Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

CEGM

Carrera de Especialización en Geología Minera

Universidad de Buenos Aires
ARGENTINA

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

"Metalotectos y guías de prospección en el Distrito Minero Zaruma-Portovelo, provincia de El Oro, Ecuador: Aplicaciones y relevancias para la pequeña y mediana minería".

Autor: Geol. José Manuel Pérez

Directora: Dra. Liliana N. Castro

EXACTAS

2026

Departamento de Ciencias Geológicas

1 Contenido

Resumen 7
Abstract 7
1. Introducción 8
1.1.Contextualización y justificación del estudio 8
1.2.Justificación del estudio 8
1.3. Planteo del Problema 9
2. Objetivos 10
2.1. Objetivo general
2.2. Objetivos específicos
3 Materiales y métodos 11
3.1.Materiales
3.2.Métodos
4. Marco teórico 12
4.1.Definición y clasificación de metalotectos 13
4.2Importancia de los metalotectos en la exploración inicial 14
4.3.Conceptos de pequeña y mediana minería en Ecuador 14
4.3.1. Concepto de Pequeña Minería
4.3.2. Concepto de Mediana Minería
5. El Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP) 17
5.1.Marco geológico regional 16
5.1.1. Unidades geológicas del SO de los Andes ecuatorianos
5.2. Geología y metalogenia del DMZP 21
5.3. Identificación y caracterización de metalotectos en el DMZP 28
6. Métodos de exploración 39
6.1. Los metalotectos como guía de prospección y exploración 39
7. Métodos de explotación y tratamiento 41
7.1. Métodos de explotación 41
7.2. Procesos metalúrgicos 42
8. Impactos ambientales y socio-económicos de una eventual producción 44
8.1. Introducción
8.2.Línea de base ambiental 44
8.2.1. Línea de base ambiental del medio físico
8.2.2. Línea base ambiental del medio biótico
8.2.3. Línea de base socio-económica
8.3.Los conflictos socioambientales y percepción social de la minería 54
8.3.1 Marco conceptual de conflictos socioambientales mineros
8.3.2. Metodología de evaluación de impactos socioambientales
9. Plan de cierre de mina 63
9.1.Introducción

9.2 Marco normativo aplicable en Ecuador
10.Marco Legal y Normativo 74
10.1.Marco normativo minero-ambiental ecuatoriano 74
10.1.1. Principios rectores del marco normativo
10.2.Legislación minera vigente en Ecuador para pequeña y media minería 76
10.3 Normas técnicas y ambientales aplicables al Distrito Zaruma-Portovelo 78
11.Discusión y resultados 81
11.1. Interpretación de hallazgos principales. Comparación con estudios similares en otras regiones mineras 81
11.2.Implicancias de explotación a pequeña y mediana escala 83
11.3.Desafíos normativos y ambientales en el contexto local 84
11.4.Confección de una matriz FODA 85
11.5.Análisis del mercado internacional 87
11.5.1. Panorama del mercado internacional de metales preciosos
11.5.2. Posicionamiento de Zaruma – Portovelo en el mercado internacional
12.Recomendaciones 91
12.1.Para la gestión minera y ambiental 91
12.2.Para la política y regulación minera 92
12.3.Líneas futuras de investigación 94
13.Conclusiones 97
14.Agradecimientos 99
15.Referencias bibliográficas 100

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de distritos mineros y subdivisiones metalotectónicas del área centro oriental, perteneciente a la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo (FMZP) y localización de megaestructuras: Bulubulu (FB), Peltetec (FP), Girón (FGi), Baños (FBa), Jubones (FJ), Piñas-Portovelo (FPP). Tomado del distrito Azuay de PRODEMINCA (2000) 16
Figura 2. Mapa geológico regional del área suroeste de los Andes Ecuatorianos con localización de megaestructuras regionales: Fallas Pallatanga (FPA), Bulubulu (FB), Peltetec (FP), Baños (Fba), Jubones (FJ), Piñas-Portovelo (FPP); Estructuras Locales: Fallas Río Chico (FRCH), Culebrillas (FC), Río Tenguel (FRT), Gañarín (FG), La Tigrera (FLT), Cerro Azul (FCA), Chilla (FCH), Paccha (FPAC), Atahualpa (FA), Chinchilla (FCHI), Puente Buza-Palestina (FPBP), y sistemas de fallas Salvias-Guanazán (Fsg) y El Arí-Salvias (FEAS) dentro de la faja de mineralización Zaruma-Portovelo (FMZP). 19
Figura 3. Mapa geológico del Distrito Minero Zaruma-Portovelo con la ubicación de las series de rocas (b) Detalles de las vetas y fallas. Tomado de Billingsley (1926). 23
Figura 4. (a) Mapa geológico simplificado de Ecuador y ubicación de la zona seleccionada; y (b) mapas geológicos del yacimiento aurífero Zaruma-Portovelo con geología básica (rocas volcánicas e intrusivas), estructuras principales y vetas más importantes. Tomado de Berrezueta et al. 2016. 25
Figura 5. Paragénesis de las vetas del sector Minas Nuevas, O Nivel, ubicado en el distrito aurífero – polimetálico Portovelo – Zaruma. Tomado de Añazco 2017. 27

