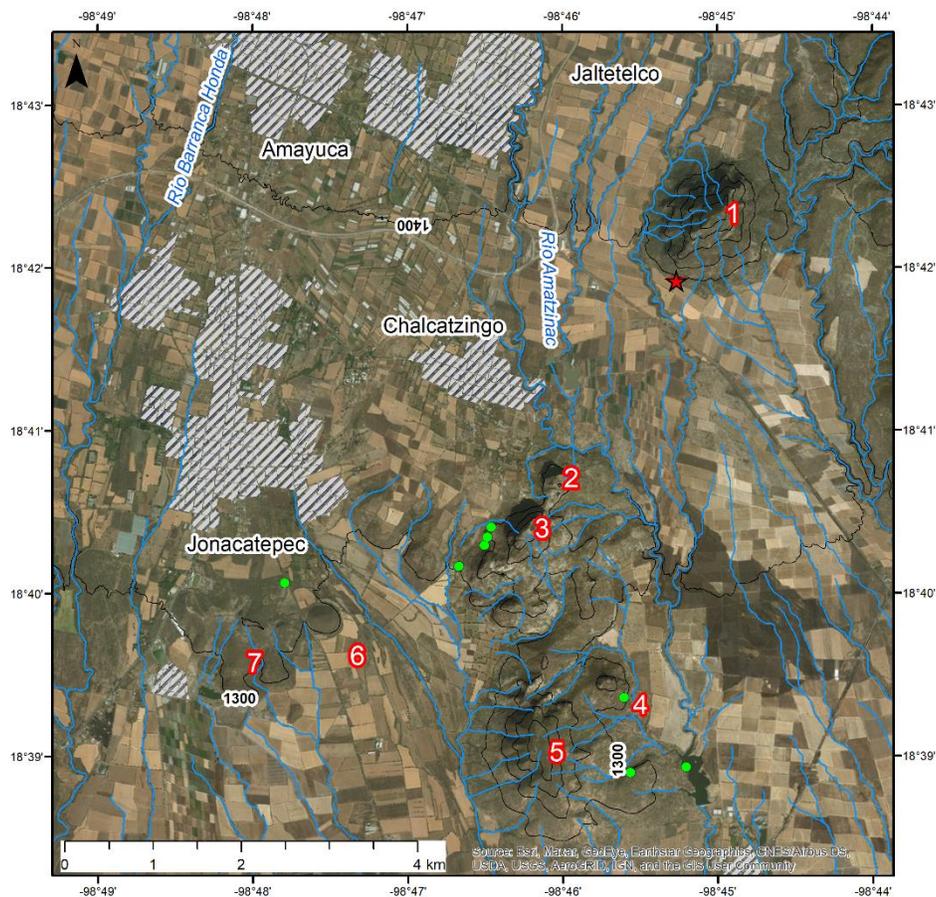


Fig. 28. Mapa que muestra la localización del complejo de domos de Chalcatzingo, dentro de la amplia llanura lahárica. Las elevaciones principales son 1 Cerro Gordo Norte, 2 Delgado, 3 Ancho o Gordo, 4 Cerro del Coyote, 5 Tenango, 6 Cerro El Mirador y 7 Cerro Santa Cruz. Los puntos son sitios de muestreo geoquímico y de datación (estrella roja en el Cerro Gordo Norte) publicados por Gómez-Tuena y colaboradores (2008).

La configuración morfológica de la región presenta unidades del relieve de origen volcánico altamente modeladas, principalmente por la acción

gravitacional, aunque también por procesos de erosión selectiva (muy parecido a lo que ocurre en el relieve granítico) y sepultadas parcialmente por depósitos aluviales coalescentes, así como con evidencias de terrazas adosadas en las zonas de relieve de transición (piedemonte) próximas a los domos (Fig. 29).

A continuación, se describen las unidades geomorfológicas de la zona de estudio, delimitadas a partir de la interpretación del ortomosaico, MDE y MDS, mapa de inclinación y con la ayuda del patrón de drenaje.

Dentro del relieve exógeno se reconocieron los valles menores (al norte y oeste del mapa – Fig. 29) son formas fluviales producto de la remoción de antiguos niveles de aluvionamiento, no exceden los 10 m de profundidad y son afluentes del río Amatzinac. Junto a los valles (específicamente en el del norte) se encuentra una terraza asimétrica adosada al piedemonte del Domo Delgado. Esta unidad es un antiguo nivel de aluvionamiento abandonado y parcialmente sepultado por procesos proluviales, se encuentra por encima del cauce original, posiblemente por efecto de un descenso del nivel de base erosivo (Lugo, 2011). En el sector oriental se encuentra un valle de lecho rocoso, comúnmente asociados con terrazas aluviales abandonadas. Dentro de los domos hay muchos valles de lecho rocoso, pero solo uno pudo ser cartografiado debido a sus dimensiones y resolución de la cartografía (Fig. 29). Los valles de lecho rocoso son franjas descubiertas de vegetación sin un dominio de sedimentación o aluvionamiento, por lo que aflora el sustrato (Huggett, 2007).

La última unidad de dominio fluvial es la planicie aluvial-lahárica y volcanoclástica en donde se encuentra la pirámide de Chalcatzingo (Fig. 29). Es una planicie que puede ser clasificada como poligénica, resultado de

múltiples ciclos de modelado y acumulación, producto de diversas condiciones climáticas, pero con un predominio de procesos fluviales (Lugo, 2011). En nuestro caso, existe evidencia de que la planicie no solo está formada por procesos de desborde fluvial y lahárico (con material puramente volcánico) sino que además está construida por potentes depósitos de avalanchas de escombros (al menos dos) provenientes del volcán Popocatepetl, el último ocurrido hace ~23,500 años a.P (datado por ^{14}C en paleosuelo) (Siebe et al., 2017).

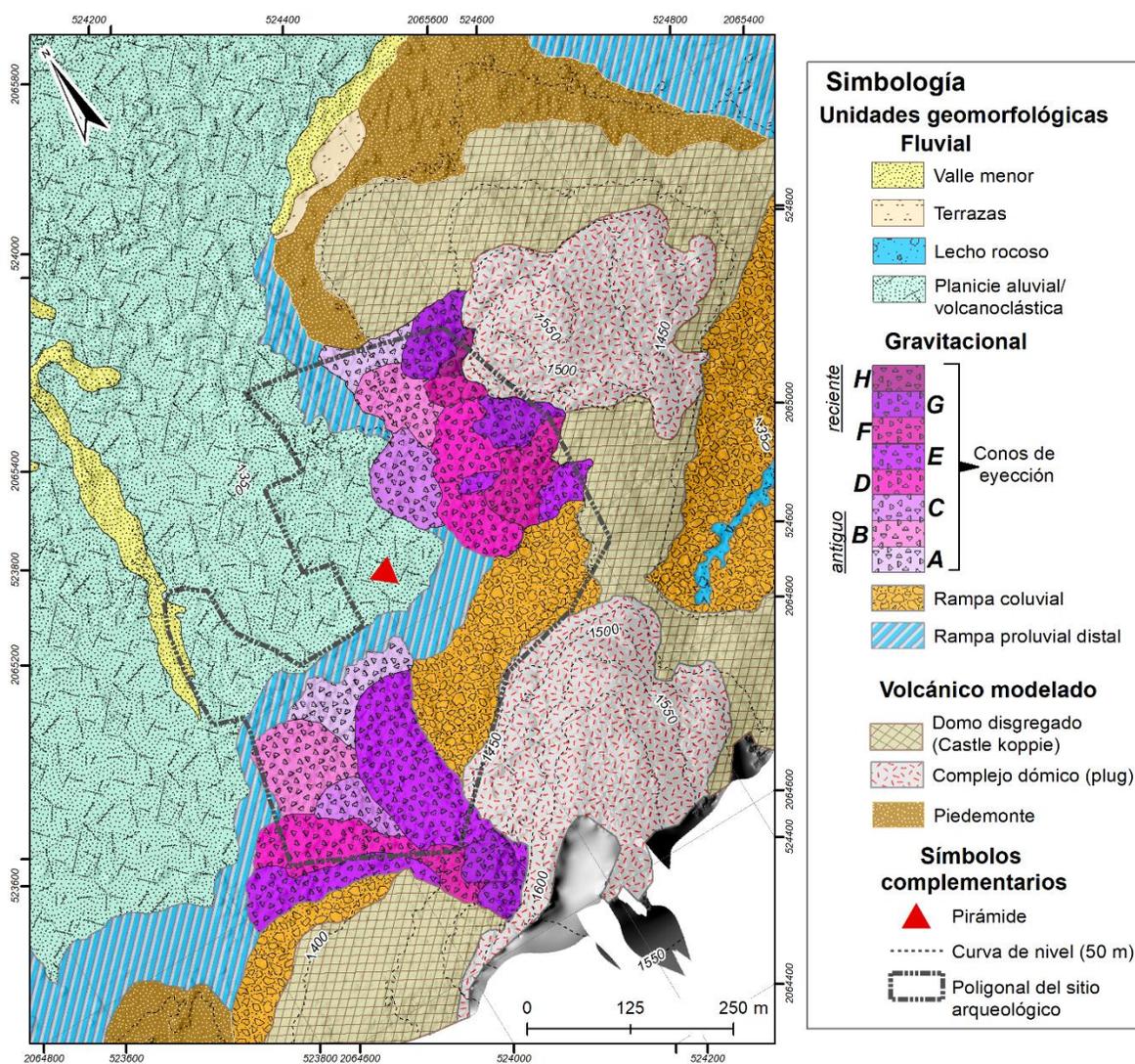


Fig. 29. Mapa geomorfológico del sector noroccidental del domo Gordo. La representación cartográfica se encuentra rotada (nótese el Norte en la esquina superior izq.). Se observa que gran parte de la zona arqueológica se encuentra dentro de un relieve de naturaleza gravitacional.

Las unidades anteriores se encuentran sepultando y/o erosionando a la zona de transición de los domos y la planicie lahárica y volcanoclástica. El relieve más antiguo lo constituyen los domos riolíticos que por su parecido con el relieve granítico y decidió utilizar su tipología. El índice de forma (*shape ratio* Hr/W) obtenido a partir de su altura relativa vs su diámetro muestra un máximo para el Cerro Delgado con 0.47 seguido por el Cerro Ancho o Gordo con 0.45. Los cerros Tenango y Gordo Norte no rebasan el 0.35, mientras que el Santa Cruz tiene el valor más bajo con 0.27. De acuerdo con estos valores las formas presentes son de domos en este caso a manera de *plug* (domo de alta viscosidad que tiende a minimizar su deformación -Blake, 1990). Debido a la meteorización y erosión estos domos muestran una aureola de modelado. En ella la disposición del fracturamiento ortogonal característico de este tipo de relieve ha liberado grandes rocas y dado un aspecto de bloques disperso (*block-strewn residual*) a lo largo del campo (Migón, 2006). Este campo de bloques se conoce como pedrizas, en donde de acuerdo con su índice de forma caerían dentro de los berrocales o *castle koppies*, término sudafricano utilizado para referirse a lomeríos sin una clara cobertura edáfica, pero con cortezas de intemperismo aisladas (Twindale, 1982). En gran parte de la periferia de los domos (específicamente entre el Cerro Gordo y Delgado -Fig. 29) se encuentra este tipo de relieve. Conforme se desciende de los domos aflora un relieve más residual, pero sin la continua presencia de bloques libres o que surgen de la corteza de intemperismo. Es una zona de transición muy marcada marginal a las elevaciones o domos que se distingue por tener una inclinación menor a los 15° y que se une con la rampa proluvial, denominada como piedemonte. Esta unidad presenta el sustrato rocoso con una delgada

capa de material no consolidado (Lugo, 2011), típicamente es una unidad erosiva por lo que no se espera acumulación de sedimentos (Goudie, 2004).

Dentro del relieve de origen exógeno acumulativo se encuentra toda una secuencia de abanicos coluviales que se superponen entre sí. En cambio, lateralmente asociada a estos abanicos se presenta una franja constituida por material de remoción gravitacional coalescente a manera de rampa. Esta secuencia acumulativa termina con una rampa proluvial localizada en la parte distal. Los conos de eyección o abanicos coluviales hacen referencia a una forma de relieve de medio cono con un ápice que apunta a la zona alta o montañosa, constituido por rocas desplazadas ladera abajo por la acción gravitacional (Lugo, 2011; Goudie, 2004). La unidad denominada rampa coluvial tiene el mismo origen que los abanicos coluviales, pero aquí no es evidente la diferencia entre los conos de derrubios por lo que mantiene una geometría de cuesta, que sepulta parcialmente al piedemonte (Lugo, 2011).

La rampa proluvial es un relieve dispuesto a manera de manto constituido por sedimentos depositados por procesos fluvio-gravitacionales (sin distinción), dispuestos a manera de manto acumulativo inferior al piedemonte (Lugo, 2011).

D) Análisis de fracturas

Con el MDS y el mosaico fotogramétrico ortorectificado digitalmente se decidió trazar las discontinuidades claras dentro de los domos Gordo y Delgado (Fig. 30). Se encontraron 1321 fracturas con un rango de longitudes que van de los 0.8 m hasta 141.8 m. La longitud promedio de los lineamientos

es de 8.6 m. Para el caso de las orientaciones obtenidas, se tiene una media de 216° con un promedio de 189° . El diagrama de orientaciones presenta tres direcciones principales, siendo las más importantes (por ocurrencia) la orientación franca E-W, seguida en importancia un sistema dispuesto NW-SE. De acuerdo con este segundo sistema de fractura se encuentra otro casi ortogonal con una orientación NE-SW (Fig. 31).

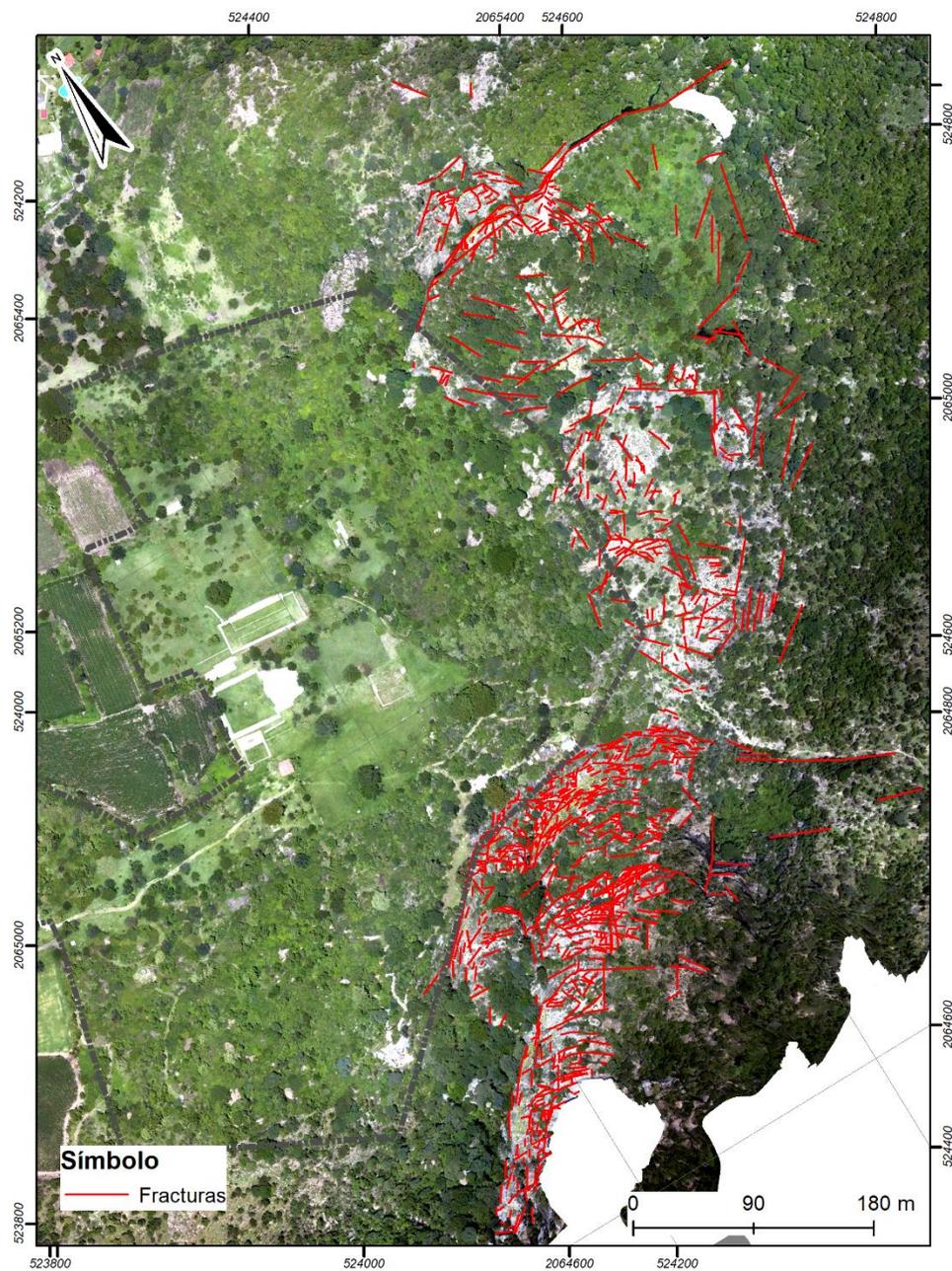


Fig. 30. Ortofotograma de los domos Gordo y Delgado al oriente de la zona arqueológica de Chalcantzigo. Se muestra los fracturamientos o lineamientos reconocidos (el mapa se encuentra rotado 31° al W).

