

# EXPLORACIÓN GEOLÓGICA-GEOFÍSICA Y EVALUACIÓN DE UN DEPÓSITO DE PUZOLANA: GEOLOGÍA DE CAMPO, MODELADO Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS

Abstrac ID 304

## GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL EXPLORATION AND EVALUATION OF PUZOLANA DEPOSITS: FIELDWORK, MODELLING, AND RESOURCE ESTIMATION

Jaime Requena<sup>1</sup>, Alejandro Cacao<sup>1</sup>, Petr Blaha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Cementos Progreso, S.A.

<sup>2</sup>apbp consulting

Email: [jrequena@cempro.com](mailto:jrequena@cempro.com) ; [acacao@cempro.com](mailto:acacao@cempro.com) ; [petr.blaha@apbp.ch](mailto:petr.blaha@apbp.ch)

### RESUMEN

La puzolana es esencial para la industria del cemento debido a su habilidad para reemplazar el clinker en el cemento. Esta no sólo reduce el costo de la producción de cemento, sino también contribuye significativamente en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y de la huella de carbono global del concreto.

Este estudio representa una exploración y evaluación exhaustivas de un depósito de puzolana útil para fabricación de cemento. La investigación incluyó trabajo de campo geológico, estudios geofísicos, análisis de laboratorio, modelado geológico y el cálculo de modelo de bloques para estimar los recursos y reservas de puzolana. Los resultados indican reservas significativas de puzolana, lo que sugiere un alto potencial para la explotación comercial. Este artículo discute los métodos utilizados y las implicaciones de los resultados para futura optimización de actividades de exploración y explotación de las reservas.

Palabras clave: geología de campo, geofísica, modelo de bloques, estimación de recursos.

### ABSTRACT

Pozzolana is essential to the cement industry due to its ability to replace clinker in cement. This not only reduces the cost of cement production, but also makes a significant contribution to CO<sub>2</sub> emissions and the overall carbon footprint of concrete.

This study represents a comprehensive exploration and evaluation of a pozzolana deposit. The investigation included geological fieldwork, geophysical surveys, geological modelling and the calculation of a block model to estimate pozzolana resources. The results indicate significant pozzolana reserves, suggesting a high potential for commercial exploitation. This paper discusses the methods used and the implications of the results for future exploration and mining activities.

Key words: Pozzolana, geological fieldwork, geophysics, geological modelling, block model, resource estimation.

## Introducción

Las puzolanas evaluadas son cenizas volcánicas que, cuando se combinan con cal y agua, forman cementos hidráulicos. Se utilizan en la industria del cemento como adiciones para mejorar ciertas propiedades del concreto. Estos materiales puzolánicos se utilizan para reducir la cantidad de clinker de cemento Portland necesario en la mezcla, lo que reduce la cantidad de energía necesaria para producir el cemento y, por lo tanto, su impacto ambiental y de reducción de CO<sub>2</sub>. Además, el cemento puzolánico es resistente a los sulfatos y al agua de mar, lo que lo hace adecuado para su uso en estructuras expuestas a estas condiciones.

Afortunadamente Guatemala se sitúa sobre el arco volcánico de Centroamérica y uno de los productos más comunes son las cenizas volcánicas con fuerte potencial de uso como fuente de puzolana. Por lo anterior, se hace necesario conocer la distribución espacial de las cenizas volcánicas, sus condiciones geológicas y la caracterización de los depósitos. La evaluación de los depósitos puede conducir a mejorar su explotación y al manejo eficiente de sus recursos.

El objeto principal de este estudio es evaluar un depósito de puzolana a través de estudios geológicos detallados, investigación geofísica, análisis de laboratorio, seguidas por el modelado geológico y la estimación de recursos a través de un software computacional. La metodología utilizada incluye: topografía de alta resolución con empleo de drone, mapeo geológico con escala detallada, levantamiento geofísico empleando sismica de reflexión, perforación con recuperación de núcleo, análisis de laboratorio para pruebas químicas y físicas, modelado geológico 3D y construcción de

modelo de bloques computacional para estimar los recursos del depósito de puzolana.