Figura 6. Mineralización y alteración epitermal de intermedia sulfuración de Zaruma-Portovelo, Ecuador. Tomado de Lomas et al. 2022. 32
Figura 7. El campo minero de Portovelo-Zaruma, suroeste de Ecuador: ambientes de pórfido y epitermales, mapa estructural simplificado. Tomado de Spencer et al. 2002. 33
Figura 8. Modelo de juntas de cizallamiento conjugadas o cizallas de Riedel aplicadas al distrito minero Zaruma-Portovelo. R = cizalla sintética, R' = cizalla antitética, X = fractura de cizallamiento, P = cizalla sintética secundaria, σ1 máximo aplicado desde los cuadrantes NO-SE a NNO-SSE, σ 3 esfuerzo principal mínimo. Tomado de Bonilla, 2010. 34
Figura 9. Caracterización mineralógica y petrográfica de las vetas Vizcaya, Octubrina y Gabi del yacimiento aurífero epitermal Zaruma-Portovelo, Ecuador. map geología simplificada + principales formaciones geológicas, estructuras y venas mineralizadas. Tomado de Berrezueta et al.2021…… ……..36
Figura 10. Dirección de flujo (flecha roja) de las asociaciones de minerales de alteración hidrotermal en el campo de los sistemas epitermales, veta vizcaya. Tomado de Corbett y Leach 1998**.** ..... ……..38
Figura 11. (a) Arreglo estructural de las vetas del distrito Zaruma-Portovelo y su relación con las fallas regionales. (b) Evolución espacial de las vetas y de las asociaciones minerales a lo largo del corredor Zaruma-Portovelo durante el enfriamiento del sistema hidrotermal. (c) Distribución de vetas y zonación de asociaciones de sulfuros en los sistemas en échelon del distrito Zaruma-Portovelo. Kalinaj 2004……..40
Figura 12. Esquema general de explotación subterránea MAPE en el distrito minero Zaruma - Portovelo. 43
Figura 13. Métodos de explotación y beneficio mineral en el DMZP. 44
Figura 14. Subcomponentes de la línea de base. 46
Figura 15. Paisaje y condiciones geomorfológicas del distrito minero Zaruma-Portovelo, con relieve montañoso, pendientes pronunciadas y fuerte influencia antrópica asociada a la actividad minera……..45
Figura 16**.** Fauna propia de los bosques montanos y subtropicales……47
Figura 17. Flora endémica del DMZP……48
Figura 18 Estructura de la línea base socioeconómica del DMZP. 49
Figura 19. Cultivos predominantes en la zona……53
Figura 20. Conflictos socioambientales en DMZP……55
Figura 21. Caracterización de los principales conflictos socioambientales……...56
Figura 22: Factores que influyen en la percepción positiva…… ..58
Figura 23. Percepciones sociales en DMPZ……59
Figura 24. Demandas sociales recurrentes…… 59
Figura 25. Principios metodológicos…… 60
Figura 26. Características del cierre de mina…… .65
Figura 27. Objetivos específicos del plan de cierre para Zaruma - Portovelo …… 66
Figura 28. Impactos sociales significativos……...67
Figura 29. Intervención geotécnica según prioridad…… 68
Figura 30. Estilo Arquitectónico de las casas de Zaruma e iglesia…… 80
Figura 31. Principales destinos de exportación de oro ecuatoriano…… 90

Índice de Tablas

Tabla 1. Diferencias principales entre pequeña y mediana minería……15
Tabla 2. Asociaciones paragenéticas de los sistemas mineralizados del Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP). Tomado de Bonilla 2010. 26

Tabla 3. Estructura productiva.....50
Tabla 4. Estructura ocupacional y sectores económicos del DMZP.....51
Tabla 5. Impactos sociales identificados.....56
Tabla 6. Principales contaminantes identificados en recursos hídricos del DMZP y sus efectos en la salud pública. Elaboración propia con base en informes técnicos del ministerio de ambiente y agua. Pérez, 2026. 57
Tabla 7. Estratificación de actores mineros en el DMZP según escala de producción y grado de formalización. Datos estimados con base en registros del ministerio de recursos naturales no renovables. Pérez, 2026. 57
Tabla 8. Distribución de percepciones sobre minería artesanal en comunidades ecuatorianas. Fuente: Ayala (2016), estudio en La Paz, Amazonía ecuatoriana. 58
Tabla 9. Matriz de identificación de componentes ambientales afectados por etapas y ASPI de la actividad minera en el distrito minero Zaruma–Portovelo. X indica interacción directa entre la acción susceptible de producir impacto y el componente ambiental. Elaboración propia con base en metodología de Leopold adaptada y en la materia Aspectos Ambientales..... 60
Tabla 10. Matriz de evaluación de impactos socioambientales en Zaruma–Portovelo. Valores expresados como M/I (Magnitud/Importancia) en escala 1–10. El signo negativo (-) indica impacto adverso y el signo positivo (+) indica impacto benéfico. Elaboración propia con base en metodología de Leopold adaptada.. 62
Tabla 11. Matriz de análisis de conflictos socioambientales en el DMZP: actores, interés, posiciones y mecanismos de resolución. Elaboración propia con base en información de fuentes gubernamentales y académicas. 63
Tabla 12. Indicadores ambientales 64
Tabla 13. Sistemas de indicadores para el monitoreo de la situación socioambiental en el DMZP. Líneas base estimadas con información disponible 2017-2020; metas propuestas al horizonte 2025. Elaboración propia. 64
Tabla 14. Inventario de instalaciones y pasivos ambientales en el DMZP. Tomado de ARCOM, 2025 66
Tabla 15. Actividades de estabilización geotécnica de labores subterráneas 68
Tabla 16 Procedimientos de desmantelamiento de plantas de beneficio..... 68
Tabla 17. Estrategias de remediación de depósitos de relaves según tipología. Elaboración propia. 69
Tabla 18. Técnicas de remediación de suelos contaminados. Elaboración propia..... 70
Tabla 19.Especies vegetales recomendadas para revegetación en DMZP. (Elti, n.d.)..... 71
Tabla 20. Cronograma de establecimiento de cobertura vegetal. Elaboración propia. 71
Tabla 21. Tecnología de tratamiento de efluentes mineros. 72
Tabla 22. Fases de implementación del plan de cierre. Elaboración propia..... 73
Tabla 23. Cronograma general de actividades de cierre (x indica período de ejecución). Elaboración propia. 73
Tabla 24. Monitoreo geotécnico post-cierre. Elaboración propia. 74
Tabla 25. Monitoreo de calidad de suelo en áreas rehabilitadas. Elaboración propia..... 74
Tabla 26. Monitoreo ecológico de áreas vegetales. Elaboración propia 74
Tabla 27. Alternativas de uso productivo del territorio post-cierre. Elaboración propia..... 75
Tabla 28. Clasificación de regímenes mineros en Ecuador (adaptado de la Ley de Minería Arts. 39-48).....77
Tabla 29. Autoridades competentes en el marco minero – ambiental ecuatoriano. 77
Tabla 30. Normas técnicas. mbientales aplicables a al DMZP 81
Tabla 31. Principales metalotectos identificados en el DMZP y su aplicación exploratoria. Elaboración propia. 83
Tabla 32. Comparación del DMZP con otros distritos epitermales análogos en América Latina. Elaboración propia. 83

