



Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador¹

Terrain instability in areas of mining activity: case Zaruma city, Ecuador

Aldo Onel Oliva González² Alex Fernando Ruiz Pozo³ Romel Jesús Gallardo Amaya⁴

Para citar este artículo: Oliva, A., Ruíz, A. y Gallardo, R. (2017). Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador. *Revista Redes de Ingeniería*, 8(2), 69-81, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.12116>.

Recibido: 3-junio-2017 / Aprobado: 18-enero-2018

Resumen

En este artículo se analiza el riesgo por inestabilidad del terreno en el área urbana de la ciudad de Zaruma (Provincia de El Oro, Ecuador) y los movimientos en masas de suelo y rocas que dicho fenómeno ocasiona, produciendo considerables impactos negativos en la economía, sociedad y medioambiente. Se describen las características geológicas, geotécnicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, tectónicas y, con especial énfasis, la actividad minera y el desarrollo urbano en la zona de estudio. Se evalúan los principales factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad del terreno para, finalmente, emitir criterios y recomendaciones dirigidos a reducir el riesgo como vía para prevenir o mitigar los impactos negativos de estos fenómenos.

Palabras clave: actividad minera, factores desencadenantes, inestabilidad del terreno, riesgo por inestabilidad.

Abstract

In this article terrain instability risk is analyzed for the urban area of Zaruma (El Oro Province, Ecuador) and the soils and rock mass wasting this phenomenon causes, producing considerable negative impacts over the economy, society and environment. Geological, geotechnical, geomorphological, hydrogeological, tectonic and, with a special emphasis, mining activity and urban development in the area of study are described. Main conditioning and triggering terrain instability factors are evaluated, and criteria and recommendations are formulated to reduce risk, as a way to prevent or mitigate negative impacts from these phenomena.

Keywords: instability risk, mining activity, terrain instability, triggering factors.

1. Este artículo es el resultado de la colaboración entre el Grupo ITEICO Euroamericano (México, Ecuador), GIGMA (Grupo de Investigación de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia, y la Agencia para la Regulación y Control de la Minería de Ecuador (ARCOM).
2. Docente investigador, Universidad de las Californias Internacional (UDCI), México. Investigador del Grupo ITEICO Euroamericano. Correo electrónico: aldoneloliva@hotmail.com
3. Docente, Universidad de las Californias Internacional, México. Investigador del Grupo ITEICO Euroamericano. Correo electrónico: alex.ruiz@iteico.com
4. Docente investigador, director del Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente (GIGMA), Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia. Correo electrónico: rjgallardo@ufpso.edu.co

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad del terreno es el resultado de la combinación de condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y su modificación por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de precipitación y sismicidad.

En algunas regiones la actividad minera y el crecimiento urbano asociado a esta son factores desencadenantes de la inestabilidad en terrenos que no son debidamente controlados ni considerados en los planes de desarrollo por parte de las autoridades. En estas regiones, actividades relacionadas con la minería y el desarrollo urbano alteran el equilibrio natural del terreno y provocan fenómenos de inestabilidad como subsidencia, hundimientos, deslizamientos, entre otros. Las actividades mineras y urbanas de mayor impacto sobre la estabilidad del terreno son [1], [2]:

- La construcción de túneles y galerías subterráneas.
- Las actividades propias de la extracción de mineral como explosiones, vibraciones, inyección de agua, etc.
- La extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos.
- Remoción de la cubierta vegetal del terreno.
- Modificaciones de la pendiente natural del terreno debido a cortes y excavaciones.
- Aumento de las sobrecargas a causa de la construcción de edificaciones y obras de infraestructura.
- Descompresión del material de las laderas al quitarle soporte y presión lateral.
- Cambio en las condiciones del flujo natural (superficial y subterráneo) del agua a través de los materiales.
- Descenso de nivel freático.

Un ejemplo de inestabilidad del terreno en zonas mineras urbanas es el caso del poblado La Unión,

situado en la Sierra de Cartagena, provincia de Murcia, España, donde se presentan desde mayo de 1998 fenómenos de hundimientos y subsidencia minera en un área que supera el km² [3]. En el caso de Colombia se puede evidenciar la problemática de inestabilidad del terreno en zonas del municipio de Soacha en el departamento de Cundinamarca, donde las actividades de minería tradicional han llevado al desarrollo de procesos de urbanización que, en un determinado momento, han modificado las condiciones de uso del suelo, lo cual potencia la generación de problemas de estabilidad del terreno [4].

Antecedentes

La inestabilidad del terreno en la zona urbana de Zaruma resulta cada año en desprendimiento de masas de suelo y roca que, a su vez, produce grandes pérdidas materiales y daño considerable de estructuras e infraestructura, creando situaciones complejas de emergencia que no solamente son difíciles de manejar sino difíciles de prevenir.

La ciudad de Zaruma, se ubica en el sureste de la Provincia de El Oro, al suroeste del Ecuador (Figura 1) y constituye el principal asentamiento urbano del llamado Distrito Minero Zaruma-Portovelo.

El área urbana de Zaruma se asienta sobre una región con características geológicas, geotécnicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas complejas [5] y se encuentra sometida a una intensa actividad minera, estos factores no han sido debidamente controlados y, en muchos casos, no son considerados en la planeación del desarrollo minero y urbano del distrito. Como consecuencia, una parte importante de la población vive en zonas cercanas a explotaciones mineras subterráneas (activas e inactivas) y a las plantas de beneficio donde se realizan los procesos metalúrgicos para la recuperación del mineral [6].