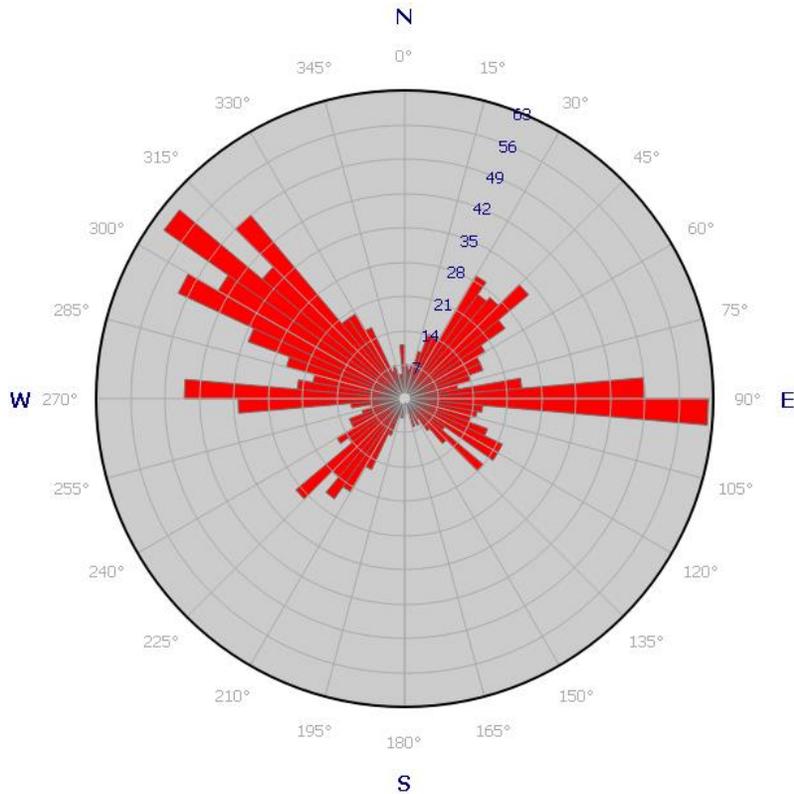


Fig. 31. Rosa de fracturas por ocurrencia, se observa tres principales orientaciones, E-W, NW-NE y NE-SW.

El sistema de fracturas conjugado permite abastecer de bloques libres las paredes del domo Gordo como del Delgado. Para determinar las zonas más propensas de alimentar la caída de bloques se realizó una estimación de densidad espacial por medio de la función de probabilidad de las variables de cantidad de fractura por área determinada (25 m^2). Este análisis de densidad de Kernel, fue aplicado para la cantidad de fracturas y longitud por km^2 . En este sentido el mapa de densidad de fracturas (Fig. 32) muestra los valores más altos (más de 260) en la pared norte del domo Gordo, justo la pared que mira a la pirámide, a dos distintas alturas (1450 y 1590 msnm). Pero no son las mismas zonas con las fracturas más largas, estas se encuentran en las

laderas sureste de los domos Delgado y Gordo. El mapa de densidad de longitud de fracturas muestra que la pared que mira directamente a la zona arqueológica tiene cerca de 2 o 3 fracturas más largas que las presentes en la periferia de los domos (Fig. 32).

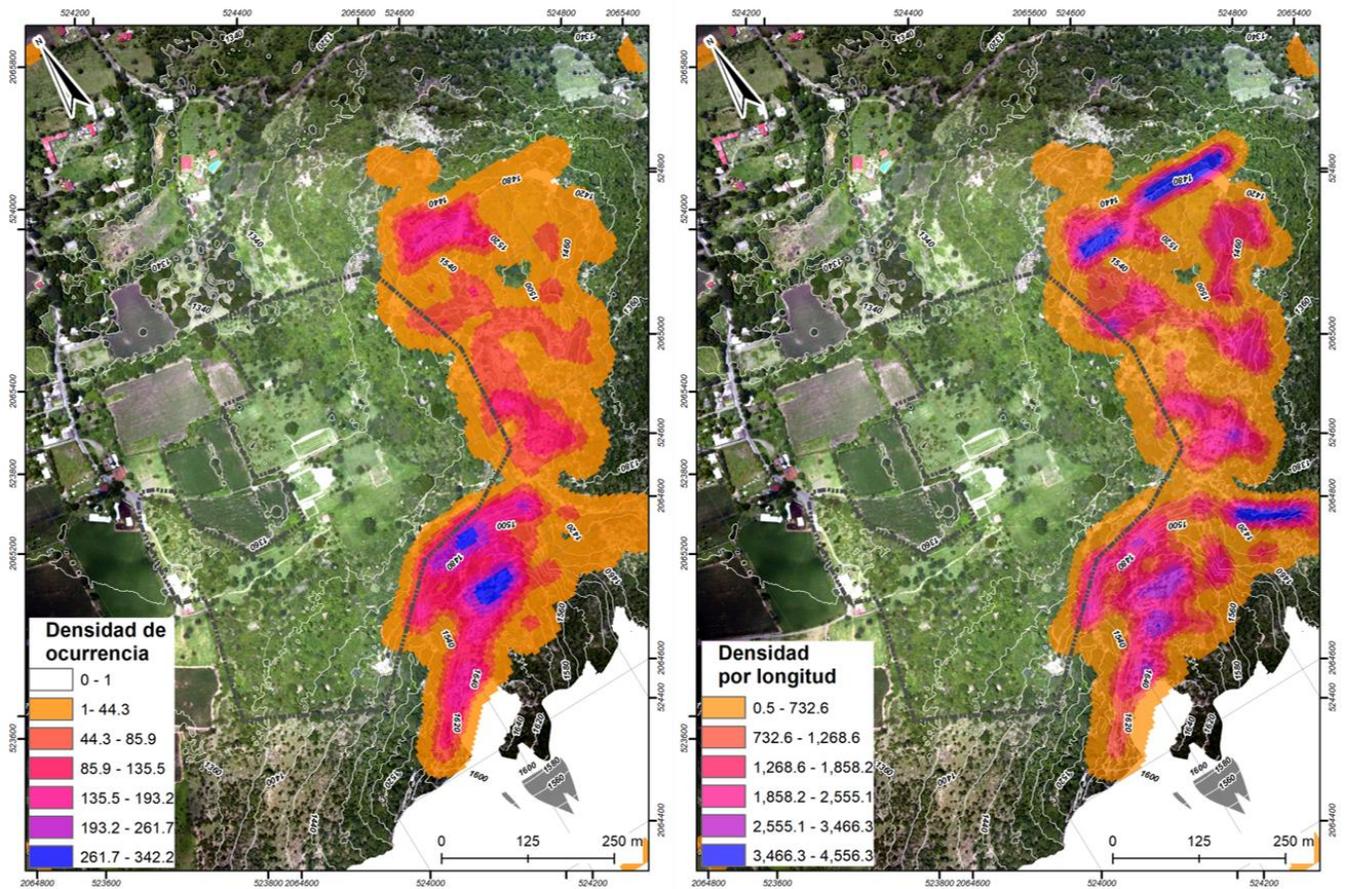


Figura 32. Mapas de densidad de fracturas por ocurrencia (izq.) y longitud (der.) para cada 25m².

V. Resultados

V.1 Datos obtenidos en campo

Durante las salidas a campo a Chalcatzingo, Morelos, se recabaron una serie de datos de diferente índole. Se realizaron vuelos con el VANT con el objetivo de elaborar el MDS y se fotografiaron las paredes próximas o cercanas a la pirámide y zona arqueológica (Fig. 33).



Figura 33. Fotografía tomada con el VANT, que muestra la parte central de la zona arqueológica de Chalcatzingo, así como el Cerro Delgado (izquierda) y el Cerro Gordo o Ancho (derecha).

De esta manera se generaron modelos tridimensionales con los cuales fue posible identificar bloques, que por sus características tuvieran similitudes con los bloques ya depositados encontrados dentro de la zona arqueológica tanto en la planicie lahárica, rampa proluvial como en la coluvial (Fig. 29). Así como que mostraran algún indicador de su potencial desprendimiento. También con el vuelo paralelo a la superficie fue posible generar un ortomosaico rectificado de alta resolución. Posteriormente se tomaron datos de bloques que se encuentran en la zona de depósito, sus medidas, su forma general y sus coordenadas, para finalmente recolectar muestras de ambos cerros con el objetivo de determinar su densidad a partir de su masa y su volumen desplazado.

A) Bloques depositados

Los bloques que se encontraron en la zona de depósito se les obtuvo tres medidas X=lado más largo, Y= lado más corto y Z=la altura desde el suelo a su punto más alto (esto debido a que algunos bloques se encontraban parcialmente enterrados), así como sus coordenadas. A partir de la forma descrita en campo y de sus medidas, los bloques fueron clasificados en tres posibles formas: planos, sub-redondeados y alargados. Aunque sólo algunos bloques fueron medidos (Fig. 34), fue sencillo apreciar la gran variedad de tamaños que hay en la zona de depósito, desde bloques con X menor a 50 cm, hasta mega bloques con longitudes de 10 m (Anexo A).

Los bloques dentro de la zona arqueológica fueron medidos a partir de fotos, así como con los modelos creados con el *software Agisoft Metashape* (Agisoft, 2016). A pesar de la gran cantidad de bloques visibles, solo nueve bloques

fueron tomados en cuenta, esto debido a que fueron fáciles de identificar en las imágenes tomadas además de que su eje menor mide al menos 1.5 metros (Tabla 8). Estos incluyen uno de los más importantes para este estudio, que es el bloque 10, el cual se encuentra recargado en una de las estructuras cercanas a la pirámide (Fig. 35).

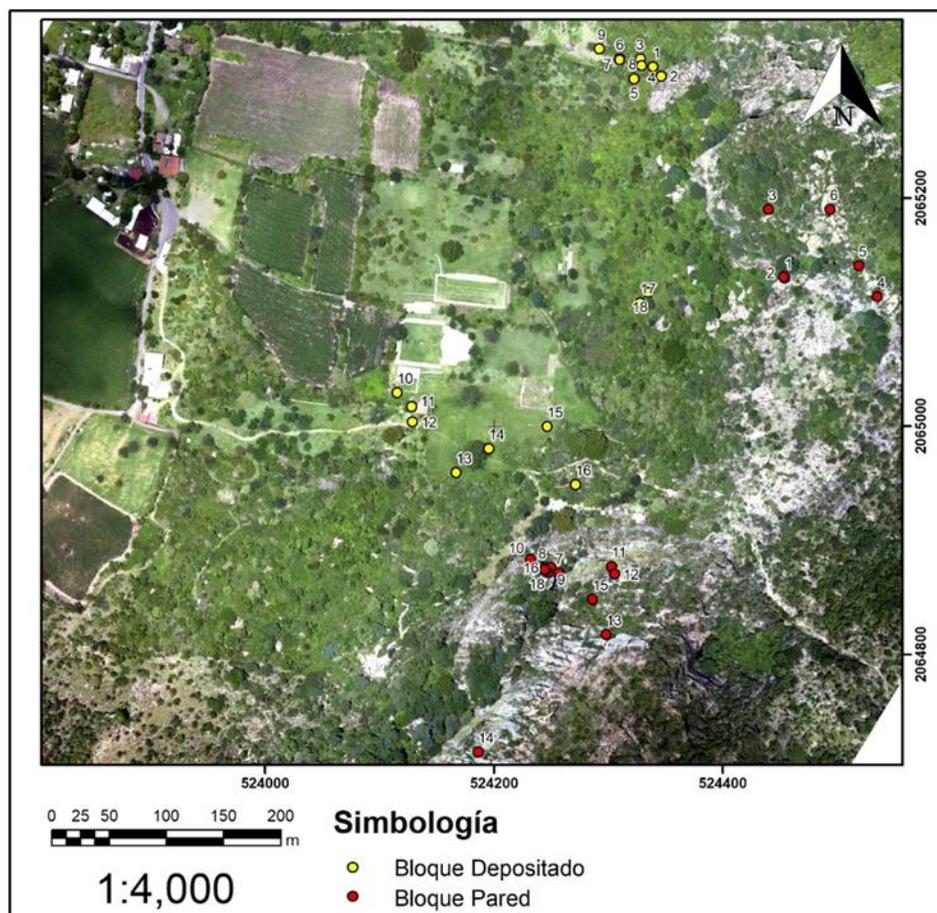


Figura 34. Ortomosaico obtenido a partir del vuelo del VANT, con los puntos de posible origen de desprendimiento y bloques ubicados en la zona de depósito.

La presencia de este bloque fue interpretada como una evidencia de que era posible que un gran bloque llegue hasta las estructuras arqueológicas o posiblemente la pirámide (Fig. 35). Esto implicaría que el fenómeno ya ha ocurrido al menos una vez, aunque no se tiene la certidumbre de que el

bloque haya sido depositado antes de que se emplazara el asentamiento arqueológico.

Existe más bloques dispersos a lo largo de la zona arqueológica los cuales no se encuentran en estas tablas debido a que son de dimensiones menores de 2.5 x 1.5 m o se encuentran cubiertos por vegetación por lo cual no fue posible medirlos de manera precisa (Fig. 36).

Tabla 8. Lista de bloques medidos, dentro de la zona de talud de caídos o rampa coluvial alrededor de los domos.

Bloque 10 Recargado en la pared		
Coordenadas: 14Q 524115, 2065029 Altura:1363 msnm		
X: 5.94m	Y: 3.21m	Parcialmente enterrado
Bloque 11		
Coordenadas: 14Q 524128, 2065017 Altura:1365 msnm		
X: 2.75m	Y: 1.98m	Parcialmente enterrado
Bloque 12		
Coordenadas: 14Q 524128, 2065003 Altura:1365 msnm		
X: 5.94m	Y: 3.21m	Parcialmente enterrado
Bloque 13		
Coordenadas: 14Q 524166, 2064959 Altura:1369 msnm		
X: 2.58m	Y: 1.68m	Parcialmente enterrado
Bloque 14		
Coordenadas: 14Q 524195, 2064980 Altura:1368 msnm		
X: 2.81m	Y: 1.63m	Parcialmente enterrado
Bloque 15		
Coordenadas: 14Q 524246, 2064999 Altura:1367 msnm		
X: 3.30m	Y: 2.77m	Parcialmente enterrado
Bloque 16		
Coordenadas: 14Q 524270, 2064950 Altura:1385 msnm		
X: 6.32m	Y: 3.38m	
Bloque 17		
Coordenadas: 14Q 524327, 2065108 Altura:1376 msnm		
X: 5.54m	Y: 2.39m	
Bloque 18		
Coordenadas: 14Q 524334, 2065003 Altura:1365 msnm		
X: 5.48m	Y: 2.77m	



Figura 35. Fotografía del bloque número 10 el cual se encuentra recargado sobre una de las estructuras cercanas a la pirámide.

Con el VANT *DJI Mavic Pro* se tomaron fotografías de manera manual de las paredes de los cerros en forma de una rejilla (Fig. 37). Posteriormente con el programa *Agisoft Metashape* (Agisoft, 2016) se crearon modelos tridimensionales y ortomosaicos, mismos que permitieron el reconocimiento de bloques libres, así como su patrón de fracturamiento interno tanto del cerro Delgado como del Gordo (Fig. 38).



Figura 36. Algunos bloques pequeños depositados en la zona arqueológica que no fueron considerados por su tamaño (foto izq.), así como un bloque parcialmente cubierto por vegetación por lo cual no fue posible medirlo con las fotografías aéreas. (foto der.).

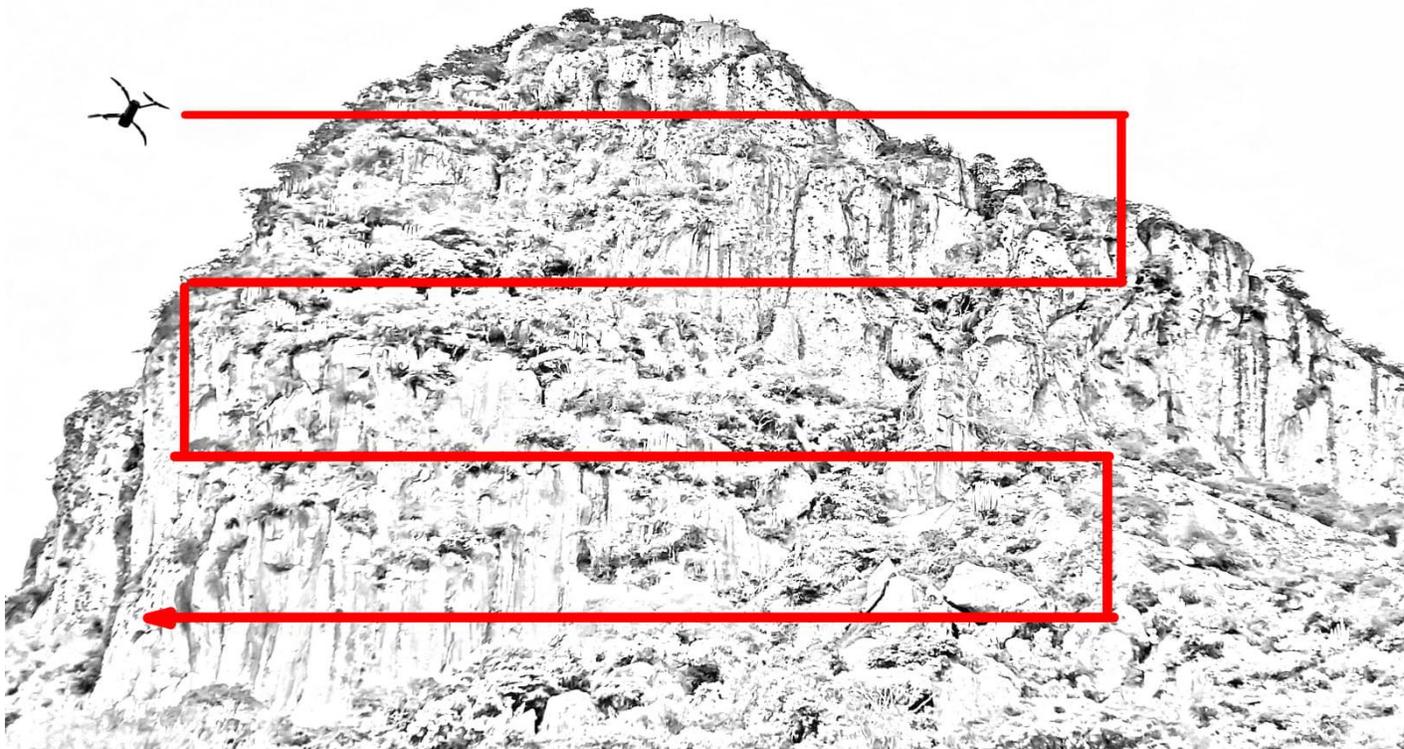


Figura 37. Se muestra de forma esquemática el vuelo manual realizado a manera de rejilla para obtener los ortomosaicos de las paredes que miran en dirección a la zona arqueológica).

