

## Investigación geológica-geotécnica del área de hundimiento del suelo en la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría” - Ciudad de Zaruma.

Geological-geotechnical investigation of the area of soil subsidence in the “La Inmaculada Fe y Alegría” Educational Unit - Zaruma city.

Evelyn Andagoya<sup>1</sup>, Diego Alquina<sup>2</sup>, Fernanda Andrade<sup>3</sup>, Franco Pinzón<sup>4</sup>, Renán Bedoya<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. [evelyn.andagoya@geoenergia.gob.ec](mailto:evelyn.andagoya@geoenergia.gob.ec)

<sup>2</sup> Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. [diego.alquina@geoenergia.gob.ec](mailto:diego.alquina@geoenergia.gob.ec)

<sup>3</sup> Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. [fernanda.andrade@geoenergia.gob.ec](mailto:fernanda.andrade@geoenergia.gob.ec)

<sup>4</sup> Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. [franco.pinzon@geoenergia.gob.ec](mailto:franco.pinzon@geoenergia.gob.ec)

<sup>5</sup> Dirección de Innovación, Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito-Ecuador. [renan.bedoya@geoenergia.gob.ec](mailto:renan.bedoya@geoenergia.gob.ec)

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 17-01-2020  
Fecha de aceptación: 16-06-2020

### RESUMEN

En este estudio se presentan los resultados de las investigaciones realizadas tanto en campo como en laboratorio y en gabinete, con los cuales se definieron los parámetros geotécnicos que caracterizan a las diversas litologías presentes en el área que abarca la zona de hundimiento del suelo, donde resultó afectada parte de la infraestructura de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría” en el cantón Zaruma. Las investigaciones se ejecutaron en superficie y en subterráneo, mediante técnicas que comprenden el reconocimiento del terreno en superficie e interior de mina y la investigación del subsuelo con el levantamiento geológico-geotécnico, geofísico, así como, la realización de perforaciones exploratorias a diamantina con recuperación de testigos, en los cuales se realizó ensayos de mecánica de rocas.

Los parámetros geomecánicos propios de las litologías, fueron procesados e interpretados sobre la base del conocimiento de la evolución geológica que ha experimentado la región, obteniéndose un modelo geológico-geotécnico que constituya el soporte técnico para el diseño de obras civiles de remediación.

**Palabras clave:** Hundimiento de suelo, Levantamiento geológico-geotécnico, Geofísica, Perforaciones a diamantina.

### ABSTRACT

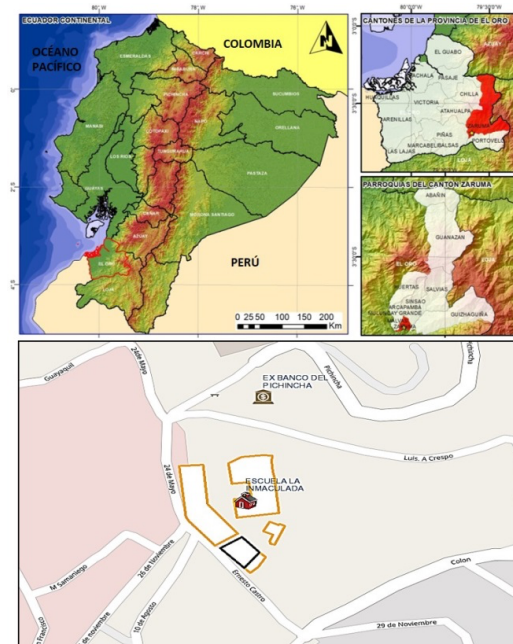
In this study, we show the research results carried out in the laboratory and office, which defines geotechnical parameters that characterize the different lithologies present in the area that covers the zone of soil subsidence, where a part of the infrastructure of the Educational Unit “La Inmaculada Fe y Alegría” resulted damaged in the canton Zaruma. The investigations were executed on surface and in subsoil, using techniques that include recognition of the ground on the surface of mine, and the subsoil investigations performed by geological-geotechnical mapping, geophysical survey, as well as exploratory executions diamond drilling with recovery of samples in which rock mechanics tests were performed.

The lithologies' geomechanical parameters, were processed and interpreted based on knowledge of the geological evolution that the region has experienced, obtaining a geological-geotechnical model that constitutes the technical support for the design of remediation civil works.

**Keywords:** Soil subsidence, Geological-geotechnical survey, Geophysics, Diamond drilling

## 1. INTRODUCCIÓN

La Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría” se ubica en el casco colonial de la ciudad de Zaruma, entre las calles 24 de Mayo, Ernesto A. Castro, Colón y Luis A. Crespo. Geográficamente se localiza en la coordenada: 654352E y 9591864N (Fig. 1). La ciudad se encuentra a 608 km de Quito, a 281 km de Guayaquil y a 110 km de Machala. Para acceder al cantón Zaruma, por vía aérea, se puede utilizar dos aeropuertos: el primero y más cercano, en la provincia de El Oro, en la ciudad de Santa Rosa y el segundo en la provincia de Loja, en Catamayo. La zona de estudio se ubica en los Andes meridionales del Ecuador, región donde progresivamente desaparecen las dos cordilleras, Real o Central y Occidental, sistemas montañosos que constituyen el cinturón montañoso Andino en los Andes ecuatorianos septentrionales, siendo el rasgo morfológico más notable el desarreglo de los relieves [1]. Geológicamente el sector está conformado por rocas sedimentarias y volcánicas sedimentarias de la cuenca geológica Celica-Lancones que van desde el Cretácico al Cenozoico [2], que comprende lavas basalto andesíticas y andesitas, ricas en cristales de plagioclasa, anfíbol y vidrio volcánico; además, tobas andesíticas muy meteorizadas y tobas dacíticas. Las estructuras geológicas en el sector de Zaruma, se encuentran controladas por varias zonas de fallamiento con dinámica transcurrente e inversa; el principal sistema estructural, corresponde al afectado por el sistema de Fallas Piñas – Portovelo, que separa al N la Unidad Portovelo y al S el Complejo Metamórfico de El Oro.



**Fig. 1.** Ubicación del área de estudio, al Sur oriente de la provincia de El Oro, cantón Zaruma. [5]

Históricamente la actividad minera en San Antonio de Cerro de Oro de Zaruma (actualmente Distrito Minero Portovelo – Zaruma), data de la época de La Colonia; actualmente, el tipo de minería preponderante en la zona es minería artesanal o pequeña minería, también se registra minería subterránea ilegal y anti-técnica que atenta contra el desarrollo urbanístico y pone en peligro al casco urbano de la ciudad de Zaruma. Ante esta problemática, la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM), realizó en el año 2017 un levantamiento de información en las galerías que se encuentran ubicadas por debajo del Distrito Portovelo – Zaruma, indicando que existen aproximadamente unos 67 Km de labores mineras que recorren todo el área.

Bajo esta premisa, el presente estudio pretende analizar las condiciones geológicas-geotécnicas del terreno en el cual tuvo lugar un hundimiento (25 de octubre de 2016) y, el posterior colapso del suelo (02 de enero de 2017), donde se sitúa la Unidad Educativa

“La Inmaculada Fe y Alegría”; para lo cual, este estudio se apoya en diferentes disciplinas como la investigación geofísica, hidrogeológica y movimientos en masa.

## 2. METODOLOGÍA

Se planteó una serie de investigaciones, iniciando con la recopilación y análisis de información geocientífica, seguido de una programación y ejecución de estudios *in situ*, laboratorio y gabinete, los cuales incluyeron investigaciones topográficas, geofísicas, levantamientos hidrogeológicos, movimientos en masa y finalmente, el análisis geológico-geotécnico a escala 1: 10 000 del área de influencia directa a nivel de superficie y subterráneo.