Tabla 33. Principales desafíos de la pequeña y mediana minería en Zaruma – Portovelo. Elaboración propia. 85
Tabla 34. Matriz de evaluación de impactos socioambientales (Magnitud/Importancia, escala 1-10) en los componentes más críticos del DMZP. El signo negativo indica impacto adverso. Elaboración propia con base en la Tabla 10. 86
Tabla 35. Principales conflictos socio – ambientales en Zaruma – Portovelo 87
Tabla 36. Matriz FODA para pequeña y mediana minería en zaruma – portovelo basada en metalotectos. Elaboración propia 88
Tabla 37. Ventajas competitivas de DMZP en el mercado internacional. Elaboración propia. .. 91

Resumen

El presente trabajo final integrador analiza el Distrito Minero Zaruma – Portovelo (DMZP), en la provincia de El Oro, Ecuador, como un sistema geológico, minero, ambiental y socioeconómico de alta complejidad. El estudio se centra en la identificación y caracterización de los metalotectos y su utilidad como guías de prospección para la pequeña y mediana minería, considerando la importancia histórica y productiva del distrito, así como su relación con estructuras geológicas, alteraciones hidrotermales y estilos de mineralización epitermal. A partir de una revisión sistemática de literatura científica, normativa técnica y documentación institucional, se construye una visión integral del distrito, incorporando además la exploración, la explotación, el tratamiento de minerales y los principales impactos ambientales y sociales asociados a la actividad minera. El trabajo también examina la línea de base socioeconómica del territorio, la percepción social de la minería y las implicaciones de un eventual esquema de cierre de mina. Asimismo, se revisa el marco legal y normativo ecuatoriano aplicable a la actividad minera y ambiental. Se comparan las características metalogenéticas del distrito con otros sistemas epitermales análogos de América Latina. Finalmente, se formulan recomendaciones orientadas a mejorar la exploración, optimizar la gestión minera y ambiental, fortalecer la sostenibilidad de la pequeña y mediana minería, y promover un desarrollo territorial más seguro, eficiente y responsable en Zaruma – Portovelo.

Abstract

This comprehensive final thesis analyzes the Zaruma–Portovelo Mining District (DMZP), province of El Oro, Ecuador, as a highly complex geological, mining, environmental, and socioeconomic system. The study focuses on the identification and characterization of metallotectonic features and their utility as prospecting guides for small- and medium-scale mining, considering the district's historical and productive importance, as well as its relationship with geological structures, hydrothermal alterations, and epithermal mineralization styles. Based on a systematic review of scientific literature, technical regulations, and institutional documentation, a comprehensive overview of the district is constructed, incorporating exploration, mining, mineral processing, and the main environmental and social impacts associated with the mining activity. The study also examines the socioeconomic baseline of the region, public perceptions of mining, and the implications of a potential mine closure plan. It also reviews the ecuadorian legal and regulatory framework applicable to mining and environmental activities. Metallogenic characteristics of the district with other similar epithermal systems in Latin America are also compared. Finally, recommendations are formulated to improve exploration, optimize mining and environmental management, strengthen the sustainability of small- and medium-scale mining, and promote safer, more efficient, and more responsible territorial development in Zaruma–Portovelo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contextualización y justificación del estudio

La región minera Zaruma-Portovelo, ubicada en la provincia de El Oro al suroeste del Ecuador, constituye uno de los distritos más antiguos y productivos del país, reconocido por su intensa actividad aurífera desde hace más de un siglo (Enríquez-Almeida y Quezada-Ochoa, 2021). Este distrito se ubica en un área de gran relevancia, donde se localiza el Complejo Metamórfico de El Oro y la Unidad Portovelo, a los cuales se asocian de sistemas de vetas hidrotermales ricas en metales preciosos, principalmente oro, y metales base como plomo y cobre (Sánchez Padilla y Sánchez Zambrano, 2018).