### Ambiente geológico regional y local

Guatemala está constituida por fragmentos de las placas tectónicas de América del Norte, Caribe y Cocos. En la región central se localiza el límite de placas tectónicas de Norteamérica y Caribe, que localmente se conocen como bloques Maya y Chortís, situados al Norte y Sur, respectivamente. La zona de falla del Motagua ha sido utilizada clásicamente para mostrar este límite transformante. Por otro lado, al Sur del país convergen las placas Caribe y Cocos a lo largo de la fosa mesoamericana, produciendo el moderno arco volcánico de Centro América (CAVA, por sus siglas en inglés). Este escenario tectónico ha existido desde el Mioceno Temprano hasta la actualidad y ha producido grandes volúmenes de erupciones silícicas a lo largo del CAVA desde Guatemala hasta Costa Rica, a excepción de los depósitos piroclásticos silícicos de Honduras (Vogel, T. et al., 2006).

Actualmente, al primer escenario geotectónico limitado por fallas se denomina Zona de Sutura de Guatemala (Flores, k., et al, 2012) ya que para su formación ha requerido múltiples eventos tectónicos (subducción, acreción, colisión, obducción y exhumación) que se han podido observar en las múltiples edades metamórficas y en los patrones de presión/temperatura registrados en las rocas de alta presión/baja temperatura. Mientras que el segundo escenario geotectónico, el de subducción, es el responsable de crear el CAVA. La característica del vulcanismo silícico en Guatemala procede de la fusión de las rocas de basamento cristalino Paleozoicas o más antiguas del Bloque Chortís, de naturaleza continental (Vogel, T. et al., 2006). (Figura 1). La actividad volcánica y sus productos se

han documentado desde el Neógeno; sin embargo, la actividad del Cuaternario tiene una gran distribución en todo el país.

Durante el Pleistoceno la actividad volcánica depositó grandes volúmenes de pómez y ceniza silícica sobre y más allá del altiplano. Koch (1970); Koch & McLean (1974) y Rose et al. (1986) han reportado 26 capas de tefra (depósitos de caída), 4 depósitos de toba de flujo de ceniza (diamictones), 4 secuencias de sedimentos fluviales- lacustres y numerosas capas interestratificadas de paleosuelos. Un ejemplo notable de dispersión es la tefra- H o ceniza Los Chocoyos (LCY), cuyo patrón de dispersión cubre Centroamérica, México, el Pacífico Ecuatorial Oriental, el Caribe y el Golfo de México (Cisneros, A. et al., 2020). La tefra y el diamictón H constituyen un reconocido horizonte marcador cronoestratigráfico, útil para el desarrollo de trabajos de campo, Cisneros, A. et al., (2020) a través de una datación radioisotópica le atribuyeron 75 ka, y sus nuevas estimaciones de volumen calculan  $\sim 1220 \text{ km}^3$ , confirmando a LCY como la primera super erupción reconocida en Centroamérica.

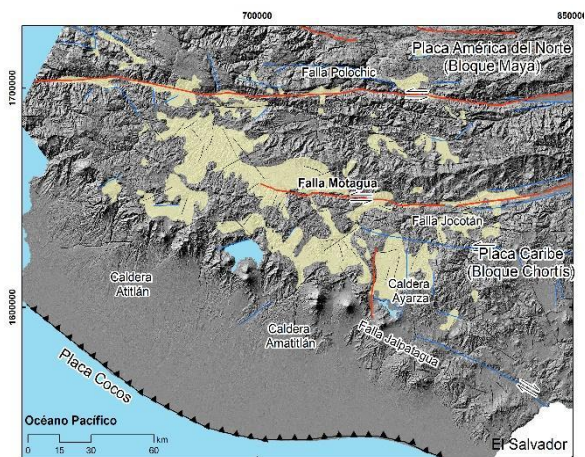


Figura 1. Escenario geotectónico de Guatemala y localización de cenizas volcánicas (mod. Koch AJ, Mclean H. 1975).