El análisis geológico-geotécnico implica la caracterización geomecánica del terreno integrado con la interpretación de ensayos de mecánica de rocas “*in situ*” como Ensayos de Penetración Estándar (SPT), permeabilidad lugeon/lefranc, tilt test, medidas de resistencia con martillo de Schmidt; así mismo la interpretación de ensayos de laboratorio como resistencia a compresión simple, triaxiales, carga puntual y logueo geotécnico para la valoración del macizo rocoso con la clasificación geomecánica rock mass rating (RMR) de Bieniawski (1989) [9]. Para ello es necesario previamente la investigación de varias disciplinas de apoyo como técnicas geofísicas (geoeléctrica, tomografía), hidrogeológicas (muestreo, química), movimientos en masa (inventarios, susceptibilidades) y perforaciones a rotación con recuperación de testigos. En la Tabla 1 se sintetiza la metodología utilizada:

**Tabla I**

Metodología utilizada para la aplicación del estudio

INVESTIGACIÓN	ALCANCE
<b>1. Revisión de Información</b>	Topografía.
	Hidrología e hidrogeología.
	Mapas geológicos diferentes escalas.
	Sismicidad.
<b>2. Inspecciones Interior Mina</b>	Determinar condiciones de seguridad interior mina.
	Identificar los puntos susceptibles que requieren intervención para la estabilización de la zona aledaña a la Unidad Educativa.

<b>3. Topografía</b>	Ubicar galerías bajo la zona del colapso.
	Levantamiento topográfico de superficie y subterránea. Monitoreo geodésico.
<b>4. Geofísica</b>	Detección de cavidades.
	Contactos geológicos y demás estructuras. Presencia de nivel freático.
<b>5. Reconocimientos geológicos</b>	Litología.
	Fallas y estructuras tectónicas.
	Datos hidrogeológicos. Geomorfología.
<b>6. Hidrogeología</b>	Posicionamiento del nivel freático.
	Estimación de caudales y presiones. Química del agua.
	Tipología.
<b>7. Movimientos en masa</b>	Velocidad, Vectores de desplazamiento. Susceptibilidad.
	Estaciones geomecánicas.
<b>8. Cartografía Geotécnica</b>	Toma de muestras en superficie e interior mina.
	Programa de perforaciones.
<b>9. Investigaciones Geotécnicas</b>	Ensayo de laboratorio.
	Propiedades geomecánicas.
	Modelamiento geotécnico.

## 3. INVESTIGACIONES DE ALCANCE

### 3.1 Geofísica

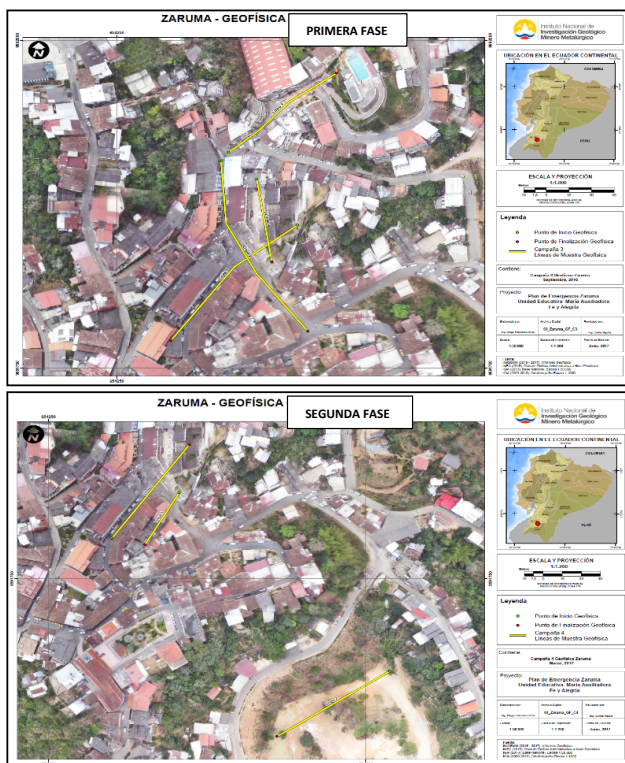
El levantamiento geofísico llevado a cabo por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) [5], tuvo el objetivo de determinar horizontes estratigráficos, estructuras geológicas, zonas de saturación de agua y posibles cavidades vacías subterráneas en la zona de estudio. Para ello, se aplicó el método de Resistividad Eléctrica y Polarización Inducida (IP), mediante el equipo SuperSting R8/IP, obteniendo como resultado 7 tomografías, con un total

de 744,8 metros sobre el terreno, a partir de 7 líneas geofísicas ejecutadas en dos fases (Tabla 2) (Fig. 2).

**Tabla II**

Longitud AB de las líneas geofísicas en el terreno y profundidades de investigación alcanzadas

Fases	Línea	Sector	Longitud en terreno AB (m)	Profundidad (m)	RMS (%)	Iteraciones (I)	Configuración eléctrica
PRIMERA FASE	1	Calle 10 de Agosto	117,6	18	13,3	7	Wenner
	2	Calle 24 de Mayo	168	25,7	6,03	4	Wenner
	3	Calle Pichincha	112	17,1	8,84	4	Wenner
	4	Interior Escuela Fe y Alegria "La Inmaculada"	67,2	13,9	15,5	5	Schlumberger
SEGUNDA FASE	1	Calle 10 de Agosto	112	17,9	23,2	7	Dip-Dip
	2	Calle Gonzalo Pizarro	112	29,4	23,1	5	Dip-Dip
	3	Pasaje S/N aldeaño a Escuela	56	15,3	17,4	8	Dip-Dip



**Fig. 2.** Ubicación de líneas geofísicas de primera y segunda fase. [5]

Según el análisis de las tomografías caracterizadas por las resistividades obtenidas en el terreno, cada uno de los materiales investigados tiene una correlación geológica. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los valores de resistividad de los materiales y rocas investigadas.

**Tabla III**

Valores de resistividad de materiales y rocas

Fases	Material y Rocas	Tomografía 1		Tomografía 2		Tomografía 3		Tomografía 4	
		Min (Ohm-m)	Max (Ohm-m)	Min (Ohm-m)	Max (Ohm-m)	Min (Ohm-m)	Max (Ohm-m)	Min (Ohm-m)	Max (Ohm-m)
PRIMERA FASE	Material con máxima saturación de agua	1,0	4,2	1,4	5,3	1,0	8,5	1,0	8,9
	Material con moderada saturación de agua	10,1	38,1	12,3	16,7	15,6	39,6	12,8	41,9
	Andesitas/Tobas	6000	10000	-	-	-	-	4220	6550
	Andesitas/Tobas meteorizadas y fracturadas	129,6	784,4	52,3	173	73	617	57,6	430,7
SEGUNDA FASE	Material con máxima saturación de agua	1,0	14,1	1,6	16	1,0	17,8		
	Material con moderada saturación de agua	-	-	31,1	53,7	25,7	67,5		
	Andesitas/Tobas	5623	100000	7232	100000	5623	100000		
	Andesitas/Tobas meteorizadas y fracturadas	217,6	1129,1	210,5	1429,4	117	524,5		
	Relleno (escombrera)					9000	100000		