La actividad antropogénica generada por la actividad minera, infraestructura urbana y la densidad de población, así como los factores geológicos,

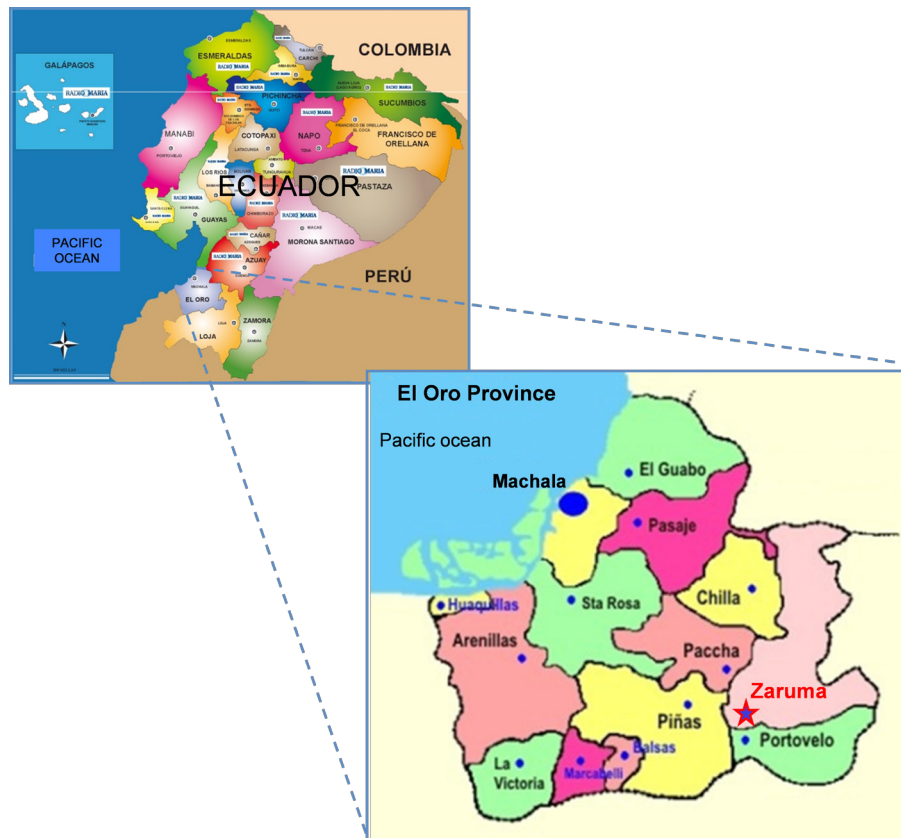


Figura 1. Localización geográfica de la ciudad de Zaruma.

Fuente: elaboración propia.

geotécnicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos de la zona, hacen que la inestabilidad del terreno sea una amenaza permanente y que el riesgo de ocurrencia de movimientos en masas de suelo y roca alcance niveles difíciles de predecir. En este trabajo se describe la problemática existente y se analizan sus principales causas.

MÉTODOS

La metodología de investigación y estudios realizados tuvieron como objetivos la identificación y caracterización de los principales fenómenos de inestabilidad del terreno en la ciudad de Zaruma, así como el análisis y evaluación de los factores condicionantes y desencadenantes de estos. Para cumplir los objetivos, se desarrollaron las siguientes fases o etapas de trabajo:

- Caracterización del entorno físico y social de zona de estudio e identificación de las principales problemáticas relacionadas con movimientos del terreno.
- Identificación y evaluación de los factores condicionantes de la inestabilidad. Se analizaron aspectos geológicos, tectónicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos que caracterizan la región y que influyen en el comportamiento de las masas de suelo y roca.
- Identificación y evaluación de los factores desencadenantes de la inestabilidad. Se analizaron de manera especial los aspectos relacionados con la actividad humana, con especial énfasis en la minería y el desarrollo urbano en el área de estudio.
- Interpretación y análisis de resultados.

Movimientos del terreno

La inestabilidad del terreno en el área objeto de estudio se manifiesta a través de diferentes tipos de movimientos en masas de suelo y rocas, siendo los más frecuentes los hundimientos, subsidencias, deslizamientos, reptaciones, desprendimientos y caídas de rocas, así como la combinación de algunos de ellos (Figura 2).

Factores condicionantes y desencadenantes

De acuerdo con datos de la Agencia para la Regulación y Control de la Minería de Ecuador (ARCOM), alrededor de quince movimientos han sido registrados en el área urbana de Zaruma. Investigaciones indican que esos movimientos de masas

de desechos de suelos y rocas se deben a una combinación de factores que, en general, pueden ser divididos en dos grupos: factores condicionantes y factores desencadenantes [7], [8].

Los factores condicionantes, relacionados con las características intrínsecas particulares de los suelos, taludes en roca o ladera, corresponden a características físicas naturales como morfología, topografía, geología, suelos, actividad tectónica y condiciones hidrogeológicas, solo para mencionar los factores más relevantes en la región estudiada.