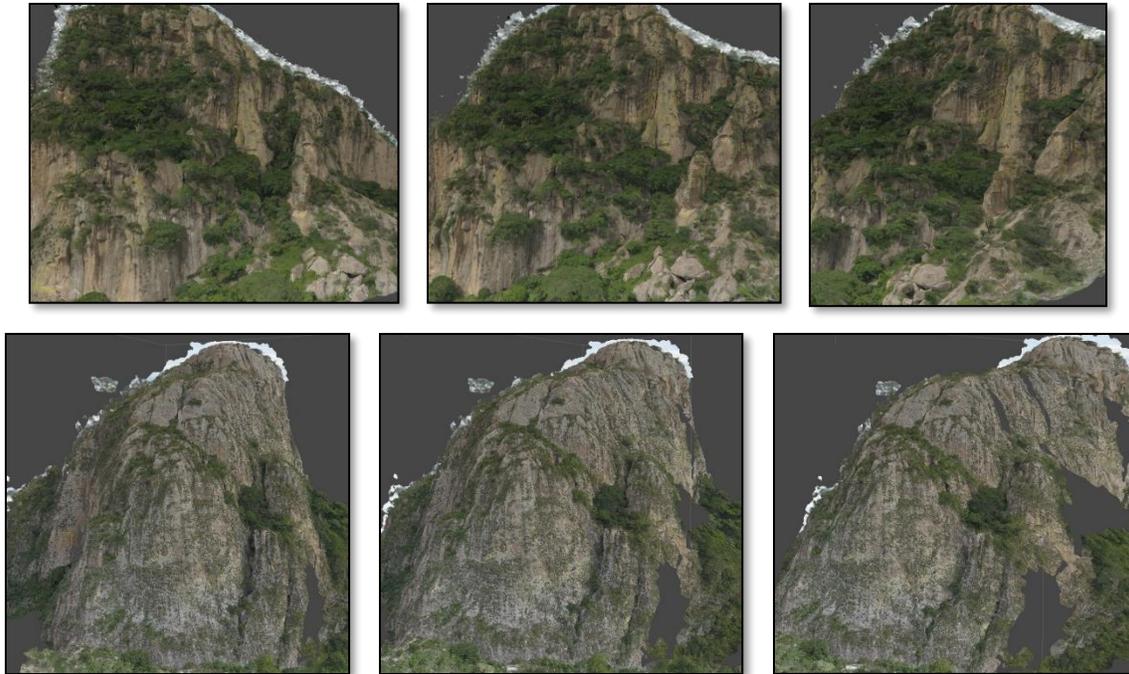


Figura 38. Modelo de las paredes Sureste del cerro Delgado (fotogramas superiores) y Noreste del Cerro Gordo (fotos inferiores), que miran a la zona arqueológica de Chalcatzingo.

B) Fotografías de las paredes

La importancia de estos modelos tridimensionales fue la de determinar a partir de una inspección minuciosa aquellos bloques que tuvieran una apariencia que resulte favorable para su desprendimiento (Fig. 39). Además, debido a su ubicación y tamaño puedan ser los puntos de origen de las trayectorias a simular, así como el límite de avance hasta las zonas de depósito y de esta manera determinar su potencial de afectación respecto con la zona arqueológica.

De acuerdo con la búsqueda de fracturas paralelas y con arreglo ortogonal, discontinuidad en la homogeneidad de la pared, escalonamientos internos, así como el reconocimiento de espacios vacíos entre las discontinuidades, fue

posible seleccionar una importante cantidad de candidatos a desprendimiento.



Figura 39. Modelo 3D que muestran un par de bloques localizado en la pared del Cerro Delgado. Se presentan las distintas perspectivas utilizadas para determinar si cumplen con las condiciones adecuadas para su desprendimiento.

En total se identificaron 18 bloques propensos a colapsar, ya sea en caída libre al inicio o por un movimiento a manera de vuelco. Estos puntos seleccionados fueron los sitios con los cuales se buscó determinar su trayectoria y reconocer si en ella es posible que afectara algún aspecto dentro de la zona arqueológica. Las coordenadas de estos 18 bloques fueron registradas para poder ser introducidas en el software (Tabla 9), así como sus medidas en 3 dimensiones para poder obtener el modelo adecuado de roca para cada caso (Fig. 40). También se calculó a partir de una muestra colectada en campo, la densidad, dando un resultado de 2000 kg/m^3 .

Con el objetivo de simular una mayor cantidad de escenarios de caída de bloques se seleccionaron puntos de origen de caída que, tuvieran un bloque susceptible a caer, estuvieran distribuidos a lo alto de la pared para tener

distintas alturas de colapso y que tuvieran una heterogeneidad de tamaños. Por esta razón, existen puntos propensos a colapsar cercanos tanto a los berrocales como a las zonas de acumulación gravitacional (Fig. 29 y 41). Así como próximos a la cima de los domos, particularmente en el domo Gordo (Fig. 42). Debido a que el presente estudio pretender determinar las condiciones necesarias de los bloques para afectar a alguna estructura arqueológica se evitaron seleccionar bloques dentro de las paredes orientales de los domos y norte del cerro Delgado.

Tabla 9. Tabla con los datos de todos los bloques identificados propenso a caer. 1-5 Cerro Delgado 6-18 Cerro Gordo (localizados en las figuras 41 y 42, respectivamente).

#	Coordenadas (14Q)			Medidas(m)		
	X	Y	Altura(m)	X	Y	Z
1	524454	2065130	1456	5.86	3.99	4.31
2	524453	2065131	1452	5.32	2.42	2.29
3	524439	2065189	1474	7.50	4.4	2.9
4	524535	2065113	1509	5.80	3.41	2.55
5	524518	2065140	1517	7.72	6.26	3.04
6	524493	2065190	1546	4.36	1.95	2.70
7	524257	2064871	1474	5.95	4.11	3.96
8	524244	2064876	1492	4.57	2.28	1.41
9	524249	2064875	1492	8.34	3.17	2.25
10	524231	2064883	1451	4.96	1.58	1.05
11	524302	2064876	1537	7.07	3.08	3.11
12	524305	2064870	1548	6.58	2.92	3.12
13	524298	2064817	1591	2.36	1.40	1.04
14	524186	2064714	1620	3.80	2.30	3.01
15	524286	2064848	1550	6.57	3.30	3.29
16	524247	2064871	1597	4.06	2.13	1.02
17	524245	2064873	1494	1.06	0.86	0.88
18	524244	2064874	1495	3.91	1.12	.080

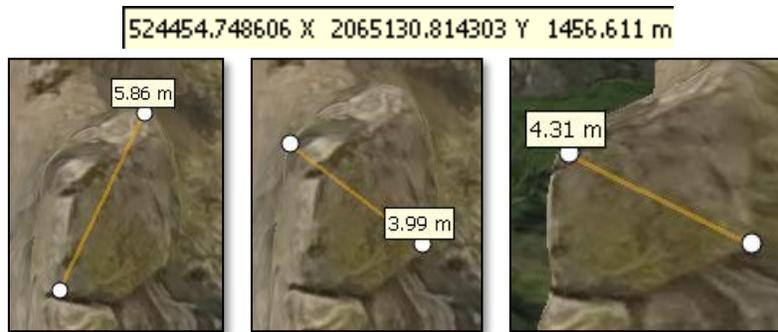


Figura 40. Obtención de coordenadas y medidas de uno de los dos bloques propensos a caer que aparecen en la figura anterior.



Figura 41. Imagen de la pared del Cerro Delgado con los sitios seleccionados de posibles colapsos para bloques de diversas dimensiones.



Figura 42. Imagen de la pared del Cerro Gordo con los sitios de origen de desprendimiento utilizados para las simulaciones.

C) Fotografías aéreas y generación del MDS

Con un VANT (*DJI. Modelo: Mavic Pro*), en conjunto con la aplicación *Pix4D* se creó una misión de vuelo sobre el área de estudio que abarcara los dos cerros y la zona arqueológica (Fig. 43). La misión fue creada con doble rejilla, lo que implica que la cámara se encuentre ligeramente inclinada (70°) y no totalmente vertical (90°). La razón de la doble rejilla era que se necesitaba la

mayor cantidad de información de las paredes, pero lo suficientemente como para permitir realizar una ortorectificación digital. Debido a que el vuelo se inició desde la cima del cerro Gordo, se decidió que volara relativamente bajo con respecto a ese punto, pero alto si consideramos la zona arqueológica, la elevación seleccionada fue de 80 m a partir del punto de origen. La misión tomó 1291 fotografías con una sobreposición de 80% lateral y frontal. Con ellas se realizó un ortomosaico de alta resolución (11.6 cm/px) y un MDS de alta resolución (46.6 cm/px).

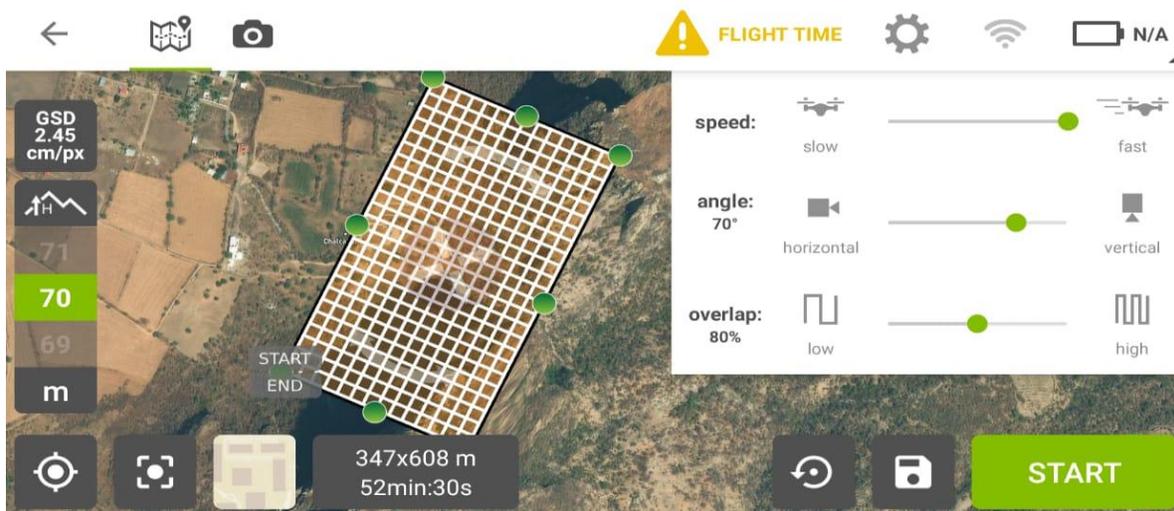


Figura 43. Imagen de la interfaz de Pix4D con el plan de vuelo creado para la adquisición de fotografías aéreas.

Debido a que en el MDS se registraron algunos árboles de altura considerable (> 10 m), se decidió eliminar esa parte de la vegetación manualmente con ayuda del *software* desde la nube de puntos densa. De esta manera la superficie adquirió un cierto suavizado, pero se mantuvo la vegetación arbustiva, posteriormente por medio de interpolación de los valores cercanos de la nube de puntos densa se rellenaron los huecos, obteniendo un MDS continuo y sin interrupciones.

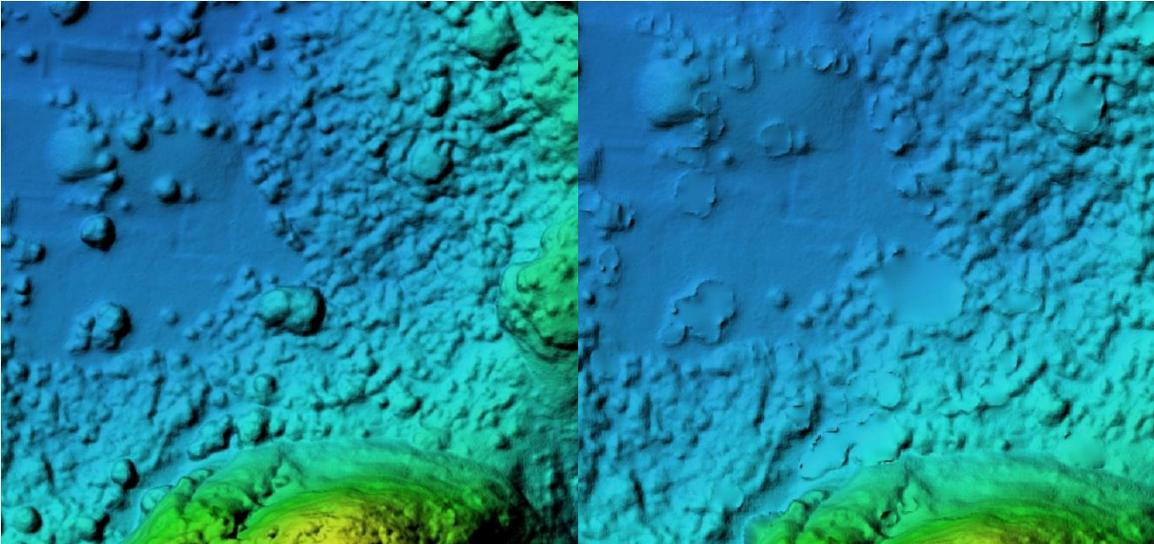


Figura 44. MDS con árboles dispersos de más de 10m (izq.) y MDS sin los árboles, eliminados de la nube de puntos densa, los huecos fueron rellenados mediante la interpolación de los valores cercanos.

V.2 Resultados con Flow R

Flow R es un programa enfocado al flujo de escombros, por lo que los resultados obtenidos se ajustan más a las dinámicas de flujo de escombros que a la caída de bloques. Para tratar de ajustar la dinámica de emplazamiento de la caída de rocas, se modificaron los parámetros (proporcionados por los mismos desarrolladores). De esta manera es posible obtener resultados que se ajusten más con la dinámica de la caída de bloques.

Los resultados obtenidos fueron calculados a partir de la variación topográfica del MDS y dos características particulares; la primera fue ponderar en el MDS como zona generadora, el relieve con una inclinación mayor a 40° , esta condición se consigue en gran parte del domo a manera de *plug*, en sus paredes se alcanzan inclinaciones de hasta 86° en el Cerro Delgado, mientras que, en el Cerro Gordo, se alcanza una inclinación máxima de 82° . La segunda característica fue que el relieve de origen de las caídas debía estar por encima

de la altura absoluta de 1400 msnm. Se cuidó que todos los sitios potenciales de colapso de bloques dentro de las paredes tanto del Cerro Gordo como del Cerro Delgado se encontraran en ambas condiciones.

Una vez definidos los parámetros se generó el mapa de trayectorias a seguir por los bloques colapsados. El resultado muestra tanto los caminos potenciales como las zonas de origen (Fig. 45). Las trayectorias simuladas por el programa están basadas en la geometría del relieve la cual está definida por el MDS sin árboles. Se aprecia que esto causa que las trayectorias tengan un comportamiento similar a las que tiene un río el cual busca la pendiente más pronunciada y el camino más accesible para descender (Fig. 45).

El mapa resultado muestra dos comportamientos claros en las trayectorias obtenidas. Primero una densa cantidad de trayectorias de corto alcance que no exceden los 50 m de avance horizontal de su fuente. Estas trayectorias se encuentran por debajo de la zona generadora de caídas, esto puede indicar que la rugosidad por efecto de la vegetación mantiene a los bloques muy cerca de la pared vertical de los domos (Fig. 45).

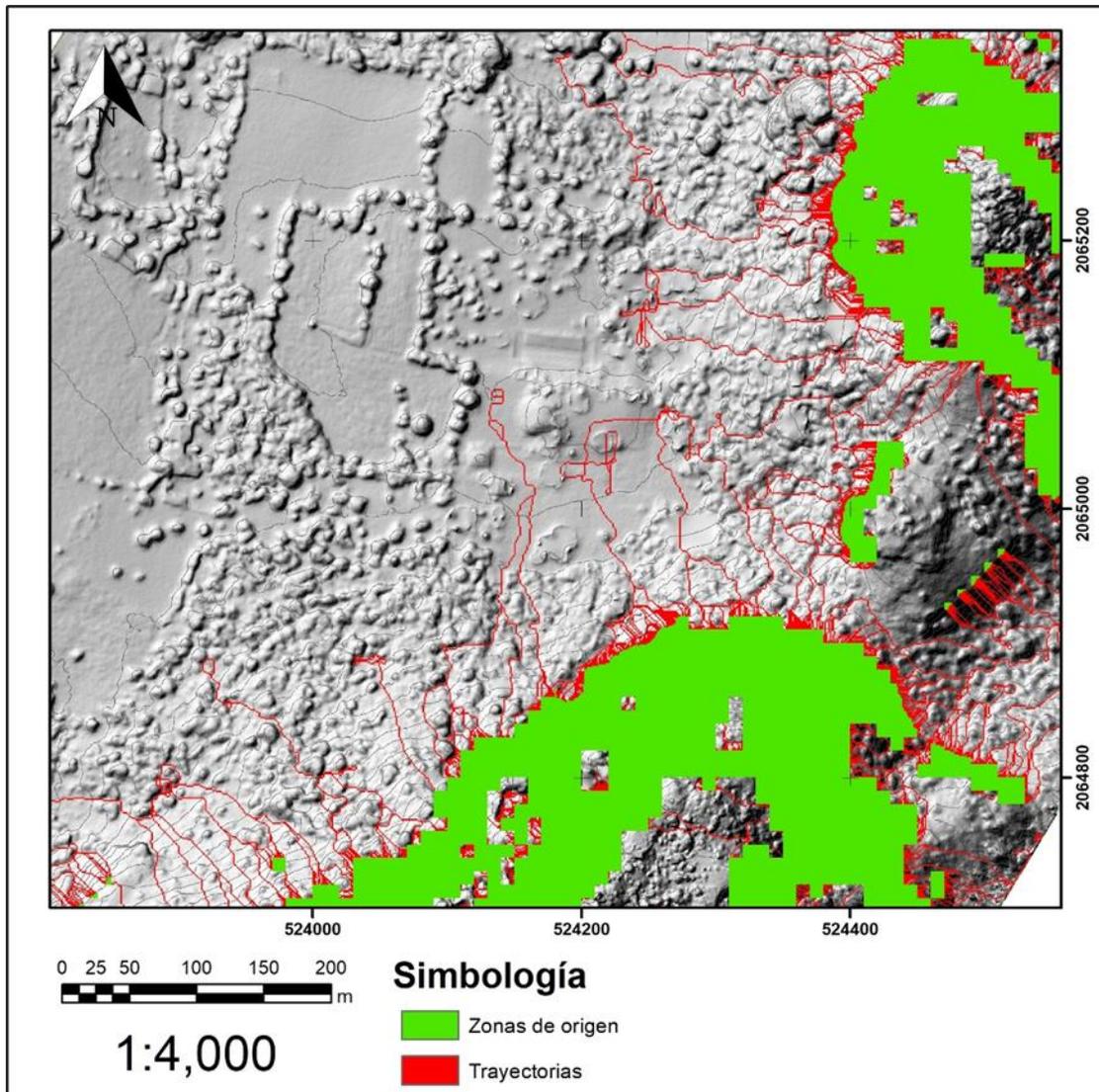


Figura 45. Mapa generado a partir de los resultados obtenidos con Flow-R, las zonas de origen en color verde corresponden a lugares con más de 1400 metros de elevación y con una pendiente mayor a 40°, las líneas rojas corresponden a las trayectorias generadas por la simulación.