**Primera fase:** En la tomografía 1, materiales con máxima saturación de agua se observan entre las distancias 76 y 91 metros (1,0 a 4,2 Ohm-m), de la misma manera, se observa resistividades desde 10,1 a 38,1 Ohm-m, correspondiente a materiales con saturación moderada de agua. Entre las distancias 10 y 46 metros, se observa rocas volcánicas (andesitas / tobas riolíticas) con valores de resistividad de 6000 a 10000 Ohm-m. En la tomografía 2, entre las distancias 108 y 123 metros, se observa un cuerpo con valores de resistividad menor a 4,7 Ohm-m, correspondiente a materiales con máxima saturación de agua; mientras que, a lo largo de toda la tomografía se observa valores de resistividad entre 52 Ohm-m y 173 Ohm-m, correspondientes a material meteorizado (tobas riolíticas / andesíticas). En la tomografía 3, entre las distancias 62 y 72 metros, se observa materiales con máxima saturación de agua (resistividad entre 1 y 8,5 Ohm-m). La respuesta anómala se ubica frente al Banco Pichincha y al Coliseo de Zaruma, alrededor de este cuerpo se identificó valores de resistividad que varían entre 15,6 y 39,6 Ohm-m, correspondientes a materiales con saturación moderada de agua. A lo largo de toda la tomografía se observa valores de resistividad entre 65 Ohm-m y 325 Ohm-m, correspondientes a material meteorizado (tobas riolíticas / andesíticas). En la tomografía 4, materiales con saturación máxima de agua se evidencian en 20,4 metros (resistividad entre 1 y 8,9 Ohm-m); además, zonas con saturación moderada de agua registran valores de resistividad entre 12,8 Ohm-m y 41,9 Ohm-m. Tres cuerpos de rocas volcánicas (andesitas / tobas) se encuentran distribuidas en el lado izquierdo y

derecho de la tomografía (resistividades entre 4220 y 6550 Ohm-m. A lo largo de toda la tomografía se observa valores de resistividad entre 57,6 y 430,7 Ohm-m, correspondientes a material meteorizado y fracturado.

**Segunda fase:** *En la tomografía 1*, materiales con alta saturación de agua se evidencian en cinco zonas, entre 54 y 103 metros (resistividades de 1 a 14,1 Ohm-m). Entre las distancias 0 a 20 metros y de 64 a 103 metros, se observa rocas volcánicas (andesitas / tobas riolíticas) con resistividades de 5623 a 100000 Ohm-m, a partir de 10 m de profundidad. A lo largo de toda la tomografía se observa valores de resistividad entre 217,6 Ohm-m y 1129,1 Ohm-m, correspondientes a material meteorizado (tobas riolíticas / andesíticas). *En la tomografía 2*, de 12 a 24 metros y de 95 a 107 metros, se observa un cuerpo de materiales con alta saturación de agua (resistividad menor a 16 Ohm-m). Alrededor de estos cuerpos se observan zonas con moderada saturación de agua (resistividades entre 31,1 y 53,7 Ohm-m). Existen cuatro cuerpos con valores de resistividad que varían entre 7232 y 100000 Ohm-m, correspondientes a rocas volcánicas (andesitas / tobas riolíticas). A lo largo de toda la tomografía se observa valores de resistividad entre 204 y 1429,4 Ohm-m, que corresponden a material meteorizado (tobas riolíticas / andesíticas). *En la tomografía 3*, entre las distancias 6 y 17,6 metros, se observa a materiales de relleno del socavón producido en la escuela (bloques, arena y grava), los cuales se ubican a 2 metros de profundidad y con un espesor aproximado de 7 metros (resistividades entre 9000 y 100000 Ohm-m). Desde los 25 metros hasta el final de la tomografía se observan rocas de composición andesítica, tobas andesíticas y brechas volcánicas, las cuales son representadas con resistividades que varían entre 5623 y 100000 Ohm-m. En toda la tomografía se observa material meteorizado y fracturado además de una saturación baja de agua (resistividades entre 117 y 524,5 Ohm-m). Zonas con saturación alta de agua se observan en el extremo izquierdo y centro de la tomografía, mientras que en la parte extrema derecha de la tomografía se encuentra una zona con moderada saturación de agua, con valores menores a 17,8 Ohm-m. En la tomografía se observan tres distorsiones verticales que representan fallas locales de la zona, las cuales estarían relacionadas con el sistema de fallas N-S del distrito minero Zaruma.

### 3.2 Hidrogeología

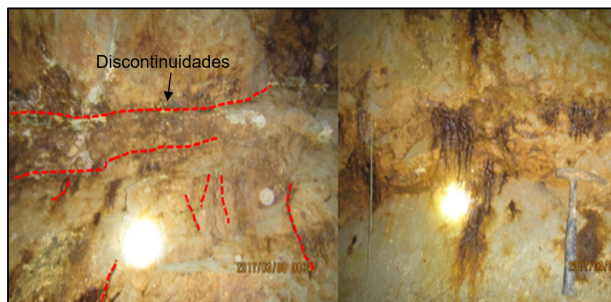
Para conocer la incidencia de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de hundimiento, el IIGE [5], realizó el análisis hidrológico e hidrogeológico.

La inspección hidrológica se realizó en los drenajes que se encuentran cercanos a la zona de afectación del

hundimiento que tienen presencia de escorrentía superficial. En estos drenajes se procedió con la medición de los parámetros físicos, medición de caudal y toma de muestras de agua (análisis químico de: aniones, cationes y metales). Por su parte, el análisis hidrogeológico se efectuó en interior de mina en puntos cercanos al hundimiento, donde se evidencia la infiltración de agua por medio de estructuras geológicas (fallas y diaclasas) y por estructuras antrópicas producto de la actividad minera, además, se tomaron parámetros in situ y muestras de agua para sus respectivos análisis de laboratorio.

Tomando en cuenta que la inspección fue llevada a cabo en época invernal (marzo 2017), los niveles de precipitación en la zona aumentaron considerablemente, la misma que tiene aporte en las quebradas ubicadas en la parte posterior del Coliseo de la ciudad (escorrentía superficial), aportando 1 l/s de caudal (al momento de lluvia) y de 0,5 l/s cuando no existía precipitaciones.

El agua lluvia que se infiltra penetra la zona no saturada y humedece el suelo, lo satura y continúa con el aporte de agua externa (lluvia constante) y con las condiciones favorables para el flujo, el agua se percola hacia zonas más profundas a través de las estructuras geológicas y espacios intersticiales existentes en la zona vadosa. El movimiento del agua continúa a través de fallas y diaclasas por las cuales circula las aguas superficiales y sub-superficiales, dando como resultado una porosidad secundaria en la roca (Fig. 3).



**Fig. 3.** Filtración de agua por diaclasas en la roca y paredes al interior mina.

El suelo es de composición arcillosa (poco permeable) con presencia de minerales arcillosos expansivos (montmorillonita), situación por la cual, al momento que quedó expuesto el cono de colapso por hundimiento, este continuó deslizándose con mayor facilidad.

El drenaje de la zona de estudio en interior de mina corresponde a un drenaje ácido (pH 2-3), producto de la disolución de los minerales polimetálicos propios del sustrato rocoso. Además, las concentraciones altas de aniones y cationes son producidas por efectos de oxidación de los minerales sulfurados.

### 3.3 Movimientos en masa

Previo a la ocurrencia del evento (25 de octubre del 2016), según versiones de los pobladores ubicados en las inmediaciones de la zona, escucharon constantes detonaciones en el subsuelo y afirmaron que no hubo presencia de lluvias y sismos al momento de lo ocurrido, lo cual sustenta, que el hundimiento ocasionado fue causado por factores antrópicos detonantes (explosiones, vibraciones, excavaciones manuales, etc.), originados por la actividad minera ilegal. (Fig. 4).