A lo largo de los años, los estudios de metalotectos en Zaruma-Portovelo han permitido entender la distribución espacial y genética de los yacimientos minerales, considerando factores geológicos, litológicos y estructurales claves para su localización y explotación. Estos metalotectos, entendidos como elementos o asociaciones geológicas favorables para la concentración de metales, han guiado la exploración, permitiendo identificar vetas con características morfoestructurales distintivas como brechas, stockworks y texturas crustiformes que son el resultado de procesos hidrotermales asociados a eventos tectónicos transcurrentes y transtensivos (Bonilla Guevara, 2010d).

En el contexto de la pequeña y mediana minería, estos avances científicos y técnicos revisten especial importancia, pues la mayoría de las concesiones activas en Zaruma-Portovelo son operadas bajo estos regímenes. El conocimiento detallado de los metalotectos es fundamental para optimizar la exploración, incrementar la productividad y minimizar riesgos geotécnicos y ambientales en operaciones que, por su escala, suelen tener recursos y capacidades técnicas limitadas en comparación con la gran minería. Además, estudios recientes impulsados por instituciones nacionales como el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y universidades locales han enfocado sus esfuerzos en mejorar las condiciones técnicas de perforación y voladura, así como en realizar análisis geomecánicos y estructurales avanzados, dirigidos específicamente a operaciones de pequeña y mediana escala (Paredes, 2023; IIGE, 2022).

Así, la investigación sobre los metalotectos de Zaruma-Portovelo no sólo contribuye al avance científico y geológico del país, sino que resulta clave para promover el desarrollo seguro, eficaz y sostenible de la pequeña y mediana minería. De este modo, se facilita la apropiada caracterización y aprovechamiento de los recursos minerales, al tiempo que se fomenta la reducción de impactos negativos. Además, impulsa la generación de valor para las comunidades de la región, en armonía con la compleja geología regional y las dinámicas socioeconómicas locales (Paget et al., 2017; Enríquez-Almeida y Quezada-Ochoa, 2021).

1.2. Justificación del Estudio

El estudio de metalotectos y guías de prospección en este distrito es de suma importancia por varias razones:

- Optimización de la prospección y exploración**:** Los metalotectos constituyen indicadores geológicos que orientan la búsqueda y localización de cuerpos mineralizados. Un conocimiento actualizado y específico de los mismos permite desarrollar estrategias de prospección más eficientes, reducir riesgos y optimizar recursos, un aspecto crítico para la viabilidad de la pequeña y mediana minería.(Enríquez Almeida y Quezada Ochoa, 2021)
- Sustentabilidad y reducción de impacto**:** La actividad minera, especialmente en pequeña escala, enfrenta desafíos ambientales y técnicos que pueden mitigarse a través de técnicas modernas de prospección y reconocimiento de zonas mineralizadas económicamente rentables. La aplicación de guías de prospección ayuda a minimizar la explotación empírica y dispersa, favoreciendo una actividad más planificada y menos invasiva ambientalmente.(Instituto de Investigación Geológico y Energético y Paredes, 2023)
- Apoyo al sector productivo local**:** Para la pequeña y mediana minería, la disponibilidad de información metalogénica actualizada se traduce en mejores decisiones de inversión y operación, incrementando la productividad y disminuyendo la probabilidad de accidentes y pérdidas económicas. Esto es especialmente relevante en el contexto del distrito, donde la fluctuación de trabajadores y la rotación entre operaciones exige capacitación continua y buenas prácticas técnicas.
- Desarrollo científico y replicabilidad**:** El desarrollo y validación de modelos geológico-metalogénicos en Zaruma-Portovelo puede servir de referencia para otros distritos polimetálicos de Ecuador, contribuyendo al avance científico en la exploración minera nacional.

El estudio de los metalotectos y guías de prospección en el distrito Zaruma-Portovelo tiene relevancia no solo técnica y económica, sino también social y ambiental, constituyendo una base fundamental para el desarrollo sostenible de la pequeña y mediana minería en la región.

1.3. Planteo del problema

A pesar de la larga tradición minera en el distrito Zaruma-Portovelo y del relevante potencial aurífero de la región, la actividad sigue enfrentando importantes retos técnicos, sociales y ambientales relacionados con la identificación de cuerpos mineralizados y la correcta delimitación de zonas prospectivas. La carencia de una aplicación consistente de criterios metalogenéticos y guías de prospección adaptadas a la geología local ha contribuido a operaciones mineras poco planificadas, con consecuencias negativas para la productividad, la seguridad laboral y el entorno ambiental. (Toro y Mero, 2005).

En el Distrito Minero Zaruma – Portovelo, la actividad de pequeña y mediana minería se desarrolla en un contexto geológico, ambiental y social complejo, donde la limitada integración de criterios metalogenéticos y de herramientas técnicas de prospección ha dificultado la adecuada identificación y delimitación de zonas mineralizadas. Esta situación ha incidido en decisiones operativas poco planificadas, con efectos sobre la eficiencia productiva, la seguridad geotécnica y la gestión ambiental del territorio. Asimismo, la dispersión de información geológica y técnica, junto con la insuficiente incorporación de metodologías modernas de exploración, restringe la formulación de modelos predictivos aplicables al distrito y limita el aprovechamiento sostenible de los recursos minerales. (Maldonado Pineda, 2023)

En conclusión, el problema central reside en la insuficiencia de estudios integrales sobre los metalotectos y la escasa adopción de guías de prospección geológica y metalogénica en el Distrito minero Zaruma-Portovelo (DMZP), lo que limita la eficiencia y sostenibilidad de la pequeña y mediana minería, y perpetúa riesgos socioambientales en la región.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Analizar los metalotectos presentes en el Distrito minero Zaruma-Portovelo (DMZP), provincia de El Oro, Ecuador, para evaluar sus aplicaciones y su importancia en la exploración y aprovechamiento de recursos por parte de la pequeña y mediana minería, así como su influencia en la caracterización geológica regional.