El segundo comportamiento claro en las trayectorias son las de largo alcance, que logran viajar más allá de los 250 m de su zona generadora. En este escenario solo cuatro trayectorias alcanzan algún bajorelieve de la zona, pero no la pirámide. Aunque dos de estas trayectorias se originan desde el Cerro Gordo, la simulación considera que, incluso del domo degradado entre los

cerros Gordo y Delgado (Fig. 33 y 34), pueden desprenderse bloques que pueden afectar algunas estructuras próximas a la pirámide (Fig. 34 y 45).

V.3 Resultados de Rocfall

A diferencia de Flow-R, los resultados obtenidos con Rocfall son bidimensionales, lo que los convierte en una de las simulaciones menos convincente para este tipo de procesos. Esto debido a que están diseñadas para taludes o situaciones donde la ladera es creada o recubierta por algún material, por lo cual las variaciones laterales son pocas o nulas.

Los resultados obtenidos mediante este programa fueron en dos formatos, uno en perfil (Fig. 46) y otro en gráfica (Fig. 47). En el perfil se apreciar el comportamiento del bloque caído cuando la trayectoria es una línea recta, para esto se define la distancia del punto de origen (A), la cual incluye la ubicación del bloque 12 (Tabla 9) hasta cerca de 60 metros más allá de la pirámide (B) (Fig. 46). En esta trayectoria se puede apreciar los cambios en la pendiente de la ladera, con una resolución de 5 m. El gráfico permite observar la distancia recorrida desde el punto de origen (Fig. 46). La simulación que permite alcanzar a la pirámide requiere de un bloque de aprox. 60 m³ que excede las 100 ton de masa, y se desprende desde los 1548 msnm, para descender cerca de 180 m hasta la planicie lahárica (Fig. 48).

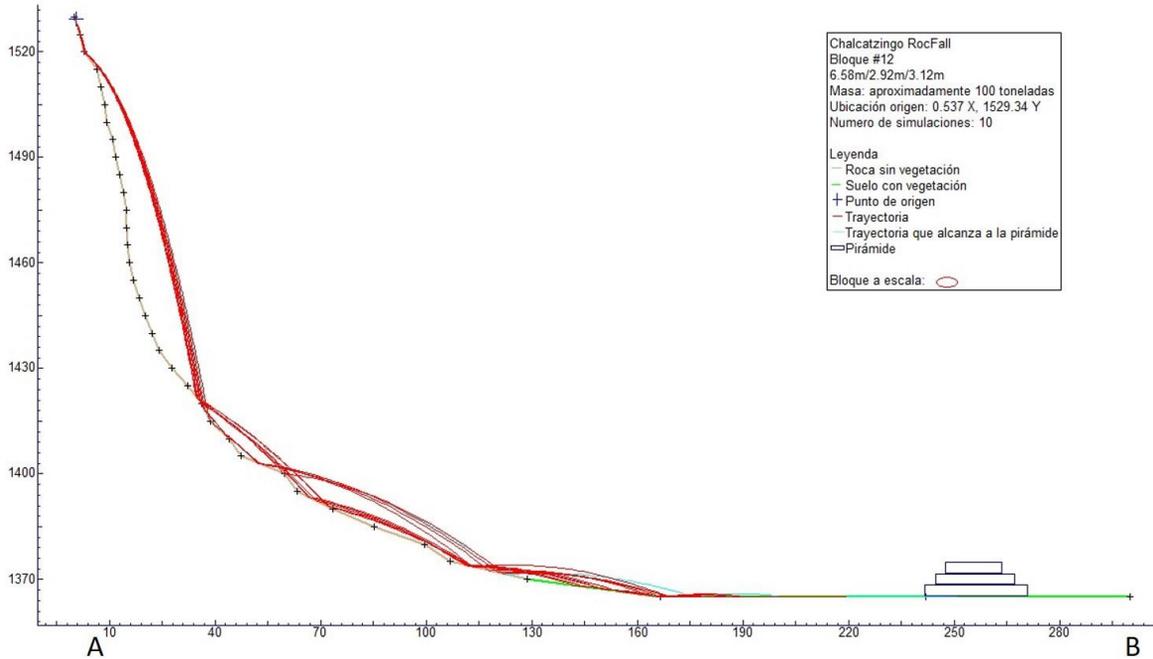


Figura 46. Simulación generada con el software RocFall, las líneas rojas representan las simulaciones que no impactaron a la pirámide mientras que la línea azul representa el bloque que si impacto la pirámide. La línea color café del perfil, representa rocas y vegetación mientras que el suelo con vegetación es la línea verde.

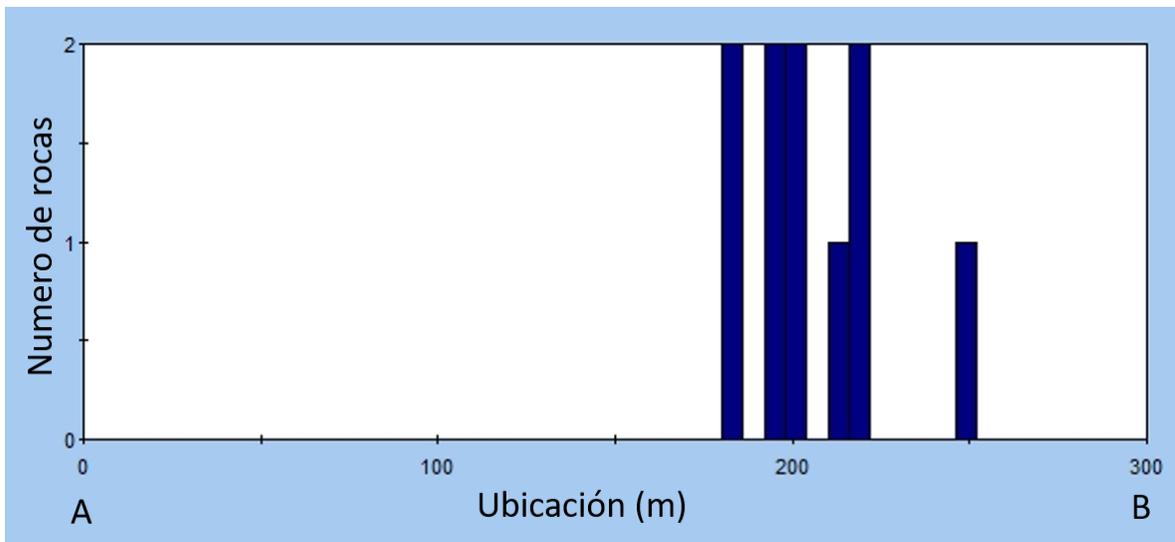


Figura 47. Grafica generada por el programa con el número de rocas depositadas desde el punto de origen A hasta el punto B a 300m, la pirámide se encuentra a 240m.

La simulación que alcanza a la pirámide requirió de 10 intentos, de los cuales cuatro bloques no rebasaron los 200 m de distancia en la horizontal desde su

punto de origen (Fig. 47). Tres intentos rebasan los 200m, pero no alcanzan la pirámide, quedan rezagados por cerca de 20 m y solo uno alcanza a impactar a la pirámide. Los resultados muestran claramente que en esa simulación es posible determinar el camino que uno desea que siga el bloque y no lo determina el entorno (Fig. 48), un problema resultado del enfoque bidimensional de este producto.

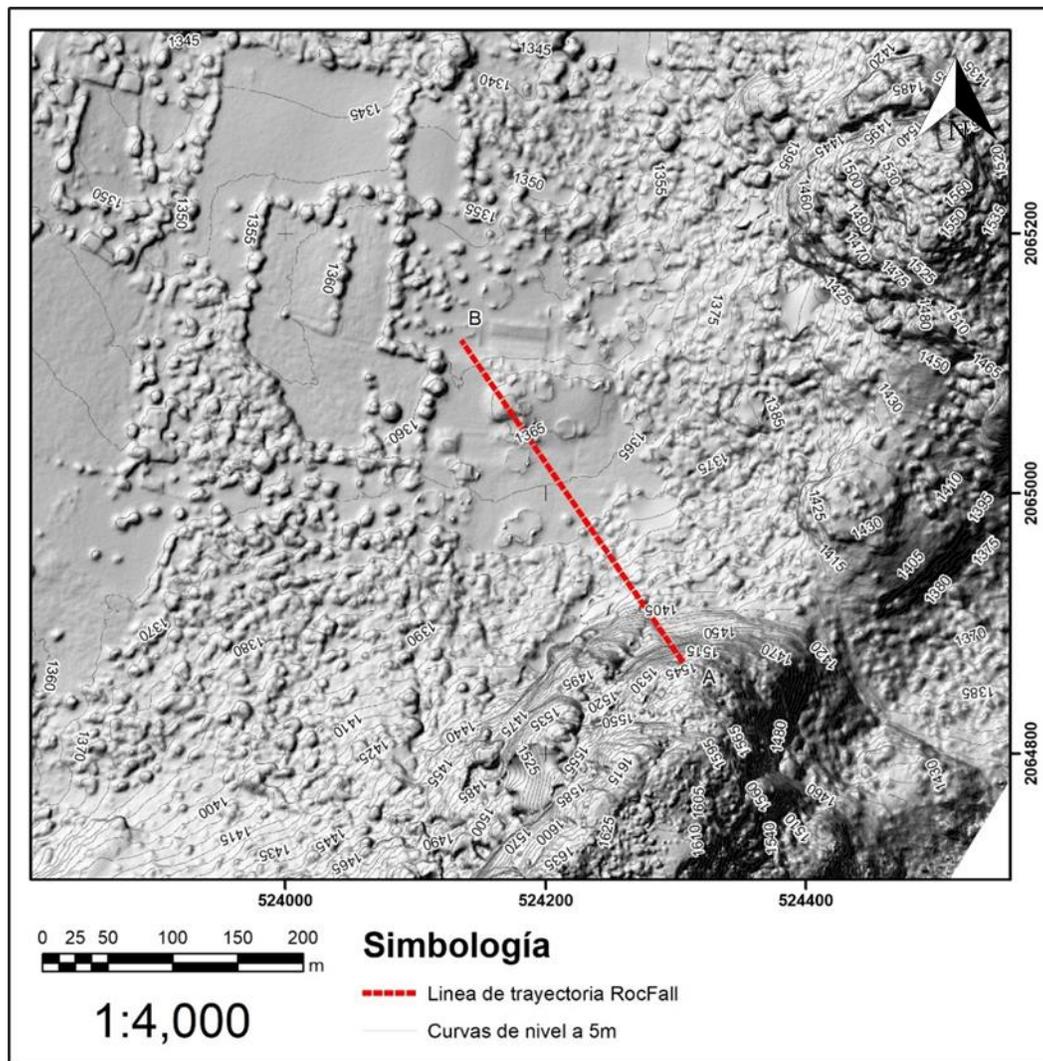


Figura 48. Línea del punto de origen del bloque 12 (A) hasta el punto (B) que se encuentra 60 metros por delante de la pirámide, con la cual fue generada el perfil y la gráfica de la simulación del software RocFall (Fig. 46 y 47).

Este software nos permite simular la caída de un bloque específico en una dirección específica y podemos obtener su máxima distancia y el lugar en donde se depositaría de esta manera, puede ser muy útil si sabemos exactamente de dónde provendrá el bloque y qué ruta seguirá.

Otro aspecto benéfico del modelo es que, al realizar 10 simulaciones, se ve la forma en la que los bloques rebotan sobre los diferentes tipos de superficie, suelo y roca. Sólo un bloque es el que logra llegar hasta la distancia de la pirámide mientras los demás se detienen antes, aunque dentro de la zona arqueológica. Esto vuelve al programa una herramienta para trabajar en conjunto con otro programa o datos que permita automatizar el punto de origen.

V.4 Resultados de RAMMS::RockFall

RockFall de RAMMS, es posiblemente el programa más completo, versátil y particularmente enfocado en evaluar la caída de bloques. Los resultados obtenidos son más precisos ya que es posible modificar más parámetros como la densidad, volumen, la forma de los bloques, la dureza de la superficie, los puntos de origen, etc. También tiene la capacidad de representar los resultados en dos o tres dimensiones desde el programa o exportarlos a un SIG para visualizarlos de mejor manera en conjunto con otros datos.

Fue posible modificar la forma, tamaño y masa de la roca a simular. Creamos 18 bloques con las características más aproximadas a la realidad, para que de esta forma fuera posible, no sólo obtener datos a partir de la superficie, sino también del comportamiento del bloque durante su caída.

A) Simulaciones

Este programa requiere la posición y geometría de los bloques propensos a caer, por lo tanto, fue necesario su reconocimiento previo en campo o con ayuda de otro software. Además, fue necesario hacer una clasificación del tipo de superficie de acuerdo con RAMMS::Rockfall. Esto es importante porque determinará el comportamiento del bloque a rebotar, hundirse o rodar. Los tipos de superficie escogidas fueron: Extra duro, Duro y Medio duro (Fig. 49). Las razones de su clasificación fueron posición del relieve y tipo morfológico, de esta manera al tener una zona de transición de la ladera formada por roca sólida se determinó su respuesta como un medio “duro”. La zona de acumulación del tipo rampa proluvial y aluvial que se encuentra cubierta por vegetación (principalmente pasto) se clasificó como “medianamente dura”.

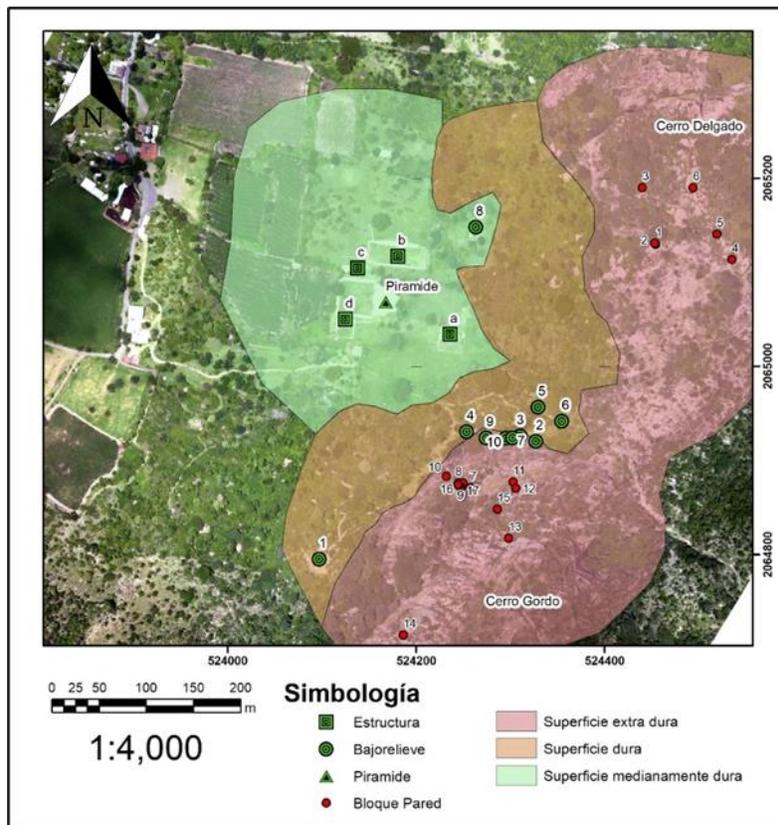


Figura 49. Mapa que muestra las 3 zonas de superficie con diferente dureza, las estructuras arqueológicas y los puntos de origen de los posibles bloques a desprenderse.

Se identificaron 18 bloques (Figs. 41 y 42) susceptibles a colapsar, se midieron (Tabla 9) y clasificaron de acuerdo con su forma (Fig. 18). Se introdujeron los datos de sus dimensiones y densidad, se calcularon sus valores de masa y volumen automáticamente y se realizaron las simulaciones (Fig. 50).