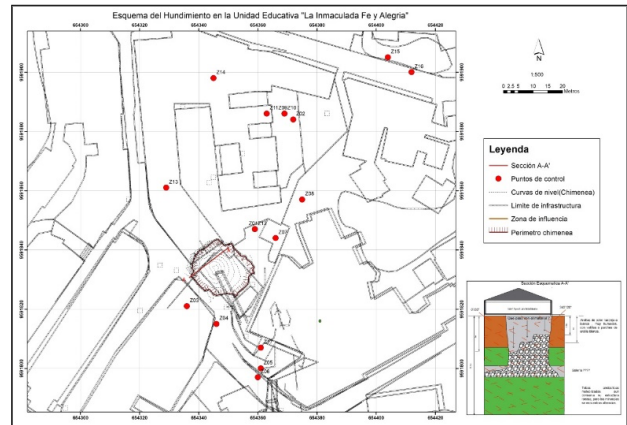


**Fig. 4.** Hundimiento al interior de los predios de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”.

**Tipo de movimiento:** Este movimiento es definido como un hundimiento (subsistencia minera), el área del evento abarca unos ~ 150 m<sup>2</sup>, se ha considerado el total de masa desplazada de 1050 m<sup>3</sup> de material arcilloso y se estima que la velocidad de la subsidencia fue de rápida a muy rápida, de clase 5 a 6 en la escala de Cruden y Varnes (1996) [10]. Es un evento importante que afectó a un establecimiento educativo, además, ha causado varias restricciones para el funcionamiento del comercio y transporte del cantón. Se evidencia con certeza, en un radio de 50 m desde el punto central del evento, hundimientos localizados al S y SO, algunos de ellos han sido inventariados por el ex Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM) en el año 2013 [6]. En el mapa (Fig. 5) se observa que en la dirección N 20° a 30°, existe una franja de alrededor de 30 metros que presenta evidencias de inestabilidad, a su vez, incluye varios hundimientos antiguos reportados por el ex INIGEMM.

**Factores condicionantes:** La meteorización de la roca en superficie es casi total, esta litología se encuentra meteorizada en un 85 % aproximadamente, producto de este proceso se observa arcilla, esta arcilla recepta agua en su estructura, la superficie varía entre 9 a 15 m de profundidad, esta litología probablemente no soportó el peso de las construcciones asentadas en la superficie.

**Factores detonantes:** Ante la ausencia de lluvias y sismos precedentes, se sustenta que el factor principal en la ocurrencia de este hundimiento fue la actividad minera ilegal subterránea, específicamente, las excavaciones manuales y el uso indiscriminado de explosivos, sin control, bajo la ciudad.



**Fig. 5.** Plano de ubicación de puntos inestables identificados y otros puntos recopilados del geoportal del IIGE [4]

## 4. INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO – GEOTÉCNICA

### 4.1 Geología local

La investigación se la realizó tanto en superficie como en subterráneo. A nivel subterráneo, el ingreso se realizó por la boca mina San Antonio, mapeando el Nivel Chorrillos L1/3, la Línea San Antonio y la sección en vertical bajo La Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”. La zona de estudio está predominantemente conformada por rocas volcánicas, medianamente fracturadas y mineralizadas con potentes coberturas de arcillas con tonalidades café - pardas.

#### 4.1.1 Litoestratigrafía

Las unidades litoestratigráficas identificadas se describen a continuación:

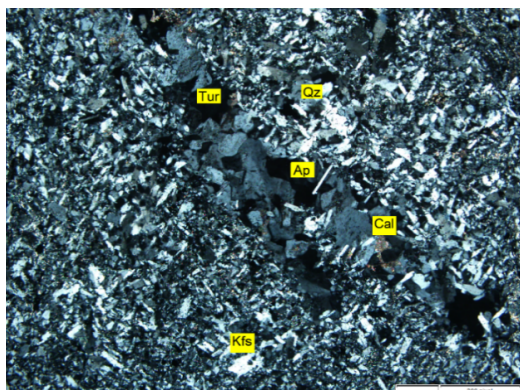
- **Unidad volcánica Portovelo.-**

**Andesitas verdes alteradas:** Constituyen rocas andesíticas que presentan un grado bajo de alteración (Fig. 6), en láminas delgadas han sido identificados fenocristales de plagioclasas, hornblendas y vidrio volcánico amorfo; como minerales secundarios, cuarzo, zoisita, sericita y epidota, además de sulfuros. En testigos de perforación se observan Andesitas fuertemente fracturadas de color gris con vetillas de cuarzo y mineralización de pirita, calcopirita y trazas de roca lixiviada con alteración sericitica.



**Fig. 6.** Andesita con grado bajo de alteración perteneciente a la Unidad Portovelo (veta Tres Reyes).

**Brechas volcánicas:** Esta unidad volcánica se compone de zonas de brechas que microscópicamente exhiben una microtextura clástica con líticos ígneos, sedimentarios y volcanoclásticos, con matriz arcillosa y presencia de sulfuros (Fig. 7). En testigos de perforación se observa las brechas con tonalidades que van de verde a gris amarillentas presentan vetillas de cuarzo con clastos angulares, drusas mineralizadas con presencia de pirita, calcopirita y clorita.



**Fig. 7.** Microfotografía con luz polarizada de brecha volcánica polimíctica (Muestra ZNC-DA-002).

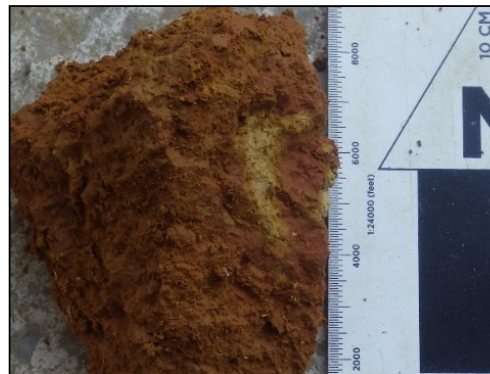
• **Unidad Saprolito.-**

La Unidad de Saprolito presenta una potencia promedio de 1 a 10 m, con tonalidades amarillentas a rojizas, además, trazas y clastos de rocas angulosas fuertemente meteorizadas, se encuentra saturado con una moderada mineralización de pirita cúbica y calcopirita.

• **Unidad Arcillas.-**

Esta unidad está compuesta por arcillas de color café amarillenta altamente plásticas, húmedas, procedente de la meteorización o alteración de rocas aluminicas con pirita y hematita, también, presenta minerales secundarios como la caolinita e interstratificación de illita/esmectita y caolinita/esmectita (Fig. 8). La Illita es un mineral de alteración o meteorización de

feldespatos, en tanto que la caolinita (alófano), la esmectita (montmorillonita), son minerales formados por alteración hidrotermal de los feldespatos u otros aluminosilicatos.

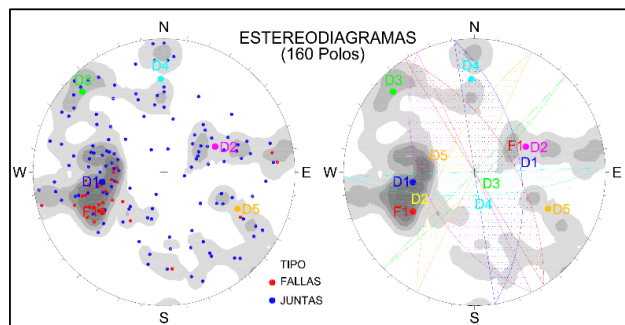


**Fig. 8.** Arcilla color naranja amarillento se observa en el interior del hundimiento (UTM: 654359E / 9591847N).

**4.1.2 Geología Estructural**

Datos estructurales tomados en las labores mineras de la Mina San Antonio, Nivel Chorrillos, indican un set principal de discontinuidades denominadas F1 con azimuth de 58° y buzamiento de 58° (Fig. 9).

Las estructuras geológicas en el área de estudio, se encuentran paralelas a la dirección principal del sistema de fallas Piñas – Portovelo.