El escenario geológico local de interés está representado por rocas de naturaleza oceánica

(Complejo El Tambor -ETC) y continental (Valle de Ángeles -VdA y Cenizas volcánicas silíceas -TQv). El Complejo El Tambor constituye el basamento de la región que consiste en metabasaltos y metasedimentos, ocasionalmente con intrusiones félsicas, cuya edad Cretácica oscila desde 130 hasta 150 Ma (Flores, k., et al, 2012). Mientras que la Formación Valle de Ángeles (VdA) es una secuencia siliciclástica de capas rojas constituida por lutitas, areniscas y conglomerados del Cretácico-Paleógeno (Burkart, y otros, 1965; Lawrence, 1975). Sobreyaciendo de forma discordante, existe una cobertura de cenizas volcánicas silíceas del Cuaternario, posiblemente correlacionables con la Ceniza Los Chocoyos. Además, existen Aluviones Cuaternarios asociados con el drenaje efímero de la región. La Figura 2 muestra esta distribución estratigráfica de las unidades de roca de la región.

El interés de este trabajo estuvo orientado al estudio detallado de las cenizas volcánicas silíceas, con objeto de verificar su potencial como fuente de puzolana, y la estimación de los recursos/reservas del depósito.

El depósito está constituido por cenizas volcánicas de oleada y caída; principalmente ocurren fragmentos vesiculares juveniles y muy pocos líticos. Por el tamaño de los granos se clasifican en lapillis y cenizas. Separando los depósitos de flujos y caída, se observa una capa métrica de escorias, con fragmentos vesiculares, coloración oscura, de composición andesítica/basáltica. Una sección estratigráfica compuesta consta de 30 metros de espesor; en la base 9 metros de depósitos de oleada (estratificación oblicua, laminación planar), luego 1 metro de escorias y los 20 metros superiores están bien clasificados, sin estratificación interna, quizá producto de una sola erupción.

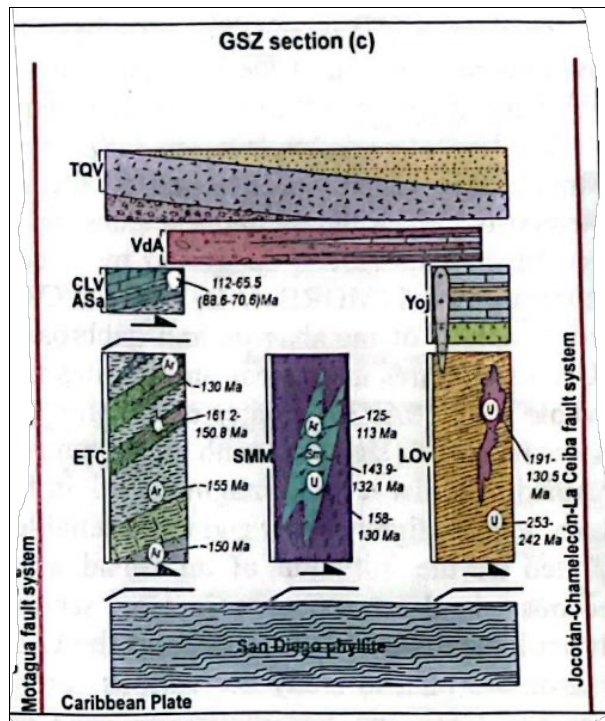


Figura 2. Escenario geológico-estratigráfico del área de estudio.

## Metodología

Para la evaluación del depósito de cenizas volcánicas silíceas, se desarrollaron varias etapas metodológicas: levantamientos (topográfico, geológico y geofísico), perforación a diamantina, análisis de laboratorio, construcción del modelo de bloques y estimación de recursos/reservas del depósito. La información generada en diferentes capas estuvo georreferenciada para permitir su análisis a través de un sistema de información geográfico (SIG).