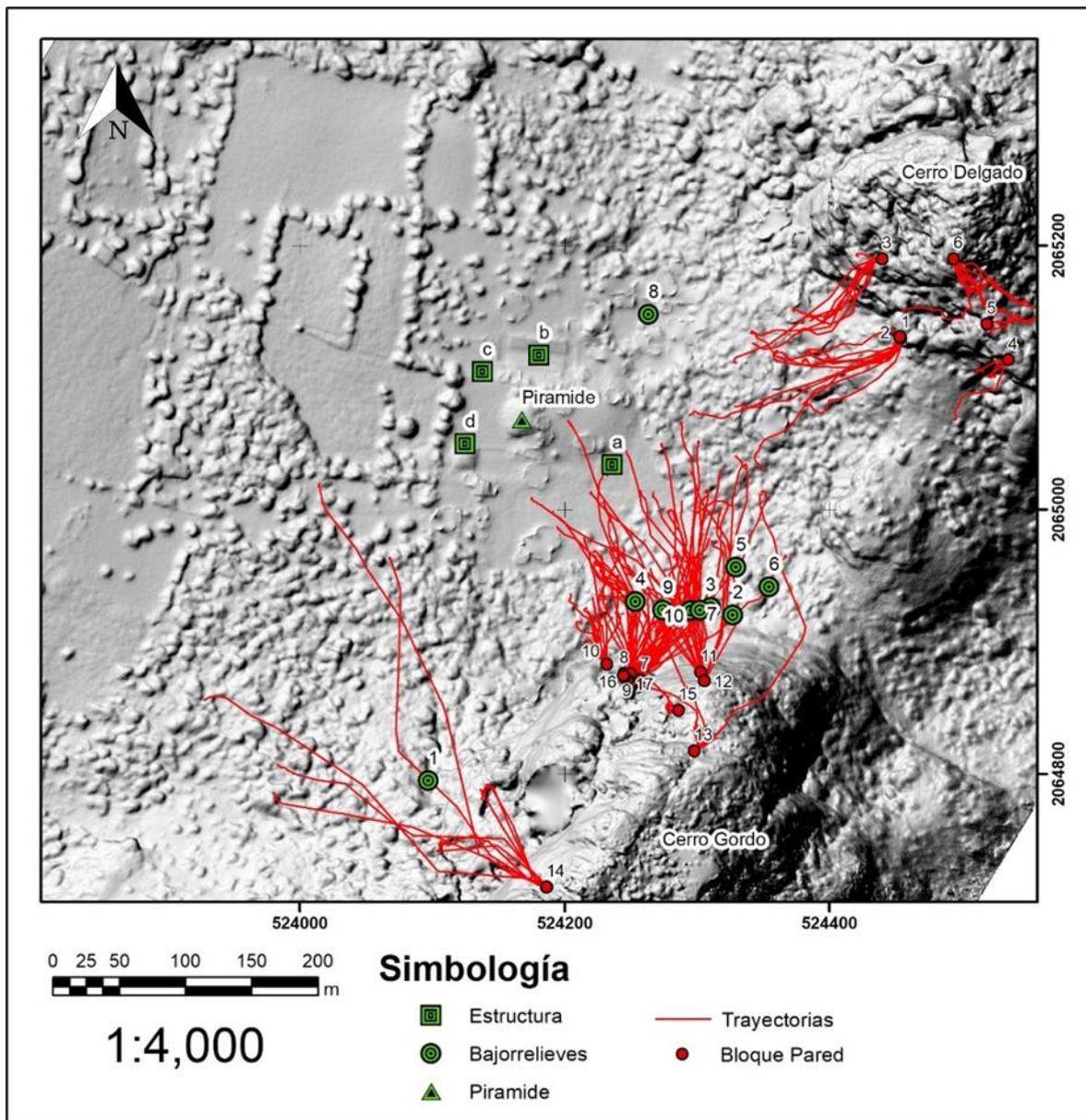


Figura 50. Mapa que muestra todas las trayectorias generadas por el programa a partir de los 18 bloques posibles (10 simulaciones por cada bloque).

El resultado de las simulaciones se almacena como una capa en formato *shape*, donde se guardan las trayectorias generadas como vectores, para cada uno de los orígenes y hasta las zonas de depósito (Fig. 50). Estas capas fueron introducidas a un SIG y sobrepuestas con el ortomosaico generado por el VANT, para su mejor visualización y así poder identificar si alguno de los bloques pudiera causar algún daño en algunas de las estructuras y bajarrelieves de la zona arqueológica (Fig. 51).

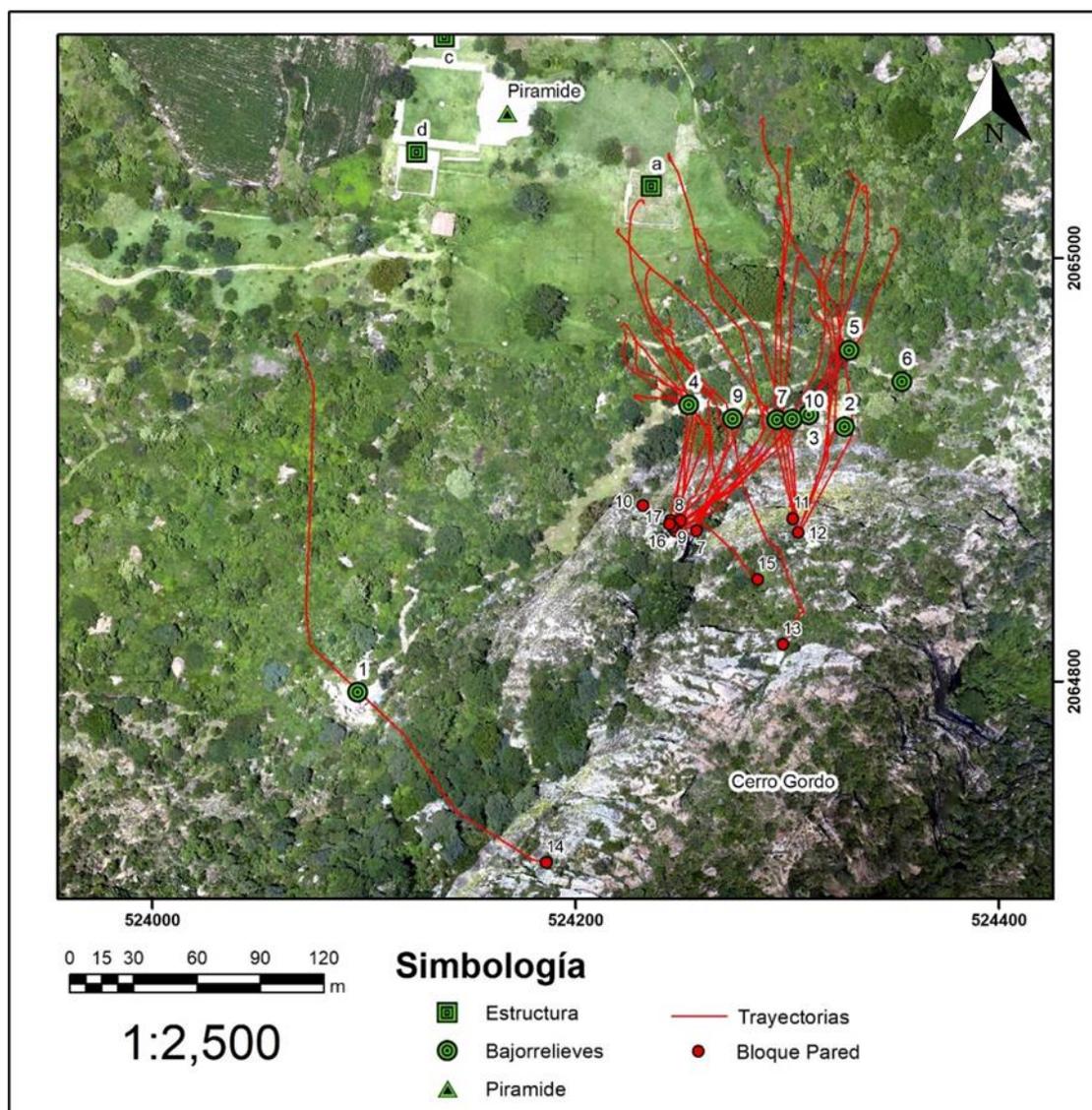


Figura 51. Mapa que muestra sólo las trayectorias que afectan a algún bajarrelieve o estructura arqueológica.

De los 18 bloques simulados, todos fueron procesados en 10 ocasiones, de las cuales algunas no fueron logradas con éxito, ya que presentaban el error de desviaban en direcciones opuestas, incluso a zonas con un incremento en la pendiente. Este error no está claro si fue un problema del programa o del usuario. Los que fueron logradas con éxito se muestran en las figuras 50 y 51. De todas las obtenidas se depuraron aquellas que tiene una alta probabilidad de impactar o dañar alguna estructura arqueológica. Siendo más de una veintena de eventos que pueden afectar a los bajorrelieves como a algunas de las estructuras dentro de la rampa proluvial distal. Pero de las simulaciones obtenidas ninguna de las generadas a partir de los seis bloques del Cerro Delgado afecta alguna estructura bajorrelieve o a la pirámide. Esto se debe a que la distancia del Cerro Delgado a la zona arqueológica es mayor que la distancia del Cerro Gordo lo que permite una mayor extensión del área de vegetación.

De los 12 bloques restantes en el cerro Gordo nueve de ellos tienen trayectorias que pueden afectar a algún bajorrelieve o a la estructura, esto se debe principalmente a la cercanía que tienen los bajorrelieves y los puntos de origen, así como el hecho de que los bajorrelieves se encuentran en la zona con superficie extra dura y dura. El resto de las estructuras junto con la pirámide no se ven afectadas por las simulaciones generadas posiblemente porque se encuentran en una superficie medianamente dura y con poca pendiente, así como a una mayor distancia de los puntos de origen (150-250mts).

Respecto a la velocidad alcanzada por los bloques, los valores máximos alcanzan hasta 50 ms^{-1} con impactos que desaceleran súbitamente la caída de los bloques por hasta -20 ms^{-1} (Fig. 52). También se observa que los saltos

simulados por el impacto de los bloques en una superficie medianamente duran exceden los 60 m de distancia y ocurren en la zona de transición (rampa coluvial -Fig. 29).

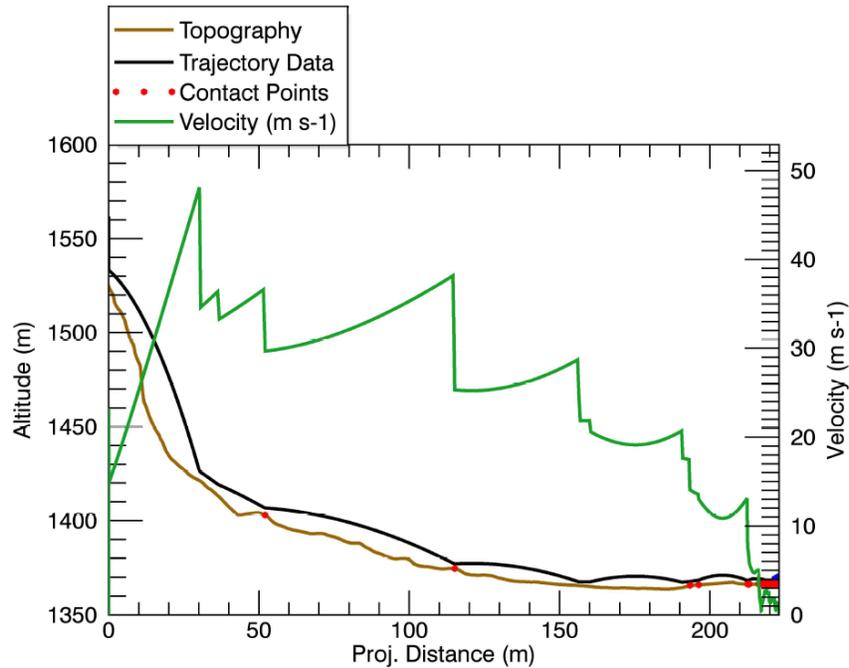


Figura 52. Gráfica de la velocidad del bloque 11 respecto a la distancia y altura, también se muestra la topografía y la trayectoria del bloque.

Las gráficas de comportamiento del bloque caída arrojan una gran cantidad de información. En ellas se observa que la desaceleración del bloque es súbita alcanzando el 0 ms^{-1} en menos de 10 m con una velocidad inercial de hasta 13 ms^{-1} (Fig. 53).

En cambio, los valores de energía cinética muestran los característicos saltos de varios miles de kJ en cada impacto que tiene la roca con el sustrato. Estos rebotes le imprimen, en ocasión una mayor energía lo que permite que se desplace una mayor distancia en la horizontal (Fig. 53). Este comportamiento le permite al bloque remontar pequeños desniveles topográficos de cerca de 5 m de altura (parte final de los perfiles en las figuras 52 y 53). Se obtuvieron

los valores para cada uno de los bloques simulados en el presente trabajo solo se muestran los datos del bloque 11 al representar un bloque de volumen medio (67 m^3 idealizado) y de recorrido mayor a los 200 m de distancia de su fuente y más de 160 m de desnivel vertical.

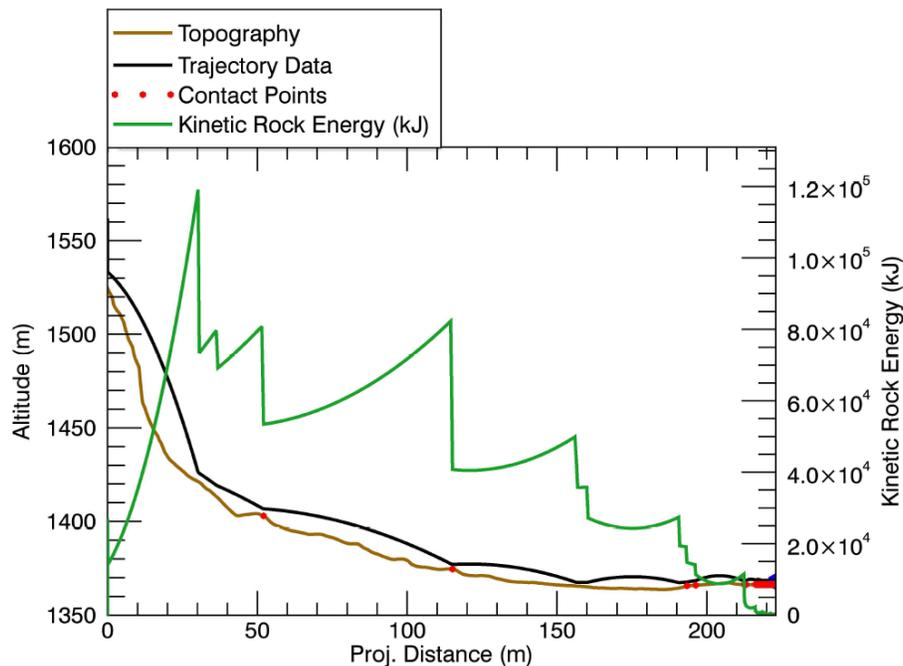


Figura 53. Gráfica de la energía cinética del bloque 11 respecto a la distancia y altura, también se muestra la topografía y trayectoria del bloque.

Además de las 18 simulaciones realizadas en sitios específicos identificadas en campo, se realizaron simulaciones a partir de líneas y polígonos en áreas donde se consideró que un bloque pudiera desprenderse (Fig. 54).

Para estas simulaciones se utilizaron los parámetros de un bloque hipotético con dimensiones: $x = 7.72$; $y = 6.26$; $z = 3.04$, con una densidad de 2000 kg/m^3 , un volumen de 72.90 m^3 y una masa de $145,802.5 \text{ kg}$. El resultado de las simulaciones muestra trayectorias a manera de ramos con un origen puntual a lo largo de una línea o polígono (Fig. 55 y 56). El alcance de las trayectorias excede los 200 m. Las simulaciones a partir de una serie de líneas se acotan

hasta la planicie proluvial distal y aunque tienen un alto potencial de afectar los bajarrelieves, la posibilidad de dañar las estructuras arqueológicas y la pirámide es nula (Fig. 55).

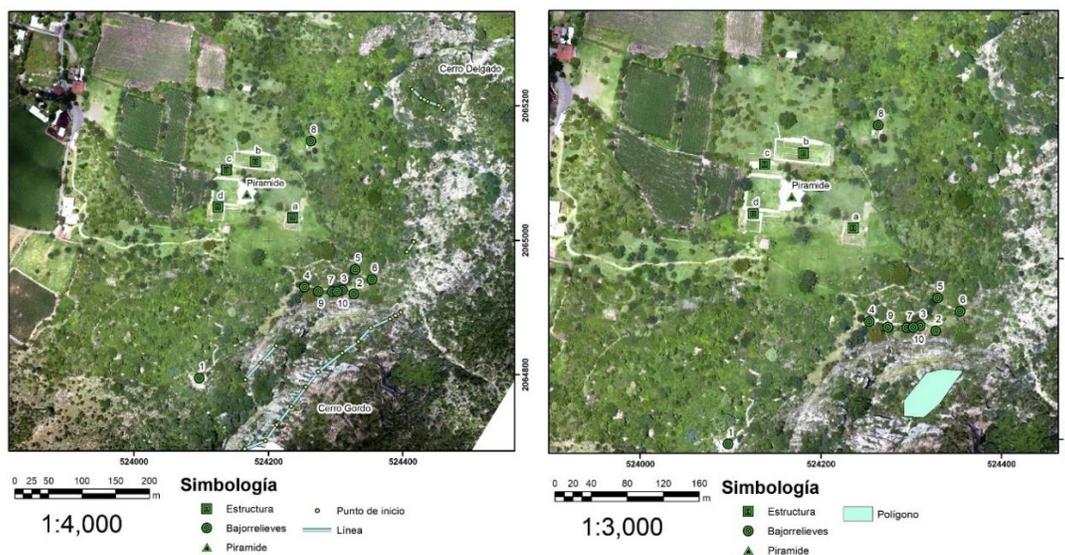


Figura 54. Sitios de simulación a partir de fuentes de desprendimientos a manera de líneas (izq.) y superficies (der.), se colocan como referencia los sitios de interés arqueológico.