SET	F1	D1	D2	D3	D4	D5
<b>Azimet Buz. / Buzamie nto</b>	58° / 58°	81° / 51°	244° / 47°	134° / 82°	178° / 70°	296° / 64°
<b>Rumbo / Buzamie nto</b>	N32° W/58° NE	N9° W/51° NE	N26° W/47° SE	N44° E/82° SE	N88° E/70° SE	N26° E/64° NW

**Fig. 9.** Estereodiagramas de datos estructurales y sistemas dominantes tomados en el Nivel Chorrillos.

**4.2 Perforaciones exploratorias**

Con la finalidad de verificar la geología del sitio de hundimiento e investigar las condiciones geotécnicas en las que se encuentra el macizo rocoso y los

depósitos superficiales, se realizaron perforaciones verticales e inclinadas con métodos de avance a rotación y obtención continua de núcleos. En convenio con la Empresa Gran Nacional Minera “Mariscal Sucre”, se ejecutaron 10 perforaciones con fines investigativos, logísticos y de mitigación; en la Figura 10 y Tabla 4 se muestran dichas perforaciones, las mismas que se establecieron en base a criterios como:

- Para el caso de la perforación PE-01, la interpretación de la tomografía eléctrica no detectó la presencia de cavidades hasta los 18 metros, debido al bajo alcance en profundidad de la línea geofísica, teniendo incertidumbre de cavidades cercanas a la superficie.
- La ubicación de la perforación PE-02 está sujeta al estudio del comportamiento geomecánico del macizo rocoso fuera de la zona de influencia de la veta, conocida también como roca de caja.
- La ubicación de las perforaciones de PE-03 a PE-07, tuvieron como objetivo, alcanzar galerías mineras próximas a la zona de hundimiento.
- Perforaciones MP-01, MP-02 y MP-03 para ejecución de pilares de hormigón como medida de mitigación.
- Realizar ensayos SPT para determinar parámetros resistentes del Saprolito en las perforaciones PE-01 y MP-03.
- Testificación geológica-geotécnica para caracterización geomecánica mediante clasificación empírica RMR de Bieniawski (1989).
- Correlación geológica-geotécnica entre perforaciones, para obtener secciones que visualicen con mayor detalle las unidades litoestratigráficas y su disposición en subsuelo, además de definir niveles de calidad y resistencia del macizo rocoso.

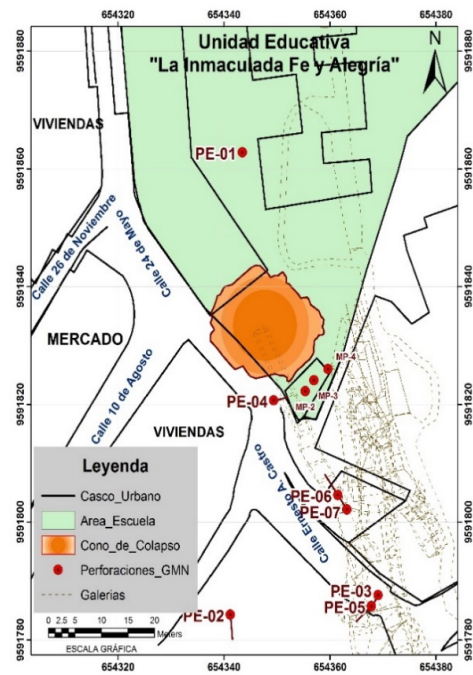


Fig. 10. Ubicación de perforaciones (PE-XX, MP-XX).

Tabla IV

Datos técnicos de perforaciones a diamantina con diámetro HQ y NQ

SONDEO	FECHA		COORDENADAS INICIO			LONGIT. (metros)	AZIMUT (°)	INCLIN. (°)R/H
	Inicio	Final	Este	Norte	Cota			
PE-01	03/03/2017	06/03/2017	654343,498	9591862,816	1206,20	70,25	-	-90
PE-02	08/03/2017	15/03/2017	654341,208	9591784,307	1198,39	80,00	175	-87
PE-03	22/03/2017	10/04/2017	654369,064	9591787,614	1193,64	61,95	214	-87
PE-04	11/04/2017	16/04/2017	654349,406	9591820,712	1201,90	58,25	79	-87,50
PE-05	17/04/2017	24/04/2017	654367,823	9591785,761	1193,67	62,20	228	-86,50
PE-06	25/04/2017	08/05/2017	654361,500	9591804,612	1200,07	76,65	325	-86,50
PE-07	10/05/2017	14/05/2017	654363,215	9591802,163	1200,07	76,90	325	-86,50
MP-02	19/05/2017	19/05/2017	654355,340	9591822,246	1205,00	23,10	-	-90
MP-03	17/05/2017	18/05/2017	654356,989	9591824,113	1205,00	27,40	-	-90
MP-04	16/05/2017	17/05/2017	654358,643	9591826,001	1205,00	21,60	-	-90



	47,15	47,15	57,15	57,15	II-Buena	III-Regular	IV-Mala
	51,20	54,30	57,20	57,20	LABOR	LABOR	LABOR
	54,30	58,25	58,25	58,25	MINERA	MINERA	MINERA
					II-Buena	III-Regular	IV-Mala
PE-05	0,00	2,35			Material de relleno	IV-Mala	
	2,35	4,00			Saprolito	III-Regular	
	4,00	5,70				IV-Mala	
	5,70	7,00				III-Regular	
	7,00	8,80				IV-Mala	
	8,80	11,00				III-Regular	
	11,00	15,20				IV-Mala	
	15,20	17,65				III-Regular	
	17,65	23,45				IV-Mala	
	23,45	23,75				III-Regular	
	23,75	24,35				IV-Mala	
	24,35	25,00				III-Regular	
	25,00	35,15			Brecha andesítica	IV-Mala	
	35,15	37,15				III-Regular	
	37,15	39,75				IV-Mala	
	39,75	40,15				III-Regular	
40,15	47,56				IV-Mala		
47,56	51,30				III-Regular		
51,30	57,85				IV-Mala		
57,85	60,60				III-Regular		
60,60	62,20				LABOR		
					MINERA		
					III-Regular		
PE-06	0,00	1,50			Arcillas muy plásticas	V-Muy mala	
	1,50	4,38			Saprolito	IV-Mala	
	4,38	19,05				III-Regular	
	19,05	21,95				IV-Mala	
	21,95	25,60				III-Regular	
	25,60	28,00				LABOR	
	28,00	30,60			Brecha	MINERA	
	30,60	33,00				IV-Mala	
	33,00	35,00				V-Muy mala	
	35,00	46,40				IV-Mala	
	46,40	62,95				III-Regular	
	62,95	63,70				IV-Mala	
	63,70	64,00				III-Regular	
	64,00	65,45				LABOR	
65,45	67,35			Andesita	MINERA		
67,35	70,10				III-Regular		
70,10	73,60				IV-Mala		
73,60	76,65				III-Regular		
PE-07	0,00	19,70			Arcillas y saprolito	V-Muy mala	
	19,70	28,45				III-Regular	
	28,45	28,85				LABOR	
	28,85	57,80				MINERA	
	57,80	59,80			Brecha	III-Regular	
	59,80	64,10				IV-Mala	
	64,10	65,80				III-Regular	
	65,80	70,80				LABOR	
70,80	75,10				MINERA		
75,10	76,90				III-Regular		
MP-02	0,00	20,00			Arcilla plástica	IV-Mala	
	20,00	23,10			Saprolito		
MP-03	0,00	8,00			Arcilla plástica	V-Muy mala	
	8,00	12,60			Arcilla		
	12,60	27,46			Saprolito		
MP-04	0,00	8,00			Arcilla plástica	V-Muy mala	
	8,00	12,60			Arcilla		
	12,60	27,46			Saprolito		

### 4.3 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica está dada por la determinación de la calidad del macizo rocoso y con esto, la generación de un modelo geológico-geotécnico que sirva como base para el diseño de obras civiles de mitigación. Para ello se realizó levantamientos geológicos-geotécnicos escala semi-detalle (estaciones geomecánicas), en las galerías que aprovechan la veta Tres Reyes desde el denominado nivel Chorillos L1/3 (cota: ±1047 msnm) hasta las

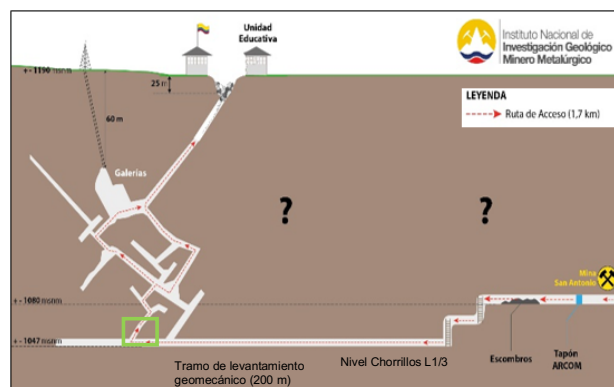
galerías inclinadas a 45° (rebajes) que provocaron el colapso del macizo rocoso en el sector de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría” (cota: ±1125 msnm). Así mismo, este levantamiento geológico-geotécnico de galerías es complementado con la investigación de los 10 sondeos que permitieron registrar información para la zonificación o delimitación del macizo rocoso en cuanto a la calidad de la roca y su resistencia.