**Levantamiento topográfico:** para obtener un mapa base y el detalle topográfico a escala 1:5,000 de la zona de estudio, se procedió a realizar un vuelo con dron para construir el modelo de elevación digital de alta resolución y obtener planimetría y altimetría al detalle requerido. Además, fue posible obtener la ortofoto del área, la cual muestra, el uso de suelo, accesos, cobertura vegetal, entre otras.

**Levantamiento geológico y construcción del modelo geológico del depósito:** la información anteriormente generada fue ingresada al SIG y luego a una tableta de campo. Con esta información base, se realizaron caminamientos recabando información geológica, estratigráfica, estructural y toma de muestras. La información recabada permitió la construcción del mapa geológico y del modelo geológico preliminar del depósito de cenizas volcánicas silíceas en 3D, utilizando el software Surpac®.

**Primera etapa de análisis fisicoquímicos:** las muestras de mano colectadas en campo y las procedentes de calicatas en cenizas volcánicas silíceas fueron analizadas por fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) a través de Panalytical Empyrean XRD y análisis físicos: actividad hidráulica.

**Levantamiento geofísico:** el levantamiento geofísico realizado incluyó la reflexión sísmica, empleando la técnica de microsismos en arreglo multicanal (MAM); distribuyendo los geófonos de forma lineal y en L. La adquisición involucró el diseño y levantamiento de datos a través de una cuadrícula que cubrió el depósito de interés. El procesamiento de los datos recabados se realizó a través de Seismodule Controller Software (SCS) y SeisImager PRO®. Los resultados geofísicos permitieron establecer marcadores en profundidad y trazar la superficie limitante entre el basamento y el depósito de puzolana. La ubicación de los sondeos de recuperación de núcleo y el metraje estimado de perforación fueron optimizados a través de esta superficie. Un ahorro significativo en los costos y tiempos de ejecución de perforación se reflejó en el presupuesto establecido para el proyecto.

El desarrollo de estas etapas permitió conocer la extensión areal del depósito y la estimación de su espesor, cuyos datos permitieron elaborar el modelo geológico (3D) preliminar. El potencial volumétrico fue conocido y los resultados fisicoquímicos permitieron sugerir el potencial y la optimización de las posteriores etapas de exploración.

#### Perforación, muestreo y análisis

La agrupación de la información generada a través del mapeo y modelado geológico y el levantamiento geofísico permitió la construcción de la grilla de perforación. Utilizando una perforadora hydracore 2000 para recuperación de núcleo, se taladraron 6,000 metros lineales en el sitio de interés. Las muestras recuperadas fueron compositadas y enviadas para análisis de FRX, DRX, espectrometría y actividad hidráulica.

Con la descripción geológica de los núcleos de perforación y los resultados de los análisis fisicoquímicos, una base de datos fue estructurada en Excel ®. Los resultados fisicoquímicos permitieron corroborar la sostenibilidad de los materiales como fuente de puzolana para la producción de cemento.

#### Modelado geológico

El modelo geológico 3D preliminar fue modificado y ajustado con los nuevos datos procedentes de la base de datos de perforación, geofísica y análisis de laboratorio, utilizando el software Surpac ®. DTM surface, geological data base, geostatistics, solids, pit design, road design, son las principales herramientas utilizadas durante el modelado geológico del depósito de puzolana.

El modelo final fue validado comparando los volúmenes de puzolana del modelo preliminar,

contra el conocimiento las observaciones de los marcadores geofísicos, los espesores de las unidades geológicas procedentes del registro geológico y de sus resultados fisicoquímicos. La calibración implicó ajustar los parámetros del modelo para que coincidieran estrechamente con los datos observados.

#### Cálculo del Modelo de Bloques

El modelo de bloques es el repositorio fundamental que describe el inventario de un depósito y ayuda en la estimación de recursos y reservas. También proporciona la base principal para la toma de decisiones estratégicas sobre el uso de materias primas (como la compra de terrenos, la selección de correctivos adecuados) y la planificación estratégica de la cantera.

Para calcular un modelo de bloques, el depósito se divide en un gran número de pequeños bloques, donde cada bloque representa una unidad de planificación o evaluación.