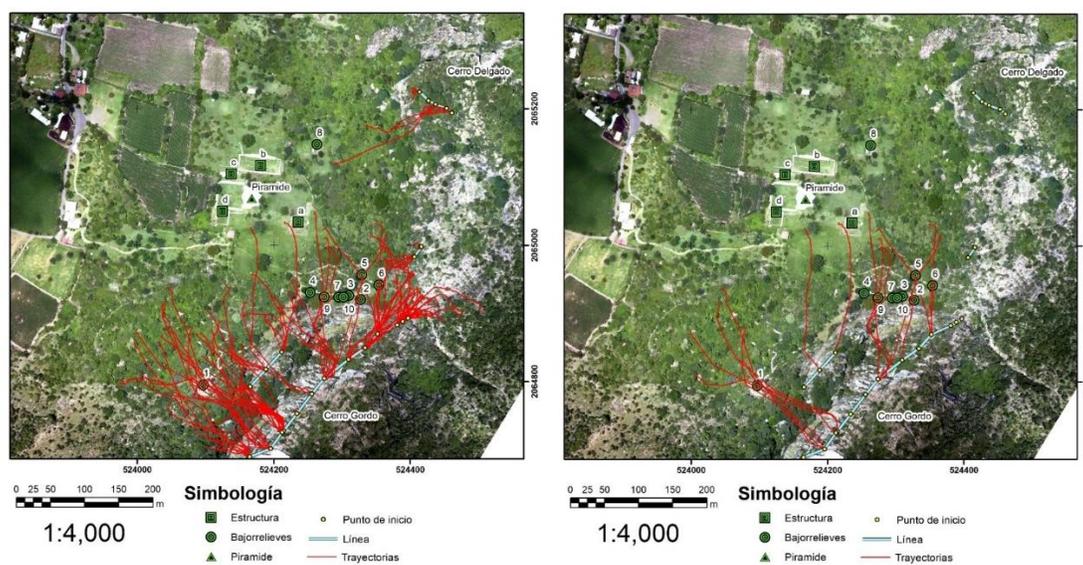


Figura 55. Mapas en donde se muestran todas las trayectorias de caída de bloques a partir de un origen lineal (mapa de lado izq.) y de las trayectorias discriminadas de acuerdo con la posibilidad de impactar a alguna estructura arqueológica (mapa de la der.).

Las simulaciones obtenidas a partir de una superficie próxima a la cumbre muestran una gran densidad de trayectorias que bajan por la pared más escarpada del Cerro Gordo (Fig. 56). Pero contrario a las simulaciones realizadas a partir de puntos específicos, la cantidad de trayectorias que pueden dañar a algún bajorrelieve es menor quedando inmune los sitios 7, 9, 5 y 4 (Fig. 56). En ambos escenarios la pirámide permanece sin afectación alguna.

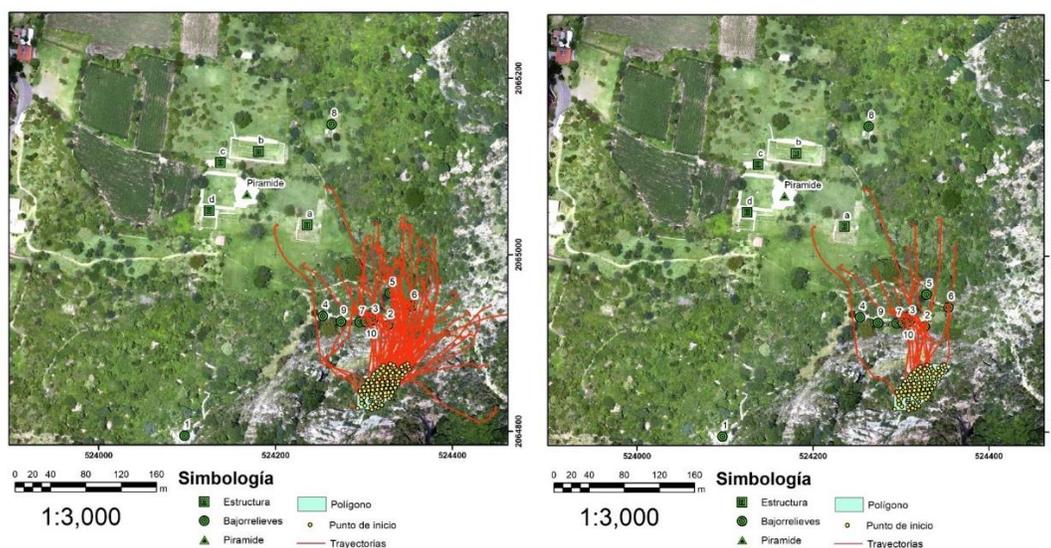


Figura 56. Mapas en donde se muestran todas las trayectorias de caída de bloques de acuerdo con un origen determinado por un polígono (mapa de la izq.) y de trayectorias depuradas a partir de la posible afectación a alguna estructura arqueológica.

V.5 Cuadro con los softwares y los resultados

Tabla 10. Resumen de los tres programas utilizados

Programa	Flow-R	Rocfall	RAMMS::Rockfall
Características del Software	Se usa para simular flujos, avalanchas y derrumbes. Se puede usar para la caída de bloques, al modificar ciertos parámetros.	Permite simular la caída de un bloque específico en una dirección específica.	Enfocado exclusivamente a la caída de bloque y permite modificar una gran variedad de elementos.

Parámetros Utilizados	Altura, pendiente, algoritmo de dirección(constante), algoritmo de inercia(constante), función de perdida por fricción(constante), MDS y mapa de pendientes	Perfil, elevación, masa, datos del material de la superficie, curvas de nivel, MDS	Densidad, masa, volumen, medidas de los bloques, forma, punto, polígono o línea de origen, MDS, mapa con las durezas de la superficie y ubicación de los bloques
Representación Bidimensional /tridimensional	Tridimensional	Bidimensional	Tridimensional
Bloques	Ningún bloque específico	Bloque numero 12	Bloques identificados en las paredes del Cerro Gordo y Delgado, así como otros introducidos por punto, línea y polígono
Medio de representación	Mapas	Perfil	Gráficas y Mapas
Ventajas	No requiere datos previos de campo, solo un MDE Delimitan la zona de origen Gratuito.	Se puede simular un bloque específico, se toma en cuenta y se puede apreciar el efecto de rebote.	Especializado en la caída de bloques, de fácil uso, es posible modificar muchas variables como las características de los bloques, genera graficas de resultados
Desventajas	Los resultados se asemejan a un fenómeno canalizado o asistido por agua. El relieve afecta demasiado la dirección. No es posible simular bloques únicos.	Resultados en una línea recta, no toma en cuenta variaciones laterales. La generación del perfil es manual Tiene un costo	El visualizador integrado es difícil de usar. Tiene un costo
Resultados (daños)	No logra impactar a la pirámide principal y no es posible determinar daño a otras estructuras por su comportamiento de flujo.	Si, a la pirámide principal y a cualquier otra estructura que se encuentre en línea recta	Impactos solo a los bajorrelieves, ninguno de los bloques simulados alcanza a la pirámide.

		del punto de origen a la pirámide.	
--	--	---------------------------------------	--

V.6 Discusión

Al iniciar la búsqueda de simuladores para este trabajo fue claro que la generación de algoritmos de caída de bloque está en constante evolución. El desarrollo de estos programas no sólo se justifica para determinar riesgos y peligros por caída de bloques, sino para cualquier proceso de remoción en masa.

En México hay estudios, así como artículos y reportes de deslizamientos, caídas de bloques y de otros tipos de procesos de remoción en masa; pero no hay muchos en donde se utilicen *softwares* especializados para la simulación. Esto puede deberse a que la mayoría de los trabajos tratan con eventos que ya han sucedido y no realizan diagnósticos de posibles escenarios a futuros.

La identificación de bloques depositados, así como sus características y ubicación nos ayudan, en principio, a definir la ocurrencia del fenómeno y su alcance. También nos indica el potencial de afectación. Estos eventos pasados nos proporcionan la oportunidad de evaluar la magnitud del proceso y de extraer las propiedades físicas finales de cada caída de bloques. Con base en esta información podemos obtener las trayectorias de posibles eventos a partir de las características del terreno, como los cambios en la pendiente, diferencia altitudinal y obstáculos como la vegetación. Esta última variable puede modificar considerablemente las trayectorias y desacelerar los bloques al caer.

Las condiciones presentes en las paredes que miran a la zona arqueológica de Chalcatzingo son las óptimas para el desarrollo de caída de bloques, aunque es cierto que la roca que constituye a los domos es de alta competencia. Las evidencias de zonas de alto dinamismo respecto a la presencia de conos coluviales en el cerro Gordo como en el Delgado son un indicativo de que las paredes más activas a la remoción no se encuentran directamente sobre la zona arqueológica. La distancia de los escarpes de los domos cercanos pone de manifiesto que la procedencia de los bloques potencialmente peligrosos es mayor para la pared del Cerro Gordo. De acuerdo con lo anterior es posible indicar que los bloques que más representan un peligro para la zona arqueológica son aquellos que pueden descender del Cerro Gordo. Esto se ve reforzado por la presencia de una delgada franja de vegetación en donde incluso, gran parte de los bajorrelieves se encuentran, y que los bloques podrán atravesar con unos cuantos rebotes.

El uso del VANT para la generación de modelos en tres dimensiones de las paredes fue de gran importancia, ya que con esto fue posible realizar una inspección visual expedita de la pared y obtener las medidas y ubicación de los posibles bloques. Esto para todos los bloques localizados en la pared y que de ninguna manera era posible acceder a ellos, sin con ello, atentar contra la seguridad propia y de los visitantes y cuidadores de la zona arqueológica.

La creación del MDS, así como del ortomosaico generado a partir de imágenes tomadas por el VANT fueron de gran utilidad y la base para este trabajo. El ortomosaico de alta resolución (sin puntos de control) permitió localizar elementos arqueológicos, así como las ubicaciones de bloques depositados y sus características manera precisa, también fue más sencillo presentar los resultados con la base cartográfica.

El MDS de alta resolución derivado del procesamiento de las fotografías aéreas adquiridas por el VANT, fue utilizado para cada uno de los tres programas seleccionados. Los MDE disponibles (por INEGI, SRTM, GMRT y Alos PALSAR, no se acercan a la resolución del MDS obtenido), las pendientes que son fundamentales para este trabajo varían significativamente al pasar de 40° y 50° en la base topográfica de resolución de 15 m de INEGI, respecto a los 80° del MDS generado a partir de las fotografías tomadas por el VANT. Al utilizar un MDS un factor de gran importancia al momento de realizar las simulaciones es la cantidad de vegetación que se incluye en el modelo que puede modificar de gran manera los resultados. A pesar de que fue posible eliminar la vegetación el resultado fue un relieve ligeramente suavizado lo cual puede causar problemas de sobreestimación de alcance en los simuladores utilizados. Por ello se consideró más conveniente solo retirar la vegetación de mayor tamaño y dejar la menor, a pesar que los troncos de los árboles de gran tamaño pueden ser uno de los retardantes más importantes en la caída de bloques, las copas modifican demasiado el MDS ya que su área es mucho mayor que un tranco, esto se tomó a consideración por el programa RAMMS::Rockfall, el cual permite introducir una capa de vegetación en formato vectorial, sin embargo no se utilizó ya que los árboles de un tamaño considerables son pocos y se encuentran dispersos (70m o más entre cada árbol).

Las primeras dos simulaciones fueron hechas con programas basados en métodos empíricos y basados en procesos. Los resultados fueron imprecisos, una de las mayores razones por las cuales esto sucediendo fue que ambos programas, tanto *Flow-R* como *Rocfall*, están diseñados para otros múltiples procesos a pesar de que tiene ajustes enfocados en evaluar la caída de bloques.

Flow-R fue diseñado para el tratamiento de flujos, avalanchas y derrumbes. Aunque los desarrolladores aseguran que se puede usar para la caída de bloques, al modificar ciertos parámetros, los resultados obtenidos se aproximan más a los que se esperaríamos para un fenómeno canalizado o asistido por agua a manera de una corriente concentrada. Esto se vuelve evidente cuando sin importar las dimensiones del bloque, la trayectoria simulada conserva su camino. En el caso de la caída de bloques el tamaño y las características de intrínsecas de la roca (peso), pueden causar que las condiciones físicas del terreno se conviertan invariantes y afecten en menor medida su trayectoria

Sin embargo, algunas *Flow-R* tiene también sus virtudes; es el único software que no requiere forzosamente datos previos colectados en campo, solo necesita un MDE a partir del cual puede generar resultados. Uno de los resultados más relevantes obtenido por *Flow-R*, fue la delimitación de la zona de origen de caídas, de forma automatizada. Otro punto a favor de *Flow-R* es que es de los tres softwares utilizados en este trabajo, es el único que se puede descargar de manera gratuita desde una liga de internet (<https://www.flow-r.org/>). Estas características convierten a *Flow-R* en un software a considerar en cualquier estudio de este tipo como una herramienta de apoyo rápida y de evaluación en tiempo real (aunque la resolución del MDE determinará la calidad del resultado).

Rocfall está diseñado para simular caída de bloques, pero en taludes carreteros, los cuales tienen otras características debido a los procesos de construcción que son utilizados. Además de que las variaciones laterales en estos son mínimas. También es necesario generar un perfil a partir de un origen y un destino, esto pone gran parte del análisis a decisión del usuario y

no del fenómeno a evaluar. Por lo cual es necesario un estudio previo con la identificación de un bloque de origen, así como una trayectoria a partir de la cual generar un perfil.

Los resultados obtenidos nos permiten visualizar el comportamiento del bloque durante la caída y su interacción con diferentes tipos de superficie. La desventaja de este tipo de simulación es que en la naturaleza el fenómeno no es unidireccional, sino que presenta variaciones laterales, es decir el bloque no necesariamente seguirá una línea recta, ya que podría cambiar su trayectoria de acuerdo con diferentes valores de pendiente lo cual no genera una gran certidumbre de que el bloque se comporte de esa manera.

El resultado que se obtuvo a partir de 10 simulaciones fue que sólo un bloque de aproximadamente 100 toneladas podría impactar a la pirámide de Chalcatzingo. Sin embargo, en el resultado gráfico de las simulaciones es posible apreciar que el 100% de las simulaciones quedan dentro de la zona arqueológica lo cual representa un peligro (aunque es importante señalar que el usuario determina el camino, por lo que si decidimos que las 100 simulaciones se perfilen hacia la zona arqueológica no es de extrañar que se consiga un alto porcentaje de afectación). En este sentido, una variable que puede afectar considerablemente el avance y cantidad de rebotes de las simulaciones es el tipo de superficie por donde desciende el bloque. Es decir, que si coloca como parámetro inicial que toda la superficie por donde viaja el bloque sea rocas sin vegetación el 100% de las simulaciones afectaría a la pirámide.

RockFall de *RAMMS* es un programa enfocado exclusivamente a la caída de bloque por lo cual los elementos modificables, así como los resultados son los más adecuados para este trabajo. A pesar de ser un programa de paga, es

posible obtenerlo con una licencia de prueba o con una licencia completa si es para un trabajo académico (como este caso), lo cual lo convierte en un programa de excelente calidad que está al alcance de cualquier especialista.

Dentro de los parámetros básicos, tal vez la densidad de la roca es la más importante. Con ella fue posible generar 18 modelos únicos para cada bloque de acuerdo con las medidas más aproximadas a la realidad. También fue posible crear tres zonas con superficies de diferentes durezas lo cual aproxima el estudio a simular el fenómeno de manera más precisa. Dentro de las opciones que permite modificar este programa se encuentra la de crear una capa de vegetación, pero dado que no fue eliminada del todo la vegetación de nuestro MDS, esta opción no fue utilizada para las simulaciones.

Con las simulaciones obtenidas en conjunto con el ortomosaico y la ubicación de los elementos de la zona arqueológica se puede apreciar como la gran mayoría de las trayectorias de los bloques que descienden del Cerro Gordo, afectan tanto a los bajarrelieves, como a una de las estructuras arqueológicas cercanas.

Estos resultados se deben a una mezcla de factores: la cercanía de los puntos de origen de los desprendimientos con los bajarrelieves y algunas estructuras; las pendientes muy pronunciadas que le imprimen una alta energía cinética al inicio del desprendimiento, la corta franja de vegetación que no cumple en plena forma como zona de amortiguamiento y el hecho de que los bajarrelieves se encuentran en la zona de dureza intermedia.

Con los datos obtenidos de las simulaciones generadas por los tres programas es posible decir categóricamente que es poco probable que un

bloque logró afectar a la pirámide. Sin embargo, el resto de los elementos de la zona arqueológica, principalmente los bajorrelieves próximos al Domo de Cerro Gordo, así como las estructura a menos de 200 m de la pared vertical se encuentran en una zona de alto peligro por caída de bloques. Las únicas opciones de afectación por efecto de caída de bloques son dos: Primera, que el bloque se desprenda del domo degradado entre los cerros Gordo y Delgado, esto se propone, debido a que con el simulador Flow-R, muestra un potencial de zona generadora en este lomerío. En contra se puede argumentar que la diferencia altitudinal y la inclinación entre la pirámide y el montículo no permiten tener la suficiente energía cinética y que el movimiento tentativo del bloque sería por rodadura lo que hace difícil que recorra una distancia mayor a los 250 m, necesarios para impactar a la pirámide. Segundo, que los bloques se desprendan del escarpe que alimenta a los abanicos coluviales recientes. Esta segunda propuesta también tiene inconvenientes, como que el límite de los abanicos no alcanza las estructuras arqueológicas cercanas a la pirámide y que el bloque debería viajar una distancia mayor a los 300 m, camino que de acuerdo con las simulaciones obtenidas se ve difícil de lograr.

Un aspecto que vale la pena resaltar es la cantidad y tipo de vegetación en el pie del escarpe. Esta variable puede mitigar lo suficiente la distancia recorrida de bloques de dimensiones considerables. Por último, es importante mencionar que muchos bloques que se encuentran directamente en la zona de depósito no fueron tomados en cuenta para este estudio debido a que por su tamaño (menor a 30cm) no representaban un potencial peligro para las estructuras, sin embargo, sí lo son para los visitantes.

VI. Conclusiones

El uso de programas de simulación de caída de rocas es una importante herramienta para determinar zonas propensas a ser afectadas por este proceso de remoción en masa. Realizar este tipo de análisis en zonas de alto valor económico, social y cultural debe ser una pieza fundamental por considerar en los proyectos de manejo y aprovechamiento de recursos de México.