Los factores desencadenantes que pueden afectar significativamente la estabilidad están relacionados con las características y condiciones de los suelos, rocas, taludes o laderas donde se localiza el área

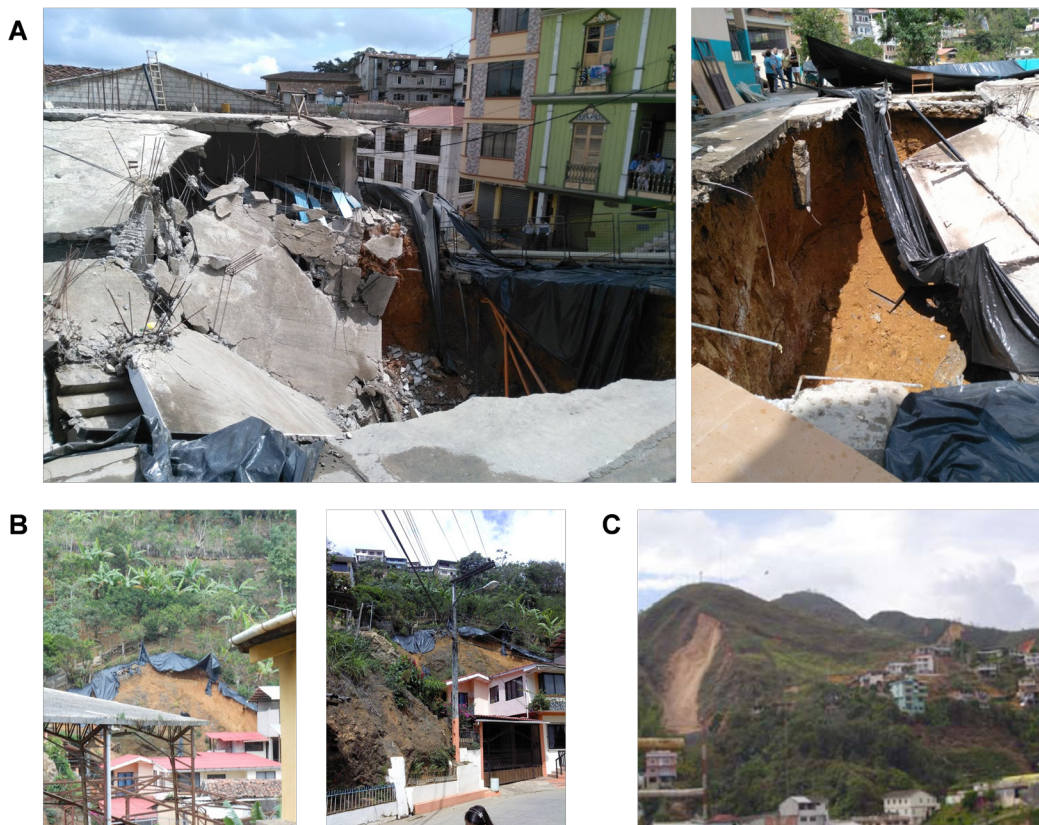


Figura 2. Algunos movimientos del terreno en el área de estudio. (a) Daño por subsidencia en el colegio La Inmaculada; (b) deslizamiento en el barrio Colon; (c) deslizamiento en la ladera del Calvario.

Fuente: elaboración propia.

afectada, tales como lluvias, movimientos sísmicos y actividad humana [2], [9], [10], con especial énfasis en la actividad minera y el desarrollo urbano.

RESULTADOS

A continuación, se describen los principales factores que afectan la estabilidad del terreno en el área urbana de la ciudad de Zaruma.

Factores condicionantes de inestabilidad del terreno

Geología

La ciudad de Zaruma se ubica en la cordillera occidental del Ecuador, constituida por rocas metamórficas del macizo Amotape-Tahuin en la parte

sur y rocas metamórficas y volcánicas del terreno Chaucha en la parte norte [11].

La geología de la región tiene como basamento premesozoico el llamado Complejo Metamórfico El Oro, que se encuentra dentro del Grupo Saraguro —dominantemente volcánico calco-alcalino—. El sistema Zaruma-Portovelo está delimitado al norte y sur por dos fallas principales de rumbo noroeste: la Falla de Piñas (con varios lineamientos subparalelos, al sur de Piñas y Portovelo) y la Falla Puente Busa-Palestina (con trazo entre Malvas y Arcapamba). Las mineralizaciones están alojadas en vulcanitas intermedias a silíceas de la Unidad Portovelo [12], que está fallada contra las rocas metamórficas del sur a lo largo del sistema de fallas Piñas-Portovelo, con estructuras de rumbo norte-sur (Figura 3).