En este estudio, para la caracterización geotécnica, tanto de sondeos, como de galerías, se aplicó la calificación geomecánica RMR de Bieniawski (1989), además para ajustar esta clasificación empírica, se efectuaron ensayos de laboratorio y ensayos de campo, con la finalidad de obtener mediciones cuantitativas que avalen la clasificación RMR. Entre los ensayos realizados están:

- **Ensayos de laboratorio:**  
Ensayo de compresión simple ( $\sigma_c$ )
- **Ensayos de campo:**  
Índices de campo (ISRM, 1981)  
Ensayo de carga puntual (PLT)  
Correlación compresión simple con martillo de Schmidt (esclerómetro)  
Ensayos SPT

#### 4.3.1 Levantamiento geomecánico en galería

Para determinar la calidad del macizo rocoso se levantó 79 estaciones geomecánicas en una longitud de 200 metros de galería en el nivel Chorillos L1/3, para su ubicación se tomó como referencia el rebaje que accede al sitio donde ocurrió el colapso (Fig. 12).



**Fig. 12.** Esquema de galerías a nivel Chorillos L1/3 bajo la zona de hundimiento y tramo de caracterización geológica.

La metodología utilizada consistió en la descripción y medida de datos para registrar sistemáticamente una ficha de campo o estación geomecánica, indicando en cada afloramiento la litología, grado de fracturación mediante la estimación de  $J_v$  (juntas/m<sup>3</sup>), tamaño de

bloques, resistencia de la matriz rocosa y discontinuidades con la ayuda del esclerómetro, grado de meteorización e hidrogeología presente en el macizo rocoso.

Para la determinación del estado de las discontinuidades, se tomó datos como: tipología, datos estructurales (azimut de buzamiento/buzamiento), espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno y espesores, grado de meteorización, presencia de agua y resistencia a la pared de las discontinuidades.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de la calidad de macizo rocoso donde los valores del RMR [9] predominan como una roca de Clase III (70%, calidad regular) y ocasionalmente como roca Clase IV (30%, calidad mala). Hay que considerar que la estimación de calidad del macizo rocoso se la realizó en la cota 1047, en relación a la superficie a ± 150 metros de la superficie.

**Tabla VII**

Valoración RMR corregido por orientación de discontinuidades en galería Nivel Chorillos L1/3

GALERÍA	ABSCISA		RMR corregido	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA	
	Inicial	Final		Clase	Calidad
Nivel Chorillos L1/3	0+000	0+010 (N)	9	III	MEDIA
	0+010	0+020 (N)	27	IV	MALA
	0+020	0+030 (N)	40	IV	MALA
	0+030	0+040 (N)	43	III	MEDIA
	0+040	0+050 (N)	43	III	MEDIA
	0+050	0+060 (N)	46	III	MEDIA
	0+060	0+065 (N)	35	IV	MALA
	0+065	0+070 (N)	40	IV	MALA
	0+070	0+080 (N)	43	III	MEDIA
	0+080	0+090 (N)	36	IV	MALA
	0+090	0+100 (N)	31	IV	MALA
	0+000	0+010 (S)	45	III	MEDIA
	0+010	0+020 (S)	45	III	MEDIA
	0+020	0+030 (S)	56	III	MEDIA
	0+030	0+040 (S)	47	III	MEDIA
	0+040	0+050 (S)	47	III	MEDIA
	0+050	0+060 (S)	44	III	MEDIA
	0+065	0+070 (S)	57	III	MEDIA
	0+070	0+080 (S)	45	III	MEDIA
	0+080	0+090 (S)	47	III	MEDIA
0+090	0+100 (S)	44	III	MEDIA	

**4.3.2 Resistencia a compresión simple en galerías con ensayo de martillo de Schmidt**

Al determinar que en general la calidad del macizo rocoso presenta una calidad media (Clase III), se optó por estimar la resistencia a compresión simple usando el martillo de Schmidt, en las inmediaciones del cono de colapso entre las cotas 1110 a 1130 msnm. El resultado de este ensayo “insitu” determina que la resistencia del macizo rocoso se encuentra en el orden

de los 28-52 MPa que se cataloga como roca dura a moderadamente dura (ISRM, 1989), para ello se tomaron 4 puntos de ensayo (Tabla 8).

**Tabla VIII**

Resultados de ensayos de martillo Schmidt, para determinar RCS en rocas de galerías colindantes a la chimenea de colapso. Cotas: 1110-1130 msnm

Ubicación	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 Caverna nivel Evelyn Referencia: Chimenea de colapso	24,0	18,5	21,0	22,5	21,5	30,0	18,5	39,5	30,0	34,0
Cota: 1110 msnm	Promedio: 31,5		Observaciones: Densidad roca 26,5KN/m <sup>3</sup> . El martillo fue aplicado en dirección perpendicular a la pared vertical del macizo rocoso.						Resultados: 45MPa	
2 Caverna nivel Evelyn Referencia: Chimenea de colapso	18,5	18,5	19,0	23,0	23,5	17,5	50,5	19,5	34,5	39,0
Cota: 1117 msnm	Promedio: 34,1		Observaciones: Densidad roca 26,5KN/m <sup>3</sup> . El martillo fue aplicado en dirección perpendicular a la pared vertical del macizo rocoso.						Resultados: 53MPa	
3 Caverna nivel Evelyn Referencia: Pilar 1m	26,0	18,5	20,0	19,5	18,5	20,0	18,0	19,5	18,0	21,0
Cota: 1120 msnm	Promedio: 22,4		Observaciones: Densidad roca 26,5KN/m <sup>3</sup> . El martillo fue aplicado en dirección perpendicular a la pared vertical del macizo rocoso.						Resultados: 28MPa	
4 Caverna nivel Evelyn Referencia: Chimenea de colapso	30,5	45,0	36,5	17,5	28,5	21,0	24,5	23,0	26,5	21,0
Cota: 1130 msnm	Promedio: 33,4		Observaciones: Densidad roca 26,5KN/m <sup>3</sup> . El martillo fue aplicado en dirección perpendicular a la pared vertical del macizo rocoso.						Resultados: 52MPa	
Valores mínimos										
Valores máximos										

**4.3.3 Resistencia a compresión simple en testigos de perforación con ensayo RCS y carga puntual**

Durante la campaña de perforación se recolectaron 80 muestras destinadas para ensayos de carga puntual (axial y diametral) y ocho muestras para ensayos de RCS (resistencia a compresión simple), entre tobas, brechas y andesitas las mismas que se encontraban sin saturación alguna.

El ISRM (1985) [7] establece que, en promedio, la resistencia a la compresión simple es de 20 a 25 veces Is(50). Sin embargo, también indica que el rango oscila entre 15 a 50, en ensayos con diferentes tipos de rocas. La relación RCS/Is(50) denominada como factor de conversión de resistencia (k) fue calculada con datos de laboratorio, siendo esta constante k=13. Por lo tanto, la RCS en función del Is(50) resulta de la multiplicación de la constante propuesta.