2.2. Objetivos específicos:

- Identificar a partir de la revisión y análisis de literatura científica, los principales metalotectos del Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP), evaluando su génesis, distribución, geoquímica y su relación con las estructuras geológicas predominantes en la zona.
- Determinar el potencial de los metalotectos identificados para la optimización de la exploración y el aprovechamiento de yacimientos auríferos por parte de la pequeña y mediana minería.
- Analizar las principales implicancias ambientales asociadas a las actividades de exploración y explotación minera, vinculadas al aprovechamiento de zonas favorables definidas por metalotectos en el DMZP, considerando las medidas de gestión ambiental reportadas en la literatura y su contribución a la sostenibilidad y mitigación de riesgos.
- Examinar el grado de cumplimiento y aplicación de la normativa minera vigente en Ecuador en las actividades de exploración y explotación de metalotectos en el DMZP identificando desafíos y oportunidades para la mejora de la gestión minera local.
- Encuadrar dentro de los aspectos legales de Ecuador estas actividades
- Analizar el mercado global de estos metalotectos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Recopilación de artículos científicos con arbitraje en revistas indexadas, trabajos presentados en congresos, informes técnicos de organismos internacionales y tesis de maestrías o doctorados disponibles en repositorios académicos relacionadas con geología económica, metalogenia, minería y ciencias ambientales.
- Revisión de la legislación y normativa, minera y ambiental ecuatoriana, así como documentos oficiales relevantes del Ministerio de Energía y Minas del Ecuador y de entidades ambientales.
- Revisión de la cartografía geológica actualizada del Distrito Minero Zaruma-Portovelo, incluyendo mapas estructurales, litológicos y mineros.

3.2. Métodos

- Revisión sistemática de literatura: se empleará una metodología de revisión bibliográfica sistemática, comenzando con la definición de palabras claves y criterios de inclusión / exclusión para seleccionar las fuentes más pertinentes relacionadas con Metalotectos, geología regional y pequeña y mediana minería en el Distrito Zaruma-Portovelo.
- Análisis cualitativo de información: se realizará una lectura crítica y extracción de datos relevantes de cada fuente, sintetizando la información sobre metalotectos, distribuciones geológicas, potenciales mineros, impactos ambientales y gestión normativa vigente.
- Comparación de casos y modelos: se identificarán casos de estudios documentados en la literatura de otros distritos mineros con características similares, estableciendo comparaciones y extrayendo lecciones aplicables para el distrito minero Zaruma-Portovelo.
- Síntesis e interpretación: se organizarán los resultados en matrices temáticas que faciliten el análisis comparativo y la discusión, asegurando rigor metodológico y trazabilidad de la información.
- Propuestas y recomendaciones: basado en la evidencia revisada, se elaborarán alternativas de gestión y sugerencias para la mejora de la minería sostenible, la mitigación de impactos y el cumplimiento normativo en el área de estudio.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Definición y clasificación de metalotectos

Etimológicamente, el término proviene del griego (“metalleion” = mina, “tectos” = constructor). Sensu stricto, se trata de una guía antecedente: un factor que favorece o condiciona la génesis del yacimiento y su localización en asociación con aquel. En la práctica, se considera cualquier propiedad anterior, simultánea o posterior a la génesis del yacimiento que es favorable a su formación (metalotecto = guía): todo dominio espacial o temporal que, por su litología, propiedades físicas, quimismo, etc., o por su relación con otra causa (edad, clima, etc.) pueda albergar la formación de una concentración mineral (PDFCOFFEE, n.d.).

Un metalotecto es un factor, propiedad, proceso o característica geológica que favorece, condiciona o controla la génesis y ubicación de un yacimiento mineral, es decir, un elemento o conjunto de elementos del medio geológico litológicos, estructurales, geoquímicos, morfológicos, paleogeográficos, entre otros con los cuales está asociada una mineralización metálica de interés económico. No se limita únicamente a la ocurrencia simultánea con la mineralización, sino que pueden ser condiciones preexistentes (anterior), concomitantes (simultáneo) o posteriores a la formación del yacimiento. (De La Cruz Garcia, 2020)

Por ejemplo, una secuencia de rocas adecuadamente permeables y porosas puede actuar como metalotecto litológico, mientras que una gran falla regional que canalizó fluidos hidrotermales ricos en metales corresponde a un metalotecto estructural. El concepto de metalotecto se extiende incluso a la posición paleogeográfica como ambientes de cuenca reductora antigua propicios para precipitación de sulfuros de metales base y a anomalías geoquímicas específicas vinculadas a procesos de migración y concentración metalífera.