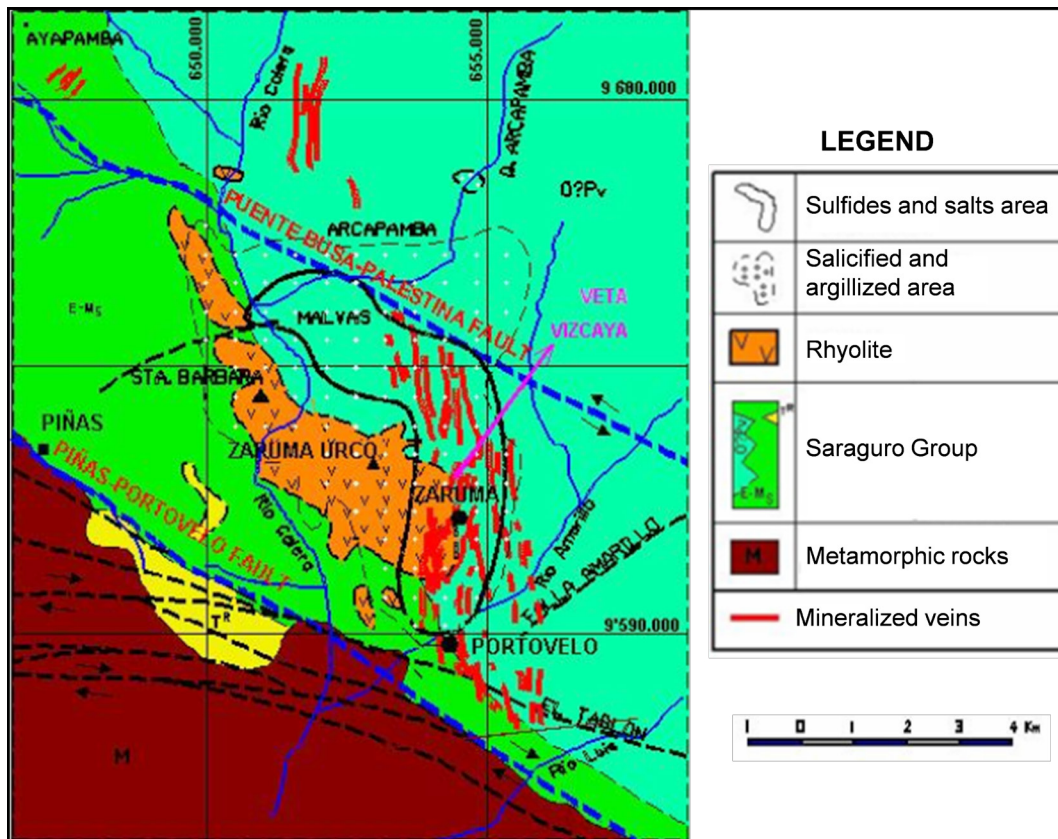


Figura 3. Mapa de la geología local.

Fuente: Modificado de [13].

Según los resultados de ensayos y análisis geotécnicos, las rocas predominantes en la zona de estudio se caracterizan por un alto grado de meteorización, diaclasamiento muy intenso y calidad de mala a muy mala. Estas características, constituyen importantes factores condicionantes del riesgo por inestabilidad del terreno en la zona.

Terreno

La columna estratigráfica de las zona urbana y suburbana de Zaruma está formada por diferentes suelos y rocas que se pueden clasificar en cinco grupos: depósitos y terrazas aluviales, depósitos coluviales, lavas riolíticas, andesíticas y andesítico-basálticas, andesítico, y brechas de anfibolita.

Los depósitos superficiales que se encuentran en la zona de estudio se pueden agrupar en tres unidades geotécnicas. La primera unidad está conformada por suelos constituidos por sedimentos limosos y arenosos, la segunda unidad corresponde a suelos arcillosos húmedos y la tercera unidad la forman suelos areno-arcillosos (Figura 4). Dichas unidades se caracterizan además por espesores de estratos que varían entre 1m y 6m.

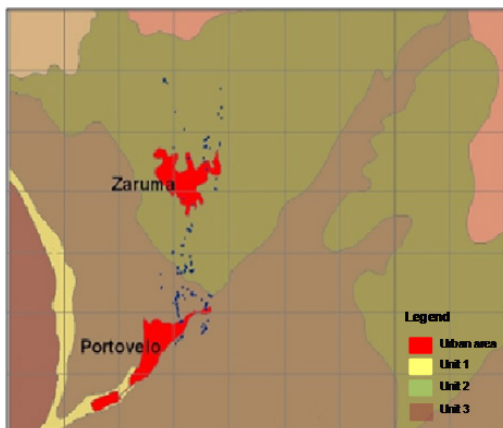


Figura 4. Mapa de unidades geotécnicas.

Fuente: Modificado de [14].

En la Tabla 1 se presenta la clasificación y descripción de los suelos predominantes en cada unidad geotécnica.

Tabla 1. Suelos predominantes en el área urbana de Zaruma.

Unidad Geotécnica	Clasificación de suelos (SUCS)	Descripción
Primera unidad	ML – SC	<ul style="list-style-type: none"> • Limos arenosos color café, humedad 20%, grado de plasticidad alto. • Arenas arcillosas, color amarillo-gris, humedad 10%, grado de plasticidad medio. • Limos arenosos, color amarillo-gris, humedad 28%, grado de plasticidad alto.
Segunda unidad	CH – MH	<ul style="list-style-type: none"> • Limos arenosos, color rojo, humedad 30%, grado de plasticidad alto. • Limos arcillosos, color café, humedad 23%, grado de plasticidad alto. • Arcillas limosas, color café, humedad 26%, grado de plasticidad alto. • Limos arcillosos, color café, humedad 25%, grado de plasticidad alto.
Tercera unidad	CH – CL	<ul style="list-style-type: none"> • Arcillas limosas, color gris-rojo, humedad 34%, grado de plasticidad alto • Arcillas arenosas, color rojo-café, humedad 13%, grado de plasticidad alto.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de estudios geotécnicos del terreno en superficie indican que predominan los suelos residuales, los cuales clasifican como suelos finos del tipo limos y arcillas. Dichos materiales, son muy susceptibles a la inestabilidad y en ellos se presentan con mucha frecuencia movimientos como hundimientos, subsidencias, deslizamientos y flujos [15].

Tectonismo y geología estructural

La geotectónica de la parte septentrional de los Andes (*North Andean Block*) está controlada por el mecanismo de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, en un borde convergente de cortezas oceánica y continental (Figura 5).

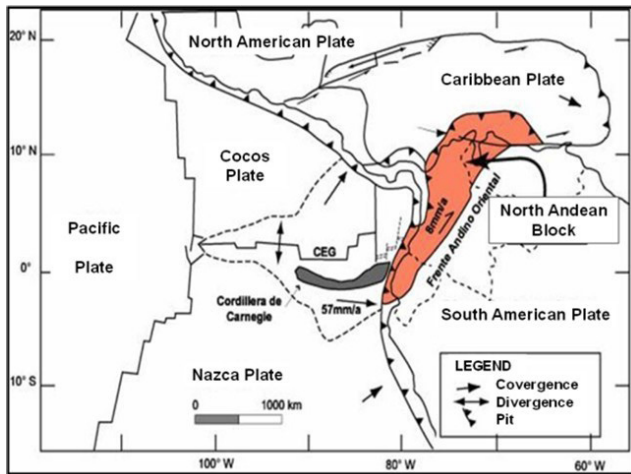


Figura 5. Esquema de la geodinámica actual de Ecuador.