La generación de productos ortorectificados a partir de un VANT resulto indispensable para la evaluación a distancia de sitios peligrosos o de difícil acceso. El uso del VANT no solo permitió tener el mapa base para llevar a cabo las simulaciones, sino que también aportó la información para extraer los hipotéticos puntos de origen de los desprendimientos y las características volumétricas de cada uno de los bloques seleccionados. Aunque para la obtención del mapa base se puede usar otro tipo de datos (ASCII, Grid entre otros), la resolución que permiten estos aparatos rebasa por mucho las fuentes de información oficiales. Los modelos en tres dimensiones de las paredes permitieron identificar y localizar los bloques, junto con sus características morfométricas y evidencias de su posible desprendimiento.

Ninguno de los programas utilizados es suficiente por sí mismo para tener una excelente caracterización del fenómeno de caídas. Aunque uno de los tres muestre mejores cualidades, la precisión y nivel de análisis siempre se verá beneficiada por la toma de datos y evaluación de las condiciones en campo.

RAMMS RockFall es el programa que permite introducir la mayor cantidad de variables, lo cual, lo convierte en el más completo y preciso para realizar una simulación de caída de bloques. Para el correcto análisis de los resultados, es

esencial el poder visualizar e introducir datos en tridimensionales en el simulador. Es necesario utilizar las características del terreno como las del bloque en particular. Estos factores hacen que las simulaciones con base en un SIG sean las más eficientes al momento de evaluar el potencial peligro.

Por último, el análisis de bloques en situación de desprendimiento en las paredes el día de hoy, muestra que ninguno de los bloques lograría afectar a la pirámide de Chalcatzingo. Sin embargo, el resto de las estructuras de la zona arqueológica se encuentra vulnerable a ser afectada al gado de que muchos de los bajorrelieves se encuentran en los caminos que pueden tomar los bloques. Con el fin de no colocar alguna red de captación de bloques, malla o geotextil a lo largo de la pared del Cerro Gordo (que debería cubrir un área $> 10,000 \text{ m}^2$), se recomienda incrementar la densidad de vegetación arbustiva entre los sitios de interés arqueológico y la pared, así como restringir el paso por los caminos localizados justo al pie del escarpe. Esto porque los simuladores mostraron que la vegetación puede ser el mejor mitigante para este tipo de peligros, especialmente en una zona como la de Chalcatzingo.

Referencias

- Agisoft LLC., 2016. Agisoft Photoscan User Manual. Professional Edition, V.1.5.1.
- Agisoft, 2020. Agisoft Metashape User Manual. *Agisoft Metashape*, (September), 160. Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf
- Alcántara, I., 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas* 41: 7-25.
- Arpin, B., Arndt, B., 2016. Comparison of 2D and 3D rockfall modeling for rockfall mitigation design. In 67th Highway Geology Symposium. The proceedings of the Highway Geology Symposium. 307-321.
- Badoux, A., Andres, N., Techel, F., Hegg, C., 2016. Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards Earth System Sciences* 16: 2747-2768.
- Bartelt, P., Bieler, C., Bühler, Y., Christen, M., Drier, L., Gerber, W., Glover, J., Scheider, M., Glocker, C., Leine, R., Schweizer, A., 2015. RAMMS:: ROCKFALL user manual, v1.6. WSL Institute for Snow and Avalanche Research.
- Bierman, P.R., Montgomery, D.R., 2014. Key concepts in geomorphology. New York, USA: Freeman and Company Publishers, 494 pp.
- Blake, S., 1990. Viscoplastic models of lava domes. In Fink, J.H. (Ed.), *Lava flows and domes. Emplacement mechanisms and hazardous implications*. Springer-Verlag, Berlin. 88-126.
- Brideau, M.-A., Roberts, N.J., 2015. Mass movement un bedrock. In: Davies, T., (Volume Ed.) *Landslide Hazards, Risks, and Disasters*. Hazards and Disasters series. Netherland: Elsevier, 43-90.
- Bühler, Y., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., 2016. Significance of digital elevation model resolution for numerical rockfall simulations. In: *Proceeding of the 3rd International Symposium Rock Slope Stability C2ROP*, Lyoon, France (pp. 15-17).
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Zamorano-Orózcó, J.J., 2006. La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 205–214. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a3>
- Carlos-Valerio, V., García Palomo, A., López Miguel, C., Galván García, A. H., 2007. Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo couleé: cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2), 183–201. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n2a4>
- Cavaziel, A., Lu, G., Demmel, S.E., Ringenbach, A., Bühler, Y., Christen, M., Bartelt, P., 2019. RAMMS:: ROCKFALL- a modern 3-dimensional simulation tool calibrated on real world data. In 53rd US Rock Mechanics/Geomechanis Symposium. American rock Mechanics Association.
- Chapman, R.E., 1995. *Physics for geologists*. London, UK: University College London Press, 143 pp.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C., Liu, J., Lee, C.F., 2003. Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on

- rockfall inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(5): 383-408.
- Córdova, M., Meza, C., Espinosa, O., Doering, T., Collins, L., 2015. Una aproximación a los relieves de Chalcatzingo: el escaneo láser 3D. *University of South Florida Scholar Commons*, 1(1), 39.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Shuster, R.L. (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special report 247, 36-75.
- Dikau, R., 1996. *Landslide recognition: identification, movement, and causes*. New York. Wiley: International Association of Geomorphologists (No. 1), 274 pp.
- DJI, 2017. *Manual de Usuario (V2.0) Mavic Pro*.
- Dorren, L. K. A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K., & Lambert, C., 2017. Rock Mechanics & Mining Sciences Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98(February), 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.07.013>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522-523. 122-149.
- Filpello, A., Mandrone, G., 2013. A ready to use GRASS GIS workbench for rockfall analysis. In Martgotini C., et al., (Editors). *Landslide Science and Practice*, Vol. 3. 231-238.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., 2017. Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de perote volcano, Mexico. *Geomorphology* 290: 142-152.
- Gómez-Tuena, A., Mori, L., Rincón-Herrera, N.E., Ortega-Gutiérrez, F., Solé, J., & Iriondo, A., 2008. The origin of a primitive trondhjemite from the Trans-Mexican Volcanic Belt and its implications for the construction of a modern continental arc. *Geology*, 36(6), 471–474. <https://doi.org/10.1130/G24687A.1>
- Gómez-Vasconcelos, M.G., Garduño-Monroy, V.H., Macías, J.L., Layer, P.W., Benowitz, J.A., 2015. The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.
- Goudie, A.S., 2004. *Encyclopedia of Geomorphology*. Vol 1 y 2, Routledge Taylor & Francis Group: NY. 1156 pp.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers Geosciences* 28(9): 1079-1093.
- Highland, L., & Bobrowsky, P., 2008. *Introduction The Landslide Handbook-A Guide to Understanding Landslides*. Retrieved from <http://landslides.usgs.gov/>
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V.M. Munguía-Orozco, L., Meillón-Menchaca, O., 2011. El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva,

- Chiapas, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 63, Núm. 1, 15-38.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., & Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 869–885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Huggett, R., 2007. *Fundamentals of Geomorphology*. New York, USA: Routledge, 458 pp.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. Varnes classification of landslide types and update. *Landslides* 11: 167-194.
- Illescas Salinas, J. F., & Buitrago Sandoval, G., 2010. Chalcatzingo, México: donde las piedras hablan. *Intervención Revista Internacional de Conservación Restauración y Museología*, 1(1), 43–53. <https://doi.org/10.30763/intervencion.2015.11.134>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2016, Carta topográfica. E14B61b y E14B61c, escala 1:20,000: México.
- Keefer, D.K., Wartman, J., Navarro Ochoa, C., Rodriguez-Marek, A., Wieczorek, G.F., 2006. Landslide caused by the M 7.6 Tecomán, Mexico earthquake of January 21, 2003. *Engineering Geology* 86, 183-197.
- Lan, H., Derek Martin, C., & Lim, C. H., 2007. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers and Geosciences*, 33(2), 262–279. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013>
- Lari, S., Crosta, G.B., Frattini, P., Horton, P., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall and debris flow societal and economic risk assessment at the regional scale. Acts 100th World Water Day, Accademia Nazionale del Lincei, Rome, 22 March 2010. *Atti dei Convegni Lincei*, 262: 179-187.
- Larsen, S.H., Davies, T.R.H., McSaveney, M.J., 2005. A possible coseismic landslide origin of late Holocene moraines of the Southern Alps, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics* 48: 311-314.
- Leine, R.I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., Geber, W., 2014. Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody Systems Dynamics* 32: 241-271.
- Li, L., Lan, H., 2015. Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74(4): 1163-1176.
- Li W.-I., Huang, R., Xu, Q., Tang, Ch., 2013. Rapid susceptibility mapping of co-seismic landslide triggered by the 2013 Lushan earthquake using the regression model development for the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Mountain Science* 10(5): 699-715.
- Lugo Hubp, J., 2011. *Diccionario geomorfológico*. Instituto de Geografía, UNAM, México. 479 pp.
- Luna, S., (5 agosto 2020). Cae roca sobre dos casas en Xochimilco. *REFORMA*.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E., 2005. The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>
- Michoud, C., Derron, M.-H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Bailidard, F.-J., Loye, A., Nicolet, P.,

- Pedrazzini, A., Queyrel, A., 2012. Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12: 615-629.
- Migón, P., 2006. Granite landscapes of the World. Oxford University Press: UK. 384 pp.
- Montgomery, J., Candia, G., Lemnitzer, A., Martínez, A., 2020. The september 19, 2017, Mw 7.1 Puebla-Mexico city earthquake: Observed rockfall and landslide activity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 130, 105972.
- Morales Méndez, D., 2018. *Evaluación del método multi-criterio para la zonificación de deslizamientos: Huehuetla, Puebla y Metztlán, Hidalgo*. Tesis de licenciatura, UNAM, México. 166 pp.
- Mori Borrini, L. 2007. *Origen del magmatismo miocénico en el sector central de la FVTM y sus implicaciones en la evolución del sistema de subducción mexicano*. Tesis de doctorado, UNAM, México. 130 pp.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Gómez-Tuena, A., Mori, L., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., Solari, L.A., 2012. Petrology of high-grade crustal xenoliths in the Chalcatzingo Miocene subvolcanic field, southern Mexico: buried basement of the Guerrero-Morelos platform and tectonostratigraphic implications. *International Geology Review*, 54, 1597-1634.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Dávalos-Elizondo, M.G., 2008. On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans-Mexican Volcanic Belt and its fore-arc region, southern and central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(2), 346-364.
- Pedraza Gilsanz, J., 1996. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid, España: Ed. Rueda, 414 pp.
- Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., Loye, A., Derron, M.-H., 2013. From deep seated slope deformation to rock avalanche: Destabilization and transportation models of the Sierre landslide (Switzerland). *Tectonophysics*, 605: 149-168.
- Pfeiffer, T.J., Bowen, T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 26(1): 135-146.
- Perret, S., Dolf, F., Kienholz, H., 2004. Rockfalls into forests: analysis and simulation of rockfall trajectories - considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. *Landslides* 1(2): 123-130.
- Ramírez Salazar, A., 2018. *Petrología, geoquímica, isotopía y geocronología de los xenolitos de Chalcatzingo, Morelos y el picacho de Pepechuca, Estado de México*. Tesis de Maestría, UNAM, México. 138 pp.
- RAMMS Simulation, R.-N.R.M.M., 2019. rocaRockfall Experiment Schraubachtobel EOTA(221)/(111) 800 kg. Retrieved January 23, 2021, from <https://www.youtube.com/watch?v=hKYW47LV3V8>
- Rincón-Herrera, N., Gómez-Tuena, A., Mori, L., Ortega-Gutiérrez, F., 2007. Rhyolite genesis by slab melting and mantle interaction: an example from the Trans-Mexican Volcanic Belt. *American Geophysical Union Joint Assembly, Acapulco, Mexico*. Abstract V53B-03.
- Rivera, E., De la Teja segura, M.A., Miranda, A.H., Lemus, O.B., Motolinea, O.G., Leon, V.A., Moctezuma, M.D.S., 1998. Carta geológica-minera Cuernavaca E14-5: Pachuca, Hidalgo.

Consejo de Recursos Minerales, escala 1:250,000, México.

RocScience, 2004. Rocfall Manual, Rocscience Inc. Toronto.

Salinas-Jasso, J.A., Montalvo-Arrieta, J.C., Reinoso-Angulo, E., 2018. Landslide induced by a low magnitude seismic sequence at continental interiors: a case study of the Santa Rosa Canyon, northeastern Mexico. *Landslide* 15: 783-795.

Saroglou, C., Asteriou, P., Zekkos, D., Tsiambaos, G., Clark, M., & Manousakis, J., 2018. UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic rockfall in Lefkada island, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 321–333. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-321-2018>

Siebe, C., Salinas, S., Arana-Salinas, L., Macías, J.L., Garner, J., Bonasia, R., 2017. The ~23,500 y ¹⁴C BP White pumice plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333-334, 66-95.

Solís-Castillo, B., Mendoza, M.E., Vázquez Castro, G., Bocco, G., 2019. Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacán México. *Physical Geography*, DOI: 10.1080/02723646.2019.1574136

Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez-Selem, L., Franco-Ramos, O., Palacios, D., 2011. Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccíhuatl volcano, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 1209-1217.

Twindale, C.R., 1982. Granite landforms. Elsevier Scientific Publishing Company: Amsterdam. 372 pp.

Van Dijke, J.J., Van Westen, C.J., 1990. Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS. *ITC Journal* 1, 40-44.

Vázquez-Duarte, A., Böhnell, H., Yutsi, V., 2009. Paleomagnetism of Miocene rocks around Chalcatzingo, Morelos, Mexico: A reevaluation. American Geophysical Union, Spring Meeting 2009, abstract id. GP71A-08.

Vázquez Duarte, A., Böhnell, H., Yutsis, V., 2015. Paleomagnetism of the Miocene Jantetelco granodiorites and Tepexco Volcanic group and inferences for crustal block rotations in central Mexico-Reevaluation. *Tectonophysics* 658: 117-217.

Vo, D.T., 2015. *RAMMS:: Rockfall versus Rockyfor3D in rockfall trajectory simulations at the Community of Vik, Norway*. University of Oslo.

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection - A review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2617–2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>

Žabota, B., Repe, B., & Kobal, M., 2019. Geomorphology influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling. *Geomorphology*, 328, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.029>

Anexo

A) Tabal de densidad Datos para el cálculo de densidad con fotografías de las muestras utilizadas Cha01a y Cha01b pertenecen al cerro delgado, Cha02 pertenece al cerro gordo al igual que Cha03a y Cha03b pero se encuentran alteradas.

Muestra	Masa (g)	Volumen de agua desplazado (cm³)	Densidad (g/cm³)	Foto
Cha01a	6	3	2	
Cha01b	3	1.5	2	
Cha02	5	2.5	2	
Cha03a	5	2.5	2	
Cha03b	4	2	2	

B) Ficha descriptiva de la muestra de mano recogida en campo con sus características de textura y su mineralogía

R



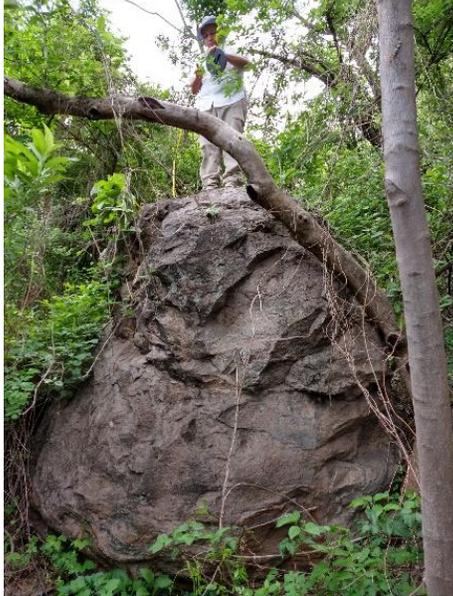
Riodacita y riolita (67.5-71.9% de acuerdo con Ramírez Salazar, 2018)

Descripción macroscópica: Roca leucocrática o félsica de matriz vítrea de color rosa, beige a gris, de textura hipocrystalina de grano grueso (>5 mm) a medio (1-5 mm), con un estimado de >50% de fenocristales.

Arreglo mineral: Qz+Plg+FeldK+Px+Biot+San. Fenocristales y microfenocristales de cuarzo y plagioclasas de hasta 2 cm de tamaño, euédrales con un dominio

de tamaños de 3 mm. Las plagioclasas forman conjuntos de cristales (clot) de crecimiento radial (cristales en la esquina inferior derecha de la foto superior). Siguen los feldespatos potásicos dentro de una matriz rosa, con tamaños de hasta 4 mm, con un predominio de 2 mm, posiblemente de ortoclasa, así como sanidinos, siendo estos de menor tamaño. Los minerales ferromagnesianos son de piroxenos de tamaños de hasta 2 mm, de color verde oscuro, forma euhedral. También contiene trazas de biotitas euhedrales de hasta 2 mm de tamaño. La matriz vítrea, junto con las plagioclasas y biotitas muestran evidencias de alteración hidrotermal (también reportada por Ramírez Salazar, 2018).