Con base en los datos de perforación y el modelo geológico, se asignan o estiman atributos relevantes (por ejemplo, propiedades químicas/físicas, codificación geológica) para cada bloque utilizando técnicas de interpolación basadas en principios geoestadísticos. Esto significa que se toma en cuenta la información geológica tal como la orientación de las unidades geológicas, fallas, etc.

En este estudio, se utilizó un tamaño de bloque de 10 x 10 x 2 m. Esto permite una evaluación detallada del depósito y la estimación de recursos y reservas. También permite la simulación de diferentes escenarios de explotación minera con diferentes alturas de banco. Estas simulaciones apoyan la

definición de la altura de banco óptima de la futura cantera.

No obstante, para la preparación de los planes de minado, se preparará el también llamado modelo operativo. La extensión horizontal del bloque deberá ser mayor (por ejemplo, 25 x 25 m) y la extensión vertical corresponderá al diseño del banco en la cantera.

Se utilizó kriging ordinario para la estimación de los óxidos, a saber,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$  y pérdida al fuego. Sus parámetros se definieron a partir de variogramas esféricos. Además, se añadieron al modelo algunos atributos adicionales relevantes para los materiales puzolánicos, como la suma ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Para el cálculo del modelo de bloques se utilizó el software SURPAC®. Para evaluaciones del depósito y sus visualizaciones se utilizó el software AthosGEO Blend®.

Las siguientes figuras muestran ejemplos típicos de cómo se visualiza el modelo de bloques: vista en planta (Figura 4) y secciones transversales en una vista 3D (Figura 5).

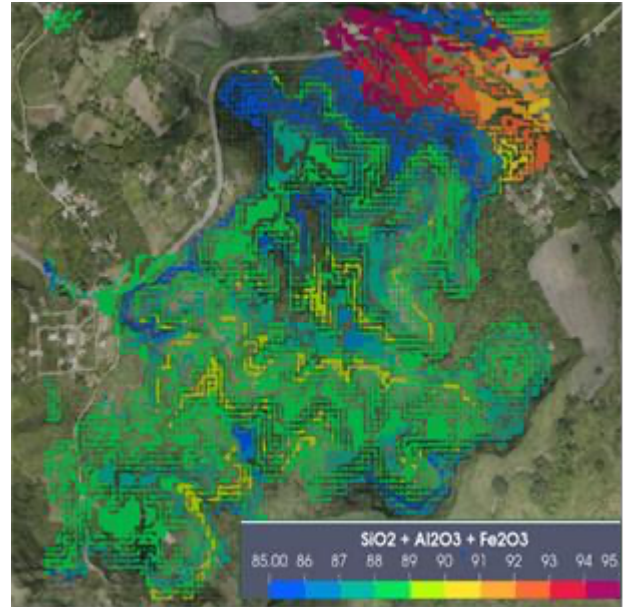


Figura 3. Atributos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ): Vista en planta.

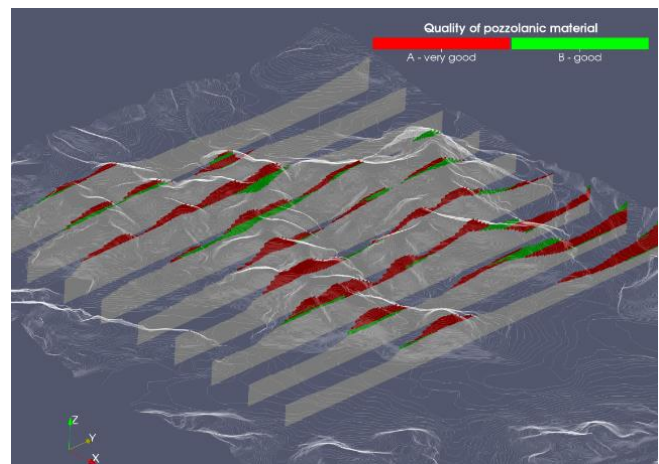


Figura 4. Atributos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ): vista 3D (vista desde el sureste).