La identificación y caracterización de metalotectos es la base de múltiples modelos predictivos en exploración mineral, porque proporciona guías confiables para delimitar áreas prospectivas, establecer vectores de mineralización y optimizar la inversión en campañas exploratorias. Un metalotecto no sólo señala presencia potencial de mineralización, sino que permite comprender la lógica metalogenética de un distrito o provincia mineralizada, vinculando la evolución tectónica, magmática, sedimentaria, hidrotermal y geoquímica de un área con su potencial minero.

Se presenta una clasificación integral, con ejemplos y mecanismo de acción de cada tipo de metalotecto:

- *Metalotectos litológicos*: Incluyen unidades o formaciones de roca que, por su composición mineralógica, textura, reactividad o permeabilidad, constituyen los mejores “hospederos” para una mineralización determinada. Ejemplo: calizas para concentración de plomo-zinc; formaciones volcano sedimentarias para oro epitermal. (Docsity y De Re Metallica, n.d.)

- *Metalotectos estructurales*: Incluyen fallas mayores, zonas de cizalla, pliegues y sistemas de fractura, pues estas estructuras controlan la migración y deposición de fluidos mineralizantes. Un yacimiento emplazado en la intersección de grandes sistemas de fracturas suele responder a este control estructural. (SEGEMAR, n.d.)

- *Metalotectos geoquímicos*: Son zonas anómalas en su concentración de ciertos elementos o asociaciones de elementos, detectadas mediante análisis geoquímico sistemático en suelos, rocas

o aguas. Ejemplo: halos geoquímicos de As-Sb-Hg como diagnóstico de sistemas epitermales.

- *Metalotectos geomorfológicos*: Relacionados a paleoterrazas, canales fluviales antiguos, zonas de erosión diferencial, donde la morfología del terreno ha sido crucial para la concentración secundaria de metales (como en placeres auríferos).

- *Metalotectos hidrotermales/mineralógicos*: Incluyen zonas alteradas que presentan clorita, sericita, sílice o alunitización, y que suelen estar relacionadas a la actividad hidrotermal, con presencia de brechas y stockworks mineralizados. Son fundamentales en depósitos de oro, plata y cobre tipo pórfido y epitermal. (Minería UNAM, 2008)

- *Metalotectos sedimentológicos*: Ambientes y secuencias de depósito que por su historia diagenética, química y tectónica de cuenca favorecen la ocurrencia de metales, por ejemplo, cuencas de evaporitas para la formación de sulfatos asociados a plomo, zinc y cobre.

- *Paleogeográficos/Paleoclimáticos*: La disposición ancestral de continentes, océanos, cuencas hidrotermales y grandes ciclos climáticos ha dado origen a metalotectos muy antiguos, como los cinturones de hierro precámbricos (BIFs) o depósitos de uranio en paleocanales reductores. (García Cuevas, 1988)

Cada tipo de metalotecto implica fenómenos particulares de formación y es identificable a través de técnicas de geología estructural, geoquímica, geofísica, mapeo litológico y modelamiento espacial de información minera moderna. Detectar, clasificar y priorizar los metalotectos es una tarea clave para elevar la eficiencia, seguridad y sustentabilidad de la exploración y la propia minería.

4.2. Importancia de los metalotectos en la exploración inicial

En la exploración inicial, los metalotectos son cruciales porque actúan como indicadores que guían a los geólogos hacia las áreas con mayor probabilidad de albergar depósitos minerales. Al ser características geológicas que han favorecido la concentración de minerales, permiten optimizar los recursos y reducir el riesgo en las primeras etapas de un proyecto minero (Pohl, 2022a).

La relevancia de los metalotectos dentro de la exploración inicial reside en su papel fundamental como características geológicas que condicionan o favorecen la génesis, acumulación y localización de los depósitos minerales, permitiendo que la exploración mineral sea más predictiva, focalizada y eficiente.

Los metalotectos son definidos como “características geológicas relacionadas a la formación o localización de depósitos minerales”, pudiendo ser estructuras del manto, segmentos de fallas profundas, antiguos márgenes continentales, discordancias estratigráficas, complejos ígneos, centros metamórficos, barreras geoquímicas regionales, entre otros (Pohl, 2022a).

Su identificación y cartografía, a través del conocimiento metalogenético respaldado por análisis de sistemas minerales y modelos predictivos, permite reducir el área de búsqueda y guiar el muestreo, la prospección geoquímica y los métodos geofísicos hacia sectores de mayor potencial mineralizador, optimizando recursos y tiempo durante la exploración inicial.

Los metalotectos constituyen la base operativa y conceptual de los “modelos metalogenéticos” y de los métodos modernos de “mineral system analysis” (MSA), que priorizan aquellos elementos y factores detectables que actúan como verdaderas guías hacia nuevas mineralizaciones. En la práctica mineral, los metalotectos permiten definir dominios geológicos

favorables y realizar mapas previsores de prospectividad mineral, elementos cruciales en la primera etapa exploratoria(Pohl, 2022a).

La ubicación de áreas favorables, determinadas por la presencia y superposición de metalotectos (litológicos, estructurales, geoquímicos), es esencial para focalizar inversiones, reducir la incertidumbre geológica y aumentar las probabilidades de éxito en la búsqueda de nuevos depósitos, incluso bajo cobertura o en contextos "greenfield" con muy poca información disponible.

En síntesis, la importancia de los metalotectos estriba en que aportan las claves para el diseño y ejecución de estrategias de prospección inicial, delimitación de blancos exploratorios, planificación de campañas de perforación y estimaciones preliminares de potencial de recursos, constituyendo la piedra angular de toda exploración científica prospectiva moderna (Pohl, 2022a).