Fuente: Modificado de [16].

Como se observa en la Figura 5, en las costas ecuatorianas la placa oceánica se desplaza en sentido oeste-este y lleva consigo la cordillera de Carnegie que se subduce a 57 mm/a, con un azimut de -100° .

Los principales rasgos estructurales en la zona lo constituyen los sistemas de fallas Piñas-Portovelo y el llamado Puente Buza-Palestina (Figura 3) [12], [17]. El primer sistema, es una falla de cabalgamiento en una longitud de 40 km con un azimut aproximado de 295° , que separa al Grupo Saraguro del Complejo Metamórfico de El Oro, al sur. El desplazamiento del Grupo Saraguro al oeste de Zaruma indica un salto vertical de al menos 3 km entre Piñas y Zaruma. Mientras que al oeste de Piñas, la falla aparece con buzamiento alto, entre Piñas y Salatí y al este de Portovelo, es un cabalgamiento con tendencia al sur, buzando al norte. La falla Puente Buza-Palestina sigue un rumbo paralelo a la Falla Piñas-Portovelo, con una extensión aproximada de 10 km.

La respuesta al mencionado marco tectónico se traduce en sismicidad, deformación, fracturación y fallamiento, acompañados frecuentemente por debilitamiento de masas de suelo y roca sometidas a esfuerzos de origen natural. La actividad sísmica, a veces imperceptible (microsismicidad) puede ser

indicativo de movimientos a diferentes profundidades de la corteza terrestre, los cuales, cuando exceden una cierta magnitud, desencadenan el debilitamiento de masas de suelo y roca.

Geomorfología

El área de estudio se ubica en la provincia geomorfológica de "La Sierra", específicamente dentro de la unidad fisiográfica cordillera occidental. Zaruma se localiza a su vez en la unidad geomorfológica vertiente occidental, con elevaciones variables entre 615 y 1730 msnm.

Zaruma se asienta en la cordillera divisoria entre los ríos Calera y Amarillo, de relieve abrupto con drenaje gobernado por el fracturamiento tectónico (Figura 6). Los depósitos de pie de monte, representados principalmente por cono de eyección, muestran pendientes generalmente menores que 40%. Sobre las rocas cristalinas se desarrollan relieves heterogéneos de moderados a fuertes, disectados con vertientes rectilíneas y abruptas, cuyas pendientes varían entre 40% y 70% [13].

La morfología de la región donde se ubica la ciudad de Zaruma hace que más del 50% de las áreas urbana y suburbana estén situadas en un relieve muy accidentado, el cual va desde los 600 msnm en las márgenes del río Amarillo hasta los 1250 msnm en el centro de Zaruma. Esto, unido a las características geológicas, geotécnicas y tectónicas descritas anteriormente, genera un alto riesgo de inestabilidad del terreno en la zona.

Hidrografía e hidrogeología

El principal sistema hidrográfico de la zona está formado por los ríos Calera y Amarillo (Figura 7). La subcuenca del río Calera pertenece a la cuenca del río Amarillo y ambos presentan un flujo de aguas constante durante todo el año, aportando un caudal promedio de 22.98 m³/s al unirse en un sector al suroccidente de la ciudad de Portovelo.



Figura 6. Vista panorámica de la ciudad de Zaruma. (a) Vista hacia el río Calera; (b) vista desde el río Amarillo

Fuente: elaboración propia.

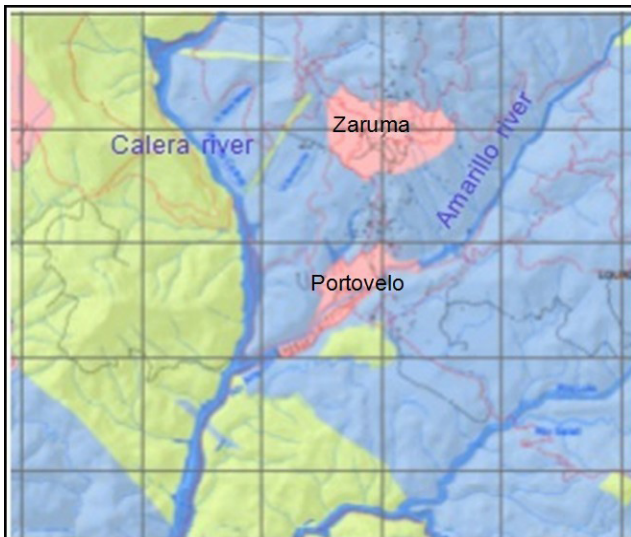


Figura 7. Detalle de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio.

Fuente: Modificado de [18].

De acuerdo con la información proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la zona se caracteriza por la ocurrencia de altas precipitaciones principalmente entre los meses de febrero y abril, con registros de hasta 1229 mm/año.

El sistema hidrogeológico Zaruma-Portovelo se puede definir como un acuífero tipo fisurado-libre-interior que se caracteriza por una zona de saturación condicionada por las grietas que sirven de conductos en el interior del macizo rocoso

(Figura 8). Como promedio, en la zona de Zaruma, los niveles freáticos se encuentran a 5m de profundidad, pero los socavones, grietas y galerías mineras ubicadas en cotas menores se convierten en conductos de drenaje que, en algunos lugares, hacen descender considerablemente los niveles de agua [19].