Con base en el contenido químico, la puzolana en los depósitos se clasificó en dos categorías: A – de muy buena calidad y B – de buena calidad – ver Figura 5 y Figura 6



Figura 5. Calidad de material puzolánico: vista en planta.

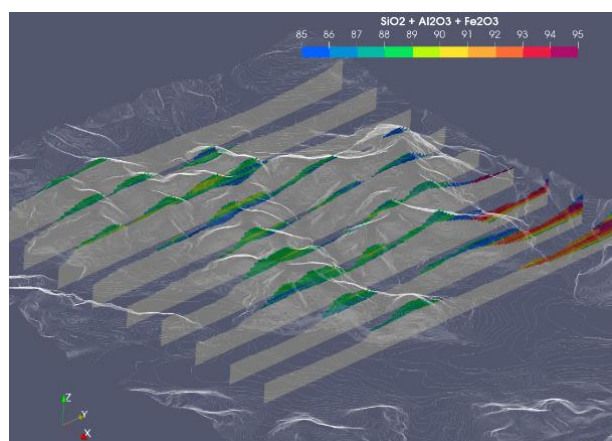


Figura 6. Calidad de material puzolánico: vista 3D (vista desde el sureste).

## Resultados

Como puede observarse en el modelo de bloques construido para este depósito (Figura 6 y 7), la totalidad de las reservas evaluadas muestran el calificativo de puzolanas buenas y muy buenas. En el sur del área localizamos 80% de las puzolanas de muy buena calidad; mientras que, en el norte notamos el 20 % restante, que aparece como una intercalación de calidad buena y muy buena. Los distintos métodos

empleados durante la exploración inicial (geológicos, geofísicos) permitieron sugerir la profundidad del depósito, mismo que fue validado durante la perforación y representado en el modelo de bloques. Posteriores estudios de carácter ingenieril permitirán diseñar el método de explotación, diseño de pit final y operativo y los accesos a los distintos frentes de explotación, necesarios para asegurar la sostenibilidad de los recursos y el manejo estratégico de los mismos.

## Estimación de Recursos y Reservas

Nuestra estimación de recursos y reservas se fundamenta en la metodología planteada por JORC (1990), quienes clasifican los recursos en "inferidos", "indicados" y "medidos" y las reservas en "probables" y "probadas", dependiendo su grado de conocimiento. Este enfoque asegura una evaluación progresiva de la certeza, es decir, al iniciar la evaluación con recursos inferidos y finalizar la misma con reservas probadas, habremos disminuido la incertidumbre, comprobado la alta viabilidad económica, incluido los parámetros mineros, aspectos sociales y ambientales del depósito.

Como se indicó con anterioridad, el modelo de bloques global del depósito está integrado por pequeños bloques (200 m<sup>3</sup>)

que cuentan con todo el número de variables que fueron determinadas durante la exploración y análisis fisicoquímicos. Así, utilizando el software AthosBlend podremos cuantificar las reservas probadas del depósito. Dado que el modelo de bloques original es un cubo que abarca mucha más área que el propio depósito, se hace necesario aplicar restricciones a través del software, tales como: topográficas, pit final, y por tipos de puzolana.

Estas restricciones mostrarán únicamente los cubos correspondientes a las puzolanas dependiendo su calidad y además una tabla asociada que mostrará los volúmenes de reservas y todas las variables adjuntas. Gráficos bivariados podrán ser construidos para mostrar las relaciones deseadas de las distintas variables del modelo. Una ventaja adicional que plantea el software es el consumo total del depósito de forma virtual, dependiendo de los requerimientos que establezcamos, que pueden ser por calidad o volumen. Así, podremos visualizar secuencialmente cómo se consumen las reservas del depósito a medida que disminuye el tiempo de vida de estas. Estos últimos modelos son de suma importancia para estimar las distintas

actividades de restauración de canteras, con fines ambientales.