4.3. Conceptos de pequeña y mediana minería en Ecuador

4.3.1. Concepto de Pequeña Minería

La pequeña minería está sujeta a un régimen técnico-administrativo específico, que contempla procesos de autorización y fiscalización diferenciados, pero exigentes en materia de operaciones seguras y ambientalmente responsables, de acuerdo con el Reglamento del Régimen Especial de Pequeña Minería y el Reglamento General a la Ley de Minería (Correa Delgado, 2009).

La pequeña minería en Ecuador se caracteriza por operaciones de bajo volumen, con límites definidos en cuanto a capacidad de producción y otros parámetros técnicos:

- Volumen de producción: No excede las 1,000 toneladas métricas por día de material beneficiado para minerales metálicos y 1,500 toneladas métricas por día para minerales no metálicos (Correa, 2009).

- Área de concesión: Hasta 200 hectáreas por concesión minera, según el régimen especial establecido en el Reglamento de Pequeña Minería(Correa, 2009).

- Mano de obra: Caracterizada por emplear menos trabajadores y presentar un menor nivel de mecanización y tecnología comparada con la mediana y gran minería(Correa, 2009).

- Condiciones tecnológicas: nivel reducido de mecanización; operaciones realizadas generalmente por microempresas, asociaciones, cooperativas u organizaciones similares.

- Regulación: Requiere cumplir normas ambientales, reglamentos de seguridad laboral y procesos de regularización simplificados en comparación con la gran minería, siguiendo las disposiciones del Reglamento General a la Ley de Minería (Correa Delgado, 2009).

- Finalidad social y económica: busca la generación de empleo, reducción de pobreza en zonas deprimidas y el aprovechamiento eficiente y racional del recurso minero bajo los principios de prevención, precaución y sostenibilidad (Correa, 2009).

4.3.2. Concepto de Mediana Minería

La mediana minería en Ecuador, de acuerdo con los reglamentos mineros vigentes, se conceptualiza como el conjunto de actividades extractivas cuyo volumen de operación, inversión, área de concesión y capacidad tecnológica es intermedio entre la pequeña y la gran minería, siendo

regulada por el régimen común de la Ley de Minería y normativas específicas sectoriales (Correa Delgado, 2009). La mediana minería se refiere a operaciones con niveles intermedios de producción, tecnología y escala:

- *Volumen de producción*: Entre 1,001 y 2,000 toneladas métricas por día para minerales metálicos; hasta 3,000 toneladas métricas por día para minerales no metálicos (Ortiz Durán, 2020).

- *Área de concesión*: Puede superar las 200 hectáreas, pero sin llegar a los límites de la gran minería; estos parámetros están regulados en la normativa sectorial y en acuerdos ministeriales (Correa Delgado, 2009).

- *Mano de obra*: Emplea mayor cantidad de trabajadores, infraestructura y tecnología que la pequeña minería, pero menor que la gran minería (Ortiz Durán, 2020).

- *Características tecnológicas*: Se distingue por mayor grado de mecanización, infraestructura y especialización que la pequeña minería, incluyendo plantas industriales, sistemas de control ambiental y procesos tecnológicos avanzados, pero no tan sofisticados ni de tan alta inversión como los de la gran minería (Ortiz Durán, 2020).

- *Regulación*: Está sujeta a procedimientos de control y exigencias más rigurosas, incluyendo estudios ambientales más amplios y mayores obligaciones formales respecto a la pequeña minería (Correa Delgado, 2009).

- *Finalidad productiva*: Su objetivo es la explotación racional y eficiente de yacimientos mineros de mediana escala, generando empleo y recursos económicos regionales bajo el cumplimiento de estándares ambientales y técnicos internacionales.

El marco normativo exige a la mediana minería la presentación de estudios técnicos de exploración, explotación y beneficios mineros, planes de manejo ambiental y programas de responsabilidad social. Esta categoría sirve de puente tecnológico y administrativo entre la minería artesanal/pequeña y la minería de gran escala en el Ecuador. La mediana minería en Ecuador se define, según la Ley de Minería y su reglamentación vigente, como actividades mineras que superan los parámetros de área y capacidad de la pequeña minería, pero no alcanzan las características de la gran minería (Correa Delgado, 2009). La Tabla 1 marca las diferencias principales entre pequeña y mediana minería.

Tabla 1 Diferencias principales entre pequeña y mediana minería

Criterio	Pequeña Minería	Mediana Minería
Producción (metálicos)	Hasta 1,000 t/día	1,001–2,000 t/día
Producción (no metálicos)	Hasta 1,500 t/día	Hasta 3,000 t/día
Área concesionada	Hasta 200 ha	Más de 200 ha
Número de trabajadores	Bajo	Intermedio
Requisitos legales	Simplificados	Más exigentes

5. EL DISTRITO MINERO ZARUMA-PORTOVELO (DMZP)

5.1. Marco geológico regional

El área SO de los Andes Ecuatorianos, al S de la Cordillera Occidental, abarca la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo (Bonilla Guevara, 2010d). De acuerdo con PRODEMINCA (2000), tanto el distrito Pucará-Alausí como el distrito Zaruma-Portovelo, han sido reagrupados como subdistritos del distrito Azuay con los nombres de Pucará-Alausí y El Oro, respectivamente. Sus límites son: al N el Campo Mineral Molleturo, al S la falla Piñas-Portovelo de orientación NO-SE, al E la megaestructura regional Peltetec, cuya prolongación S en el extremo oriental del distrito Zaruma-Portovelo toma el nombre de falla Girón, y al O la provincia geológica Costa (Fig. 1).