En la Tabla 9 se recopila datos de los ensayos realizados, los cuales se agruparon cada 20 metros de longitud de la perforación, esta sectorización se realizó en base a la calidad del macizo rocoso considerando su aumento gradual.

**Tabla IX**

Resultados de ensayos de resistencia a compresión simple expresados en MPa

SONDEO	PROFUNDIDAD (m) / Ensayos Compresión Simple (MPa)			
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80
PE-01	12	18	121	143
PE-02	68	106	224	47
PE-03	-	72	103	-
PE-04	-	27	28	-
PE-05	41	25	41	-
PE-06	5	25	85	129
PE-07	9	29	139	130
MP-02	4	-	-	-
MP-03	3	-	-	-
MP-04	3	-	-	-
Min. (MPa)	3	7	28	47
Máx.(MPa)	68	106	224	143
Media (MPa)	7	26	103	130
Descripción (ISRM, 1981)	Roca muy blanda-blanda	Roca blanda-moderadamente dura	Roca dura-muy dura	Roca muy dura

Los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS) y carga puntual permitieron definir que el Sapolito (0-20m) en estado seco presenta una resistencia de 7 MPa. En el tramo 20-40 m, roca con fuerte y moderada meteorización exhibe una resistencia de 26 MPa. A partir de los 40 metros la roca presenta una resistencia de 103 MPa que se la describe como Roca Muy dura.

#### 4.3.4 Ensayos de penetración estándar SPT

El ensayo de penetración estándar o SPT, se lo realizó en forma automatizada, en la roca altamente meteorizada (Sapolito) hasta la profundidad de 12 metros, para ello el ensayo se desarrolló mediante dispositivo de caída y golpeo automático con apoyo de equipo de perforación tipo AKER, siguiendo los parámetros que estipula la norma ASTM D-1586. [11]

La corrección de N, se la realizó con la siguiente fórmula empírica [8]:

$$N60 = \frac{N * nh * nb * ns * nr}{60}$$

Donde,

N60= Número de penetraciones estándar corregido para condiciones de campo.

N= Número de penetración medio.

nh= Eficiencia del martillo de la perforación.

nb= Corrección para el diámetro de la perforación.

ns= Corrección del muestreador.

nr= Corrección para la longitud de la varilla.

La consistencia y resistencia a la compresión no confinada (RCS), se estimó a partir del número estándar de penetración N60, de acuerdo con los criterios de Crespo C., 2018 [3].

Literatura técnica especializada contiene muchas correlaciones entre el número estándar de penetración y la resistencia al corte no drenado de la arcilla (Cu). Así se tomaron las correlaciones de Showers (1979), Terzaghi y Peck (1967), Braja Das (2002) y finalmente de Hara y otros (1971).

Los datos de campo fueron procesados y sintetizados en valores promedio del sapolito (Tabla 10); en el caso de la perforación PE-01 se realizaron diez ensayos a partir de 1 metro de profundidad y en tramos de 1 metro. Mientras que en el caso de la perforación MP-03 se realizaron nueve ensayos a partir de 3,55 metros de profundidad y en tramos de 1 metro.

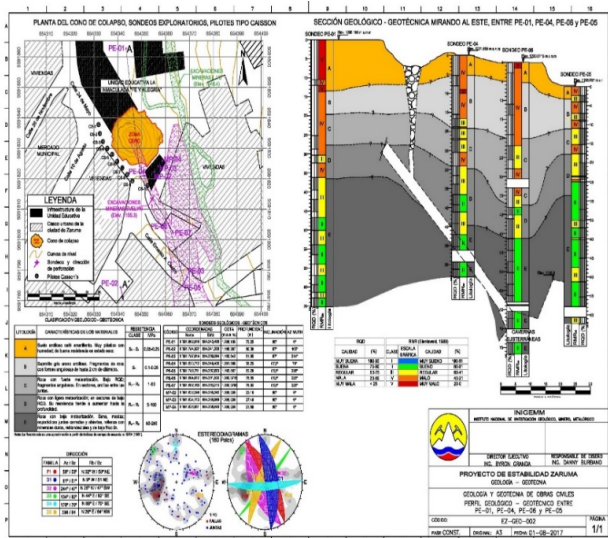
**Tabla X**

Resumen de correlaciones geotécnicas a partir del número de penetración estándar en sapolito de las perforaciones PE-01 y MP-03-norma ASTM D-1586 [11]

PARÁMETROS PROMEDIO DEL SAPOLITO		PERFORACIÓN / Correlaciones geotécnicas a partir de ensayos SPT	
		PE-01	MP-03
NSPT (30)	N30: T2+T3	14	17
N60 (Braja Das, 2014)	Correg.	9	11
RCS (Braja Das, 2014)	kPa	117	117
	(Terzaghi y Peck, 1967) kPa	112	134
Consistencia de arcillas (ASTM D1586)	Descripción	Rígida	Rígida
Ángulo de Fricción (ASTM D1586)	φ (°)	4	5
Módulo de Deformación (ASTM D1586)	(E) kPa	11400	11167
Resistencia al corte sin drenar en arcillas	(Showers, 1979) (Cu) kPa	67	80
	(Terzaghi y Peck, 1967) (Cu) kPa	56	67
	(Braja Das, 2014) (Cu) kPa	40	47
	(Hara y otros, 1971) (Cu) kPa	54	64
CLASIFICACIÓN SUCS	Cu vs SPT (N)	CL, Arcillas de baja-media plasticidad	CL, Arcillas de baja-media plasticidad

#### 4.4 Modelo geológico-geotécnico del cono de colapso

Los valores RMR (Bieniawski, 1989) se los representa en diferentes diagramas y se proyectan en perfiles geomecánicos representativos, la delimitación de niveles está supeditada a la calidad del macizo rocoso y del índice la resistencia en base a las tablas geomecánicas del ISRM, 1981. Para conocer la distribución espacial de los contactos se realizó una sección geológica-geotécnica (Fig. 13), donde se muestra la galería minera a 50° (rebaje) que produjo la chimenea de colapso y la interpretación en función de las banderas geológicas - geotécnicas (columnas geomecánicas) compuestas por litología, RQD% y el RMR básico que en conjunto permiten una mejor definición del modelo.



**Figura 13:** Modelo geológico-geotécnico en el sector de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”. Sección entre los sondeos

El modelo geológico-geotécnico, definido entre los perfiles de las perforaciones PE-01, PE-04, PE-05 y PE-06, tiene una línea de corte de longitud aproximadamente de 100 metros, con dirección NNE-SSW, que muestra la interpretación desde la cancha de básquet (PE-01, cota ±1206) hasta la intersección entre las calles Ernesto A. Castro y Colón (PE-05, cota ±1193). Esta sección muestra la gradación de resistencia y calidad del macizo rocoso aumentando desde la superficie hacia el subsuelo. La roca de menor resistencia denominada como suelo arcilloso (Litología A) y representada en la sección con el color amarillo (Roca altamente meteorizada, Grado IV-VI, ISRM, 1981) se encuentra sobreyaciendo al saprolito de color gris, la potencia de este nivel disminuye de norte a sur, variando aproximadamente entre 14 m (norte) y 5 m (sur), donde su resistencia a la compresión simple varía entre suelo firme a suelo rígido, 0.05 MPa y 0.25 MPa. Además, para delimitación se utilizó el criterio de calidad del macizo rocoso definido entre roca Clase IV-V.

Las litologías B y C, muestran las características de una roca completamente a fuertemente meteorizada, definidos en la sección con tonalidades grises claras. En conjunto la potencia de estos dos niveles varía entre 15 m a 30 m, la resistencia a la compresión simple se encuentra en el rango de roca blanda a moderadamente dura, 0.25 MPa a 50 MPa.