### Discusión

A través de la presente evaluación y estimación de recursos hemos encontrado resultados similares en otros depósitos, en cuanto a las características de los materiales puzolánicos se refiere. Sin embargo, empleando técnicas geofísicas previo a la etapa de perforación, ha significado ahorros significativos en el presupuesto del proyecto. La definición de la superficie de contacto que marca el final de las puzolanas ha sido clave para optimizar el metraje a perforar, con sus consecuentes ahorros. Por otro lado, la implementación de software para la generación del modelo de bloques ha sido una herramienta indispensable para conocer la distribución y la estimación de recursos y reservas del depósito. Las iteraciones virtuales para simular el planeamiento minero han sido de suma utilidad para el diseño de cantera y para la planificación de las tareas de restauración, redundando en la mitigación de los impactos ambientales.

## Conclusiones

Con el presente estudio hemos identificado y caracterizado exitosamente el depósito de puzolana, a través de los métodos geológicos y geofísicos y de laboratorio. Las consecuentes optimizaciones provenientes de información del subsuelo a través de la geofísica y de la implementación del modelo geológico en el software, ha significado el mejoramiento de la incertidumbre y la generación de ahorros significativos en la etapa de perforación. El modelo de bloques computarizado estimó reservas sustanciales, lo que indica un alto potencial para el desarrollo comercial de este depósito.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Cementos Progreso, S.A. por facilitar la publicación del presente artículo y el soporte económico, a los colegas Byron Ramos por su apoyo el levantamiento e interpretación geofísica, Juanangel Díaz por su apoyo en el tema hidrogeológico y al grupo de perforación a diamantina que durante varios meses soportaron las inclemencias del tiempo con el fin de obtener muestras del subsuelo. Finalmente, al personal que se desempeña en los laboratorios de planta, también agradecemos su apoyo.

## Referencias

- Joint Ore Reserves Committee of The Australasian. 2013. Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC)
- Cisneros A, Schindlbeck J, Kutterolf S, Danisk M, Schmitt A, Freundt A, Pérez W, Harvey J, Wang K, Lee Y. 2021. A history of violence: magma incubation, timing and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán Caldera, Guatemala). *Journal of Quaternary Science*. (2021) 36(2) 169–179.
- Cornelis Bockhemühl. Cubo GmbH. <https://cobo.bockemuehl.ch/>
- Koch AJ, Mclean H. 1975. Pleistocene tephra and ash- flow deposits in the volcanic highlands of Guatemala. *Geological Society of America Bulletin* 86: 529–541.
- Velásquez L., Díaz R., Barrientos C., García E. 2019. Rapid screening method to determine hydraulic activity index of pumiceous pozzolanic materials from Guatemala using XRD. 15th International Congress on the Chemistry of Cement Prague, Czech Republic.
- Pérez C, Fernández E., Costafreda M.J. Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. Escuela técnica Superior de Ingenieros de Minas, Departamento de Ingeniería Geológica. Madrid.
- Villaseñor I., Graham E. 2010. The use of volcanic materials for the manufacture of pozzolanic plasters in the Maya lowlands: a preliminary report. *Journal of Archaeological Science* 37 (2010) 1339–1347.
- Sierra, O.M.; Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, M.V.; Soriano, L.; Quiñonez, J. Characterization and Reactivity of Natural Pozzolans from Guatemala. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11145. <https://doi.org/10.3390/app122111145>
- S. Kutterolf, J.C. Schindlbeck, F.S. Anselmetti, D. Ariztegui, M. Brenner d, J. Curtis d, D. Schmid, D.A. Hodell, A. Mueller, L. Perez, W. Perez, A. Schwalb, M. Frische, K.-L. Wang. A 400-ka tephrochronological framework for Central America from Lake Peten Itza (Guatemala) sediments.

Quaternary Science Reviews 150 (2016)  
200-220.

Wang H. 2020. A history of violence: magma incubation, timing and tephra distribution of the Los Chocoyos supereruption (Atitlán Caldera, Guatemala). Journal, of Quaternary Science. (2021) 36(2) 169–179. John Wiley & Sons Ltd.

Wright, J.V., Smith, A.L. and Self, S., 1980. A working terminology of pyroclastic deposits. J. Volcanol. Geotherm. Res., 8: 315-336