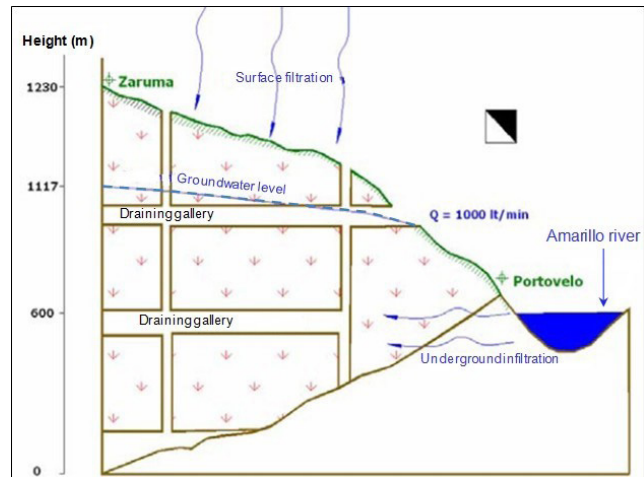


Figura 8. Esquema del sistema hidrogeológico en Zaruma-Portovelo.

Fuente: Modificado de [16].

La porosidad y el fisuramiento de los suelos y rocas de la zona, así como el sistema de galerías mineras, afectan de manera significativa el movimiento del agua superficial y subterránea, produciendo un aumento considerable del riesgo por inestabilidad del terreno.

Factores desencadenantes de inestabilidad del terreno

Los principales factores desencadenantes de la inestabilidad del terreno en el área urbana de Zaruma, están relacionados con la actividad humana generada, fundamentalmente, por la minería y el desarrollo urbano.

Actividad minera

El desarrollo económico de Zaruma se basa fundamentalmente en la actividad minera, de esta depende directa o indirectamente el 65% de la población económicamente activa. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de explotación y procesos para la extracción del mineral se realizan de forma antitécnica y constituyen factores desencadenantes de inestabilidad del terreno, además de producir impactos negativos sobre el medioambiente.

El distrito minero Zaruma-Portovelo cuenta con un amplio sistema de vetas longitudinales de

oro-polimetálico, alineadas a lo largo de una estructura de rumbo norte-sur. La extracción histórica del mineral se concentró en la parte sur del sistema (Portovelo), se caracteriza por el alto grado de oro, sin embargo, actualmente las explotaciones continúan desarrollándose hacia el norte, en dirección a la ciudad de Zaruma. Según la *Agency of Mining Regulation and Control of Ecuador* (ARCOM), en los sectores de Zaruma y Portovelo existen 128 minas, de las cuales 97 se encuentran con labores mineras activas y 31 están inactivas o abandonadas (Figura 9).

Durante más de 80 años (desde 1896 hasta finales de los 70), las compañías *South American Development Company* (SADCO) y *Compañía Industrial Minera Asociada* (CIMA) desarrollaron la explotación minera subterránea utilizando los sistemas corte y relleno (*cut and fill*), cámaras y pilares (*room and pillar*) y cámara almacén (*storage room*) [21], generando cientos de kilómetros de galerías y gran cantidad de cámaras, pilares y rellenos en el interior de las minas.

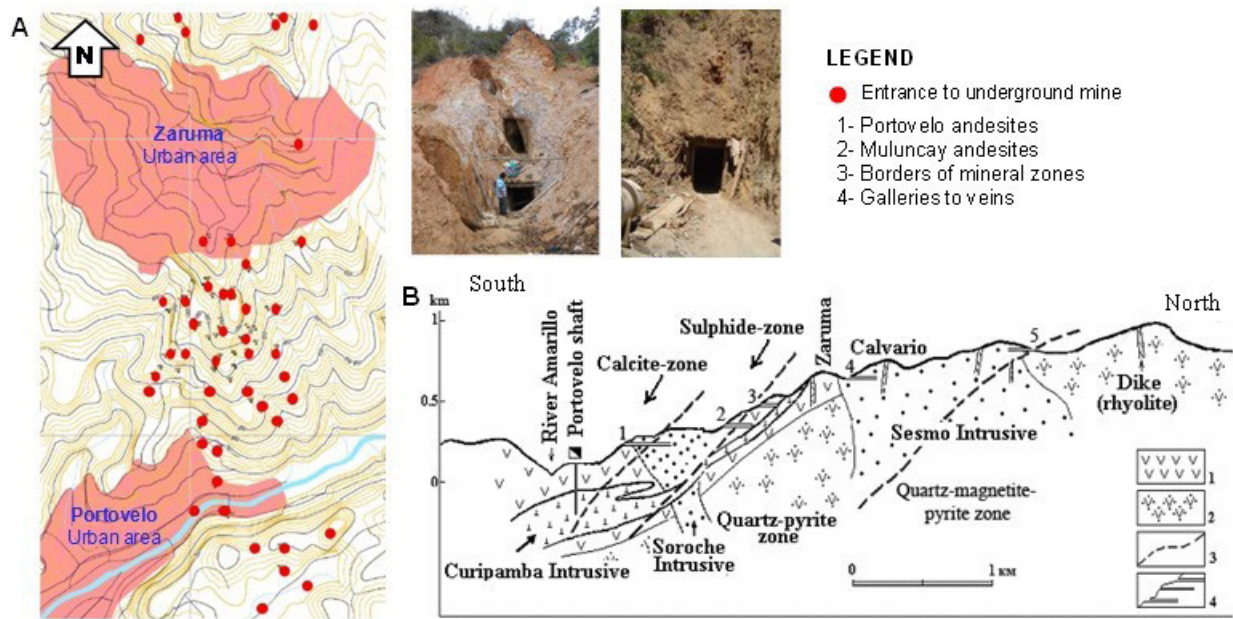


Figura 9. Detalle de la minería en el área. (a) Entrada a minas subterráneas; (b) sección longitudinal simplificada de la explotación minera Portovelo-Zaruma

Fuente: Modificado de [20].