Finalmente las litologías D y E, están definidas por el aumento paulatino de su resistencia, en estos niveles la

roca muestra una ligera meteorización incluso se observa que la roca se presenta fresca y maciza, donde las discontinuidades se presentan cerradas con ocasionales rellenos de minerales blandos. La resistencia a la compresión simple para estos niveles varía entre dura a extremadamente dura, 50 MPa – 250 MPa (Fig. 13).

### CONCLUSIONES

- En la zona de estudio se identifican 3 unidades litológicas; la más profunda, U. Volcánica, compuesta por andesitas verdes y brechas. U. Saprolito, macizo rocoso con fuerte meteorización, cuya potencia promedio es hasta 10 m. La más superficial, U. Arcillas, de coloración café amarillentas, altamente plásticas con humedad.
- El levantamiento estructural en subterráneo, indica que la principal familia de discontinuidades presenta un rumbo sub paralelo al sistema de fallas Piñas Portovelo, cuya dirección es NNW-SSE.

- La caracterización geológica - geotécnica del sitio de hundimiento, permitió la definición de cinco clases de litotipos, que en orden secuencial de superficie a subsuelo corresponden a: **Litotipo A**, comprende un suelo arcilloso café amarillento con RCS de 0.05 a 0.25 MPa y una calidad geotécnica variable RMR de IV y V. **Litotipo B**, comprende un saprolito gris areno arcilloso con RCS de 0.10 a 0.25 MPa y una calidad geotécnica variable RMR de III, IV y V. **Litotipo C**, se compone de rocas con fuerte meteorización con RCS de 1 a 50 MPa y una calidad geotécnica variable RMR de III y IV. **Litotipo D**, rocas con ligera meteorización con RCS de 5 a 100 MPa y una calidad geotécnica variable RMR de II, III y IV. **Litotipo E**, comprende rocas de baja meteorización a rocas sanas con RCS de 50 a 250 MPa y una calidad geotécnica variable RMR de II y III.

- El análisis hidrogeológico en interior de mina (galerías) y la caracterización geotécnica del macizo rocoso a través de las perforaciones exploratorias y galerías desde el denominado nivel Chorrillos L1/3 (cota±1047 msnm), evidenció la infiltración de agua por medio de estructuras geológicas (fallas y diaclasas) que afectan la calidad del macizo rocoso expresándose en las valoraciones de calificación RMR de Bieniawski.

### 6. DISCUSIONES

De la investigación de alcance (geofísica, hidrogeología, movimientos en masa) y la investigación geológica – geotécnica del área de hundimiento, se desprende la identificación de varios factores condicionantes y desencadenantes que

inciden en la estabilidad de suelo y macizo rocoso, mismos que produjeron inicialmente una subsidencia del terreno y posterior hundimiento en la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”.

En la Tabla 11 se sintetizan estos factores, su incidencia e identificación *in situ*.

**Tabla XI**  
Factores condicionantes y desencadenantes identificados en el área de hundimiento de la Unidad Educativa “La Inmaculada Fe y Alegría”

FACTORES	INCIDENCIA	IDENTIFICACIÓN INSITU	
CONDICIONANTES	Litología	Densidad, resistencia, comportamiento hidrogeológico	- Peso específico: 27 kN/m <sup>3</sup> promedio de Toba y Brecha volcánica, Andesitas. - Resistencia a la compresión simple muy variable. Sapolito hasta los 20 metros de profundidad se comporta como suelo firme a suelo rígido, 0.05 MPa y 0.25 MPa. - Cambios litológicos (zonas de debilidad)
	Estructura Geológicas	Resistencia, deformabilidad, comportamiento de las discontinuidades, zonas de debilidad	- Tres familias de diaclasas y una aleatoria (D1: 81/51, D2: 244/47, D3: 134/82, D4: 178/70). - Fallas y Cizalla (58/58) y Veta (60/70). Las estructuras falla + veta posición desfavorables a la dirección de la galerías mineras. - Las discontinuidades forman cuñas en el techo de galerías
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico, generación de presiones intersticiales	- El Nivel freático medido en piezómetros se ubica entre 18 a 20 metros.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, generación de zonas de debilidad	- Entre 0-10 m: roca completamente meteorizada. - Entre 10-25 m: roca completamente a altamente meteorizada. - Mayor a 25 m ligeramente meteorizada a sana.
	Carga Litostática	Distribución del peso del terreno	- Carga vertical : 900-1300 kPa
DESENCADENANTES	Precipitaciones y cambio en las condiciones hidrológicas	Variación de las presiones intersticiales, aumento peso del terreno, saturación de suelos, erosión, disminución de parámetros resistentes (cohesión ángulo de fricción)	- Invierno en Zaruma desde noviembre hasta mayo. - Colapso 25 de octubre. - Aumento progresivo del área de hundimiento de 8 a 25 metros por temporada invernal. - Precipitación media mensual es de 300 mm, considerando un periodo de 30 años (Anuarios INAMHI, 1982-2011). - Falta de sistema de alcantarillado, sistemas de agua potable con fugas.
	Cargas Estáticas	Peso adicional, cambio del estado tensional, deformación del terreno	- Peso de la infraestructura de la U. E. La Inmaculada
	Cargas Dinámicas	Aceleración sísmica, disminuye la resistencia al corte, aumento de presión de poro, relajamiento del macizo rocoso, cambio estado tensional	- Microsismos generados por la aplicación de cargas explosivas (voladuras) en actividad minera ilegal bajo el casco urbano de Zaruma.
	Excavaciones mineras	Baja cobertura, deformación del terreno, excavaciones en roca de resistencia baja, excavaciones anti-técnicas	- Excavación de galerías mineras hasta niveles superiores (cota: ±1153), dejando un colchón de roca (pilar) entre 40-60 m. - No se usa sostenimientos (entibado, cerchas, pernos, etc) que suministren un soporte técnico a las galerías mineras.

Se realizó la caracterización geotécnica del sitio de obra, en la cual se identifican cinco clases de litotipos; el litotipo A, comprende suelo arcilloso café amarillento. El litotipo B, comprende un sapolito gris arenoso arcilloso. El litotipo C, se compone de rocas con fuerte meteorización. El litotipo D, rocas con ligera meteorización. El litotipo E, rocas de baja meteorización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Winckell, R. Marocco, T. Winter, C. Huttel, P. Pourrut, C. Zebrowski & M. Sourdat, “Los Paisajes naturales del Ecuador: las condiciones generales del medio natural”, Quito, 1992.

[2] A. Egúez, & O. Poma, “La Cuenca Alamor-Lancones en el contexto geodinámico de los Andes de Huancabamba, SO Ecuador”. Cuartas Jornadas en Ciencias de la Tierra, Memorias. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador, pág. 19-22, 2001.

[3] C. Crespo, “Estudio de la correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión del hormigón hidráulico de cemento Portland, empleando cementos y áridos comunes de la Ciudad de Cuenca”, Cuenca, 2018.

[4] Geoportal INIGEMM, 2016.

[5] INIGEMM, “Estudio multidisciplinario para la estabilidad del cono y chimenea de colapso de la Unidad Educativa La Inmaculada Fe y Alegría – Cantón Zaruma”. Quito, Ecuador, pág. 51-56, 59-92, 2017.

[6] INIGEMM, “Base de datos. shp, de movimientos en masa del Ecuador”, 2013.

[7] ISRM (International Society for Rock Mechanics), “Suggested method for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Geomech, pág. 51–60, 1985.

[8] M. Braja, “Principles of Geotechnical Engineering”. 5<sup>th</sup> Edition, Pacific Grove, California: Brooks/Cole, 2002.

[9] Z. T. Bieniawski, “Engineering rock mass classifications”. Editorial John Wiley, New York, pág. 251, 1989.

[10] Z. Cifuentes & Doris Liliana, “Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos”. Magister en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Unidad Académica de Geotecnia. Pág. 36, Bogotá, 2011.

[11] Norma ASTM D1586. “Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils”. Standard by ASTM International, 12/01/2018.