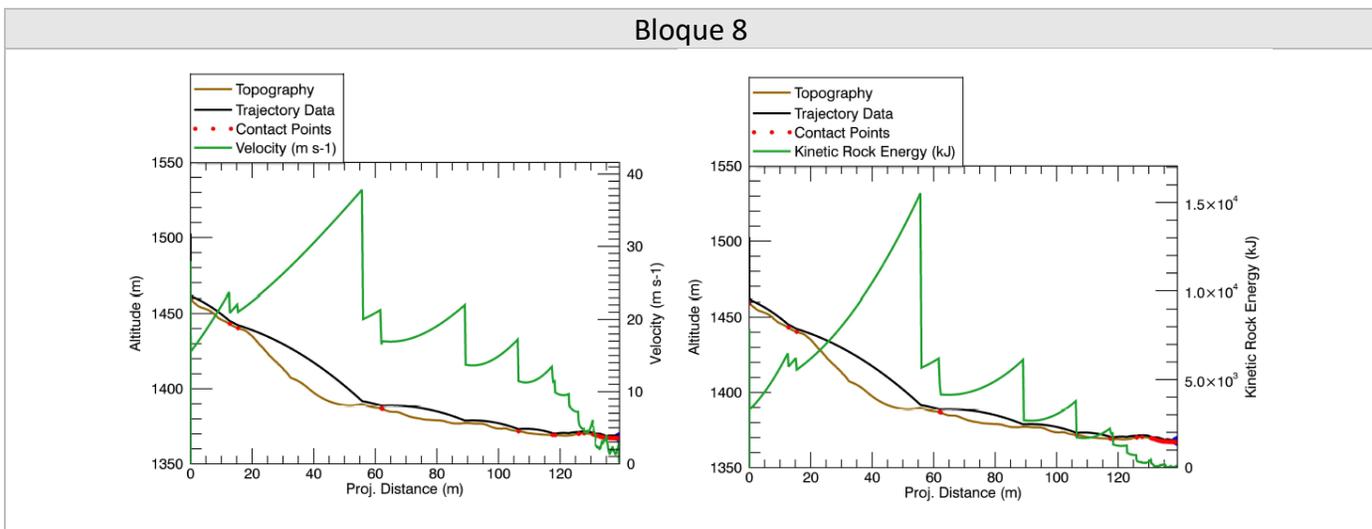
C) Registro fotográfico de los bloques descritos.

Bloque 1	Bloque 2
Coordenadas: 14Q 524339 , 2065315 Altura: 1398	Coordenadas: 14Q 524346, 2065307 Altura: 1385
X: 5.64m Y: 3.29m Z: 2.90m Alargado	X: 2.29m Y: 1.04m Z: 0.75m
	
Bloque 3	Bloque 4
Coordenadas: 14Q 524328, 2065322 Altura: 1385	Coordenadas: 14Q 524329, 2065316 Altura: 1386
X: 3.00m Y: 2.90m Z: 2.10m	X: 5.14m Y: 3.00m Z: 4.20m
	

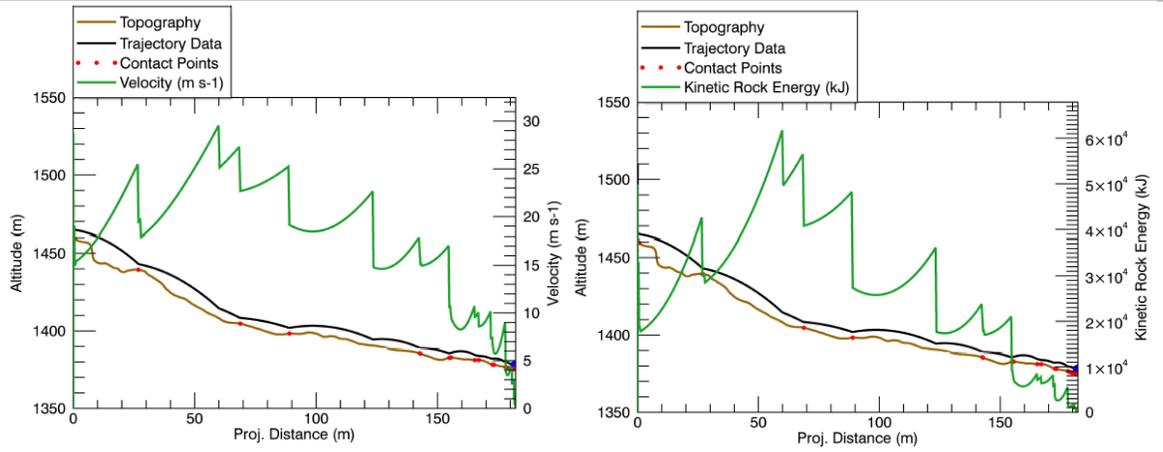
<p align="center">Bloque 5</p>	<p align="center">Bloque 6</p>
<p align="center">Coordenadas: 14Q 524325, 2065317 Altura: 1383</p>	<p align="center">Coordenadas: 14Q 524310, 2065322 Altura: 1374</p>
<p>X: 10.80m Y: 6.30m Z: 5.48m</p>	<p>X: 1.48m Y: 1.20m Z: 0.40m Parcialmente enterrado</p>
	
<p align="center">Bloque 7</p>	<p align="center">Bloque 8</p>
<p align="center">Coordenadas: 14Q 524310, 2065322 Altura: 1374</p>	<p align="center">Coordenadas: 14Q 524310, 2065321 Altura: 1375</p>
<p>X: 0.88m Y: 0.80m Z: 0.35m Parcialmente enterrado</p>	<p>X: 2.20m Y: 1.87m Z: 0.60m</p>
	

Bloque 9			
Coordenadas: 14Q 524292, 2065331		Altura:1374	
X: 2.80m	Y: 1.70m	Z: 0.70m	Parcialmente enterrado
			

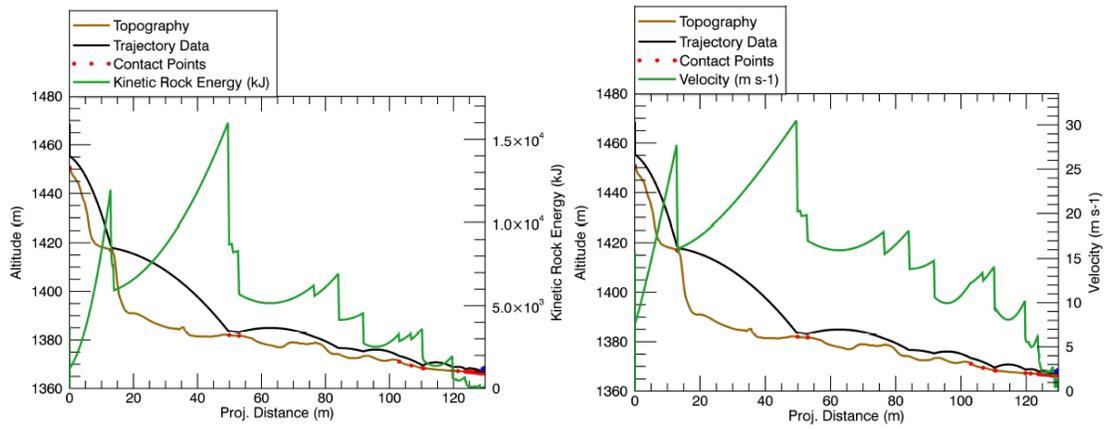
D) Graficas de velocidad y energía cinética, respecto a la distancia y altura, también se muestra la topografía y la trayectoria de los bloques, pertenecientes a los bloques del Cerro Gordo



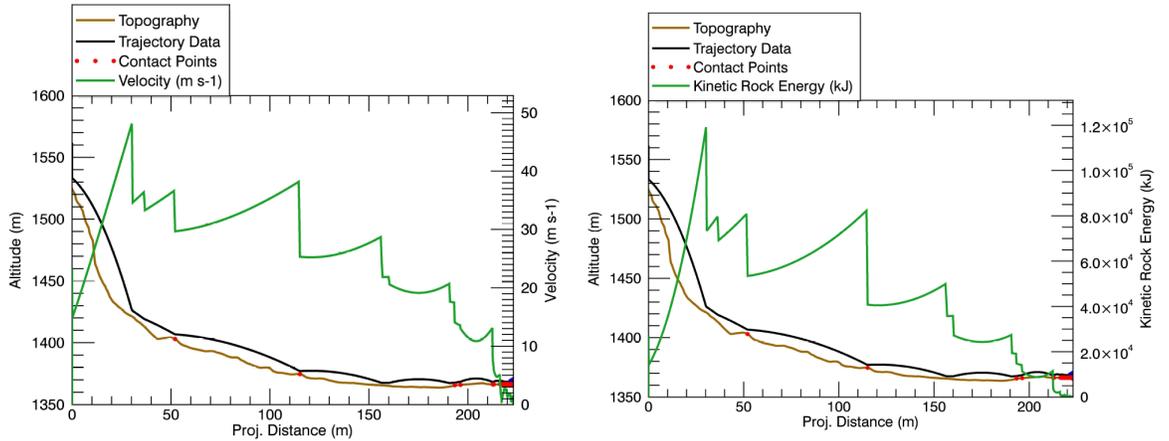
Bloque 9



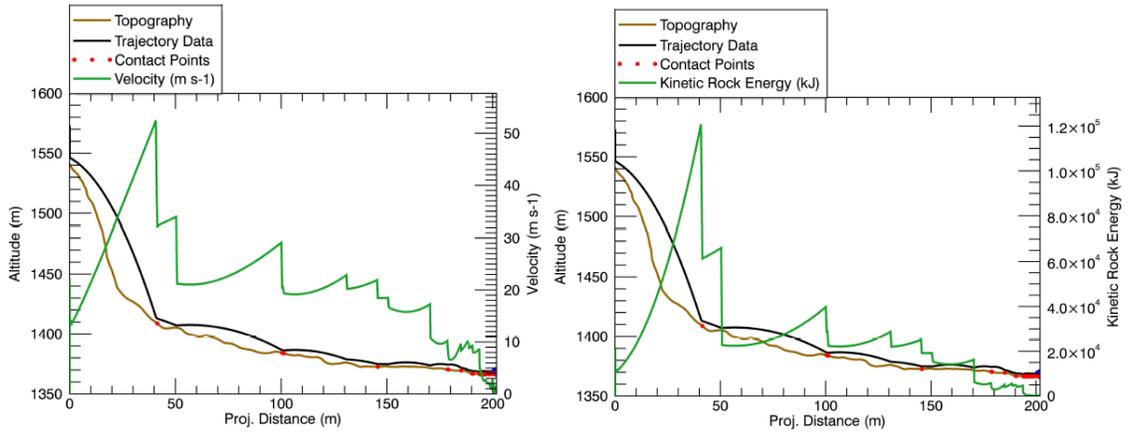
Bloque 10



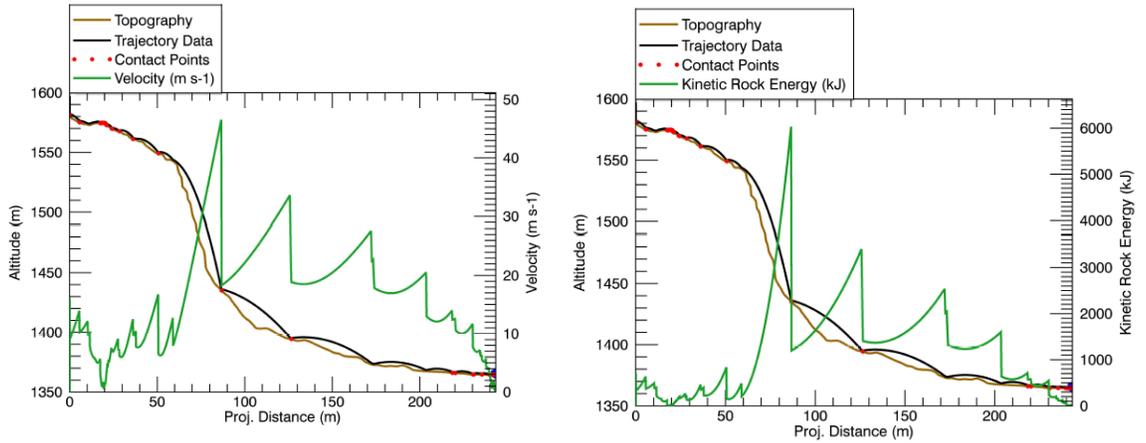
Bloque 11



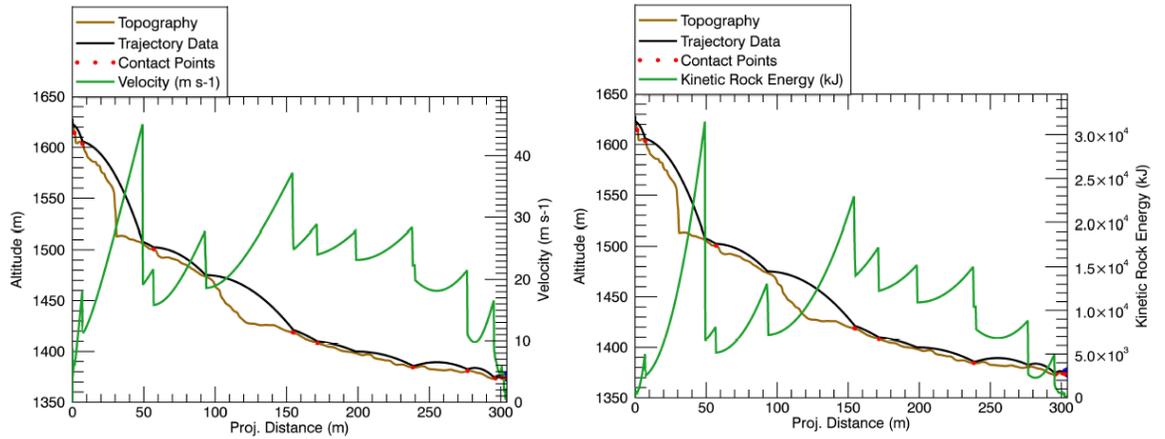
Bloque 12



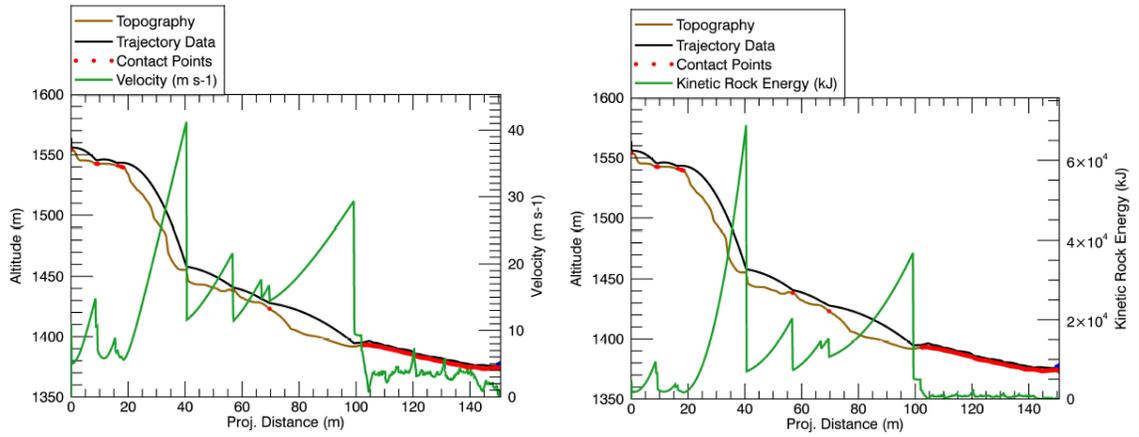
Bloque 13



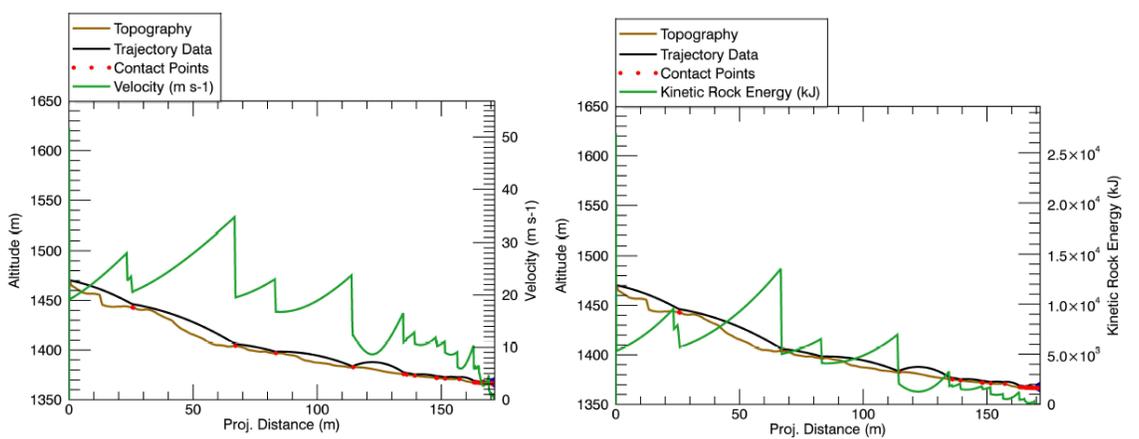
Bloque 14



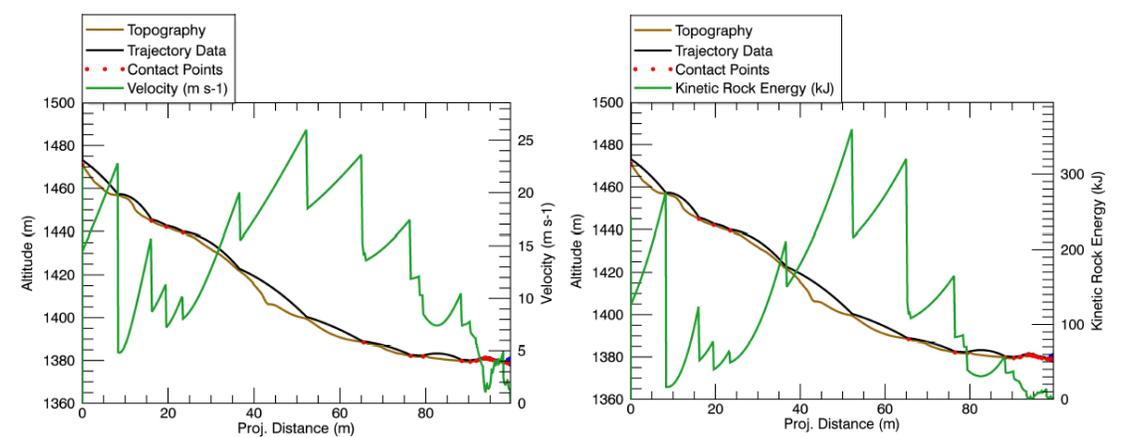
Bloque 15



Bloque 16



Bloque 17



Bloque 18