Desde finales de los años 70 la pequeña minería y los mineros artesanales comenzaron a explotar muchas de las minas abandonadas por las compañías SADCO y CIMA. En la mayoría de los casos, estas explotaciones se realizan extrayendo el mineral de los pilares y del relleno que dejaron estas compañías, lo que afecta notablemente la estabilidad del macizo rocoso; además, la mayoría de las labores mineras no cuentan con un proyecto de explotación y, en consecuencia, se presentan las siguientes problemáticas:

- Los cortes del terreno para la construcción de las bocaminas se realizan sin considerar su influencia en la estabilidad de los taludes y laderas.
- La mayoría de las minas no cuentan con sistemas de sostenimientos en cámaras y galerías, y los que existen son insuficientes.
- Se realizan voladuras incontroladas que producen exceso de vibraciones en el terreno, provocando el colapso de galerías y cámaras.
- Los materiales estériles extraídos de las minas son depositados en escombreras a media ladera o en la corona de taludes, sin considerar su influencia en la estabilidad del terreno.

Dichas problemáticas son factores desencadenantes de la inestabilidad del terreno en superficie, se manifiestan con mayor frecuencia a través de fenómenos perturbadores como hundimientos, subsidencias y deslizamientos.

Desarrollo urbano

Además de los recursos minerales, Zaruma destaca por su actividad comercial, arte, arquitectura y tradiciones culturales. Estas cualidades la convierten en una ciudad atractiva, no solo para turistas, sino también para personas en busca de oportunidades que emigran desde diferentes regiones del Ecuador y se instalan de manera temporal o permanente en la ciudad y sus alrededores. Un análisis comparativo entre los datos del censo 2001

versus los datos del censo 2010, evidencia un incremento del 11.01% en la población del área urbana.

Es evidente que el desarrollo urbano de Zaruma está estrechamente vinculado a la actividad minera que se desarrolla en la zona desde la época de los preincas, pero que experimentó desde los años 70 un rápido y desordenado crecimiento, protagonizado por la pequeña minería y mineros artesanales [22]. Lo anterior, unido a la falta de planeación, produjo una acelerada y desordenada urbanización y, como consecuencia, proliferaron asentamientos poblacionales en el entorno de las minas y en terrenos inestables, al mismo tiempo que se desarrollaron explotaciones mineras en las áreas urbana y suburbana. Lo anterior ha propiciado que muchos barrios y comunidades hayan sido afectados por la inestabilidad del terreno y otros estén en riesgo de sufrir daños [23].

DISCUSIÓN

Las investigaciones y estudios realizados permitieron identificar y caracterizar los principales fenómenos de inestabilidad del terreno que se presentan en la ciudad de Zaruma, así como evaluar sus factores condicionantes y desencadenantes.

Se pudo constatar que fenómenos como hundimientos, subsidencias y deslizamientos y los factores que los producen no han sido debidamente controlados, en muchos casos, no han sido considerados en la planeación del desarrollo minero y urbano, por lo que una parte importante de la población vive en zonas cercanas a explotaciones mineras y a plantas metalúrgicas con alto riesgo de ocurrencia de movimientos en masas de suelo y roca.

Los resultados del trabajo permitieron concluir que los fenómenos de inestabilidad del terreno en la zona de estudio han experimentado un incremento en los últimos años y continuarán su tendencia

al alza si no se reduce el riesgo generado por los complejos escenarios geológicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, los cuales se incrementan con la intensa actividad minera y el desarrollo urbano derivado de ésta.

El análisis de la problemática relacionada con la inestabilidad del terreno en la zona de estudio y su relación con la actividad antropogénica generada por la actividad minera, infraestructura urbana y densidad de población, forma parte de acciones encaminadas a la evaluación y reducción del riesgo en los distritos mineros del Ecuador, y sus resultados constituyen una valiosa herramienta de prevención-mitigación para las comunidades y autoridades responsables.

CONCLUSIONES

La actividad minera y el desarrollo urbano resultado de esta, propician fenómenos de inestabilidad del terreno que traen consigo considerables problemas económicos, sociales y legales por los daños que causan directamente sobre las propiedades y en la infraestructura, además de poner en riesgo la vida de las personas.

En el área urbana de Zaruma se presenta una combinación de condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas complejas, y la modificación de estas por procesos geodinámicos, la ocurrencia de fenómenos perturbadores como las intensas lluvias y la intensa actividad humana generada por la minería y el desarrollo urbano. Este escenario, ha propiciado que manifestaciones de la inestabilidad del terreno como hundimientos, subsidencias y deslizamientos hayan experimentado un incremento en los últimos años y continúen su tendencia al alza sino se reducen los riesgos generados por los factores condicionantes y desencadenantes que se describen en este trabajo.

Es evidente la necesidad de medidas estructurales y no estructurales para evitar o reducir los

impactos negativos de los movimientos en masas de suelo y roca. Las primeras, encaminadas a la intervención física de la amenaza dada por la inestabilidad del terreno y las causas que la generan, así como de la vulnerabilidad de los elementos expuestos mediante obras de ingeniería y sistemas de monitoreo para proteger las estructuras e infraestructuras, la población y sus bienes; por otro lado, las medidas no estructurales dirigidas al ordenamiento y control de la minería, el fortalecimiento institucional, la educación y la preparación de la comunidad.

REFERENCIAS

- [1] L. I. González, M. Ferrer, M. L. Ortuño y C. Oteo, *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall, 2002.
- [2] O. A. Cuanalo, A. O. Oliva y R. J. Gallardo, "Inestabilidad de laderas. Influencia de la actividad humana", *Revista Elementos (Ciencia y Cultura)*, vol. 18, no. 84, pp. 39-46, 2011.
- [3] R. Tomás, G. Herrera, J. Delgado y F. Peña, "Subsidencia del terreno", *Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 17, no. 3, pp. 295-302, 2009.
- [4] Y. Calderón, "Relaciones entre las amenazas naturales por movimientos en masa asociadas a la minería tradicional, con los procesos de urbanización en el municipio de Soacha Cundinamarca", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/45793/>
- [5] I. Vikentyev, R. Banda, A. Tsepin, V. Prokofiev and O. Vikentyeva, "Mineralogy and formation conditions of Portovelo-Zaruma gold-sulphide vein deposit, Ecuador", *Geochemistry, mineralogy and petrology*, no. 43, pp. 148-154, 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237828662_Mineralogy_and_Formation_Conditions_of_Portovelo-Zaruma_Gold-Sulphide_Vein_Deposit_Ecuador

- [6] M. Cortázar y J. Lavanda, *Portovelo: cuenta su historia*. Ecuador: Imprenta de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, 2008.
- [7] O. A. Cuanalo, A. O. Oliva y C. González, "Estabilidad de laderas. Análisis mediante factores de valuación", *Revista IngeoPres*, no. 164, pp. 38-44, 2007.
- [8] O.A. Cuanalo y A. O. Oliva, *Inestabilidad de laderas. Deslizamientos y factores desencadenantes*. España: Editorial Académica Española, 2011.
- [9] A. O. Oliva, A. R. Navarro, R. M. Salgado, C. G. Nicieza and M. I. A. Fernández, "Urban Development and Human Activity as Factors in Terrain Instability in Tijuana", *Engineering Failure Analysis*, vol. 19, pp. 51–62, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.09.005>
- [10] A. O. Oliva, D. Mascareño Jiménez, I. N. Álvarez García, C. González Nicieza y A. E. Álvarez Vigile, "Hillside instability in the Tijuana Metropolitan Area. Analysis of Landslide-Provoked Building Collapse", *Engineering Failure Analysis*, vol. 46, pp. 166–178, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.004>
- [11] L. Pilatasig, D. Gordón, O. Palacios y J. Sánchez, "Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas", 2005. [En línea]. Disponible en: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA7/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/EL_ORO/SANTA_ROSA/IEE/1.%20Documentos/Pdf/2.%20Geopedolog%C3%ADa/2.1.%20Geomorfolog%C3%ADa/Mapa%20binacional/MEMORIA%20RESUMIDA_BINACIONALAGOSTO.pdf
- [12] M. Correa, "Memoria técnica Mapa Geológico de La Cordillera Occidental Entre 3°-4° S. Escala 1:200.000", Instituto de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. Ecuador, 2015.
- [13] Sociedad ecuatoriana para la defensa del patrimonio geológico y minero, [En línea]. Disponible en: <http://sedpgym-ecuador.blogspot.com.co/2013/03/>
- [14] Ministerio de agricultura y ganadería, "Inventario cartográfico de la costa ecuatoriana", [En línea]. Disponible en: http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-06/09978.pdf
- [15] O. A. Cuanalo y A. O. Oliva, *Inestabilidad de laderas. Análisis Geotécnico y Evaluación de Riesgos*. España: Editorial Académica Española, 2012.
- [16] C. Pesantes, "Evaluación y Zonificación de Riesgos Geodinámicos en el Distrito Minero Zaruma-Portovelo", Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Guayaquil, Ecuador, 2007.
- [17] J. A. Aspdén, W. Bonilla y P. Duque, "The Oro Metamorphic Complex, Ecuador: Geology and Economic Mineral Deposits", *British Geological Survey*, no. 67, 1995.
- [18] INIGEMM, "Unidades hidrogeológicas del distrito minero Zaruma-Portovelo, escala 1:50.000, proyecto de investigación hidrogeológica e hidrogeoquímica en zonas mineras del Ecuador", 2012.
- [19] A. O. Oliva, y A. F. Ruiz, "Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo. Factores condicionantes y desencadenantes. Documento Técnico Grupo ITEICO Euroamericano, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/>
- [20] I. Vikentye, R. Banda, A. Tsepin, V. Prokofiev and O. Vikentyeva, "Mineralogy and Formation Conditions of Portovelo-Zaruma Gold-Sulphide Vein Deposit, Ecuador", *Geochemistry, mineralogy and petrology*, no. 43, pp. 148-154, 2005.
- [21] C. López Jimeno, "Técnicas de explotación mineras", presentada en el Foro de Desarrollo Minero Sostenible, Madrid, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.ifema.es/web/ferias/foro_minero/ponencias_2014/carlos_lopez_jimeno_comunidad_de_madrid_16jun.pdf
- [22] F. Sandoval, "La pequeña minería en el Ecuador. Report N° 75. Project Mining, Minerals

and Sustainable Development”, International Institute for Environment and Development (IIED), Inglaterra, 2001.

[23] S. Paladines, “Proyecto: Análisis de Vulnerabilidades a Nivel Municipal. Identificación del

Territorio del Cantón Zaruma”. Universidad Nacional de Loja. Ecuador. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/840/1/Perfil%20territorial%20%20ZARUMA.pdf>