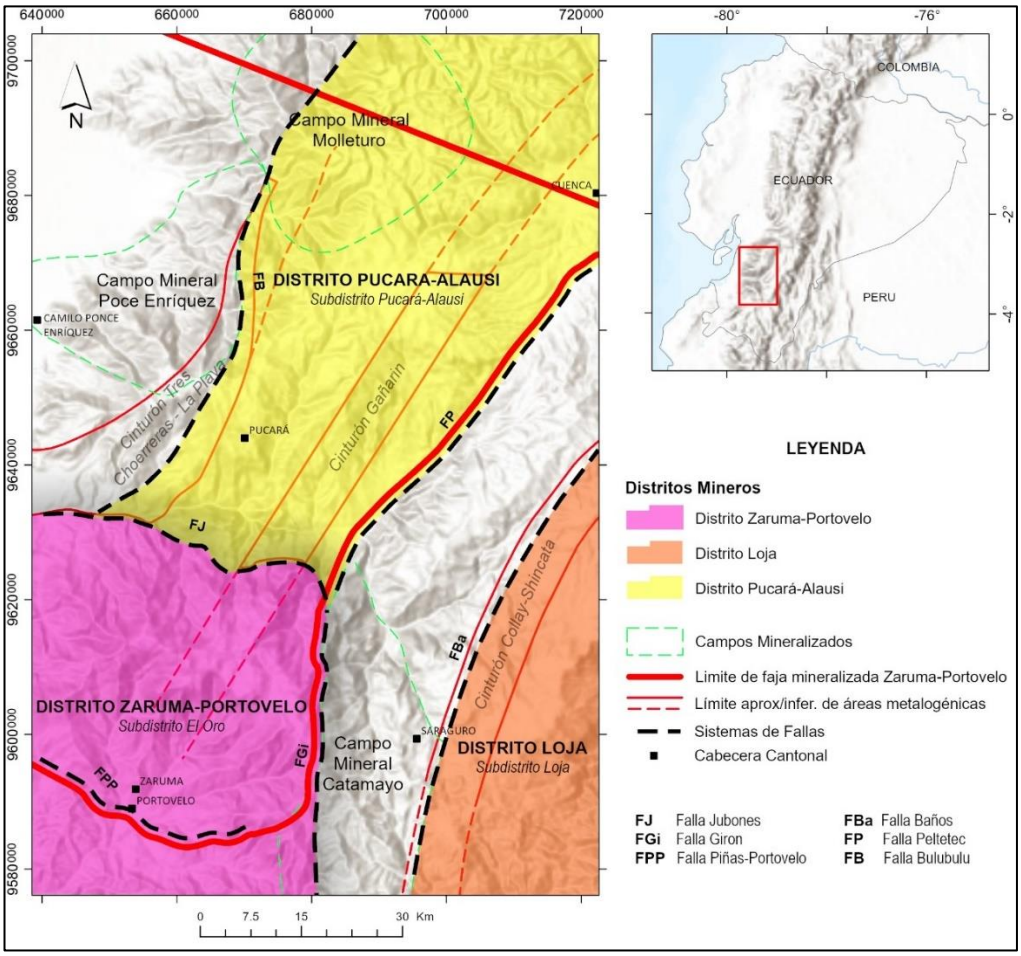


Figura 1. Mapa de distritos mineros y subdivisiones metalotectónicas del área centro oriental, perteneciente a la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo (FMZP) y localización de megaestructuras: Bulubulu (FB), Peltetec (FP), Girón (FGi), Baños (FBa), Jubones (FJ), Piñas-Portovelo (FPP). Tomado del distrito Azuay de PRODEMINCA (2000).

En particular, la falla Peltetec refleja la acreción de los Terrenos Chaucha y Tahuín al Terreno oceánico Alao durante el Cretácico (Litherland et al. 1994). Mientras que la sutura Piñas-Portovelo relaciona la colisión continente-continente durante el Jurásico-Cretácico Inferior de los Terrenos metamórficos. La geología de esta área SO se representa por unidades pertenecientes al Paleozoico-Triásico de los Terrenos de afinidad continental Chaucha y Tahuín (Unidad El Toro y rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro) y Loja (Unidad Chiguinda); rocas cretácicas del

Terreno de afinidad oceánica Pallatanga (Unidad Pallatanga) y rocas terciarias del Terreno Macuchi (Unidad Macuchi), cubiertas por depósitos volcánicos provenientes de la actividad volcano efusiva junto a representantes de la actividad magmática plutónica terciaria. Al S del área, el Cretácico marino del Grupo Alamor, representado por las rocas de la Formación Zapotillo-Ciano y su facies piroclástica se expande y colinda con las series metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro, donde se observan intrusiones de los granitoides El Prado, Guayabo-Porotillo con numerosos apófisis.

5.1.1. Unidades geológicas del SO de los Andes ecuatorianos

Las unidades geológicas del área SO de los Andes Ecuatorianos se enmarcan dentro del siguiente contexto litoestratigráfico (Fig. 2):

- **Paleozoico**

  -*Unidad Chiguinda (PZC)*

Comprende rocas metasedimentarias semipelíticas paleozoicas de procedencia continental dentro del Terreno Loja y aflora en el extremo SE del área SO de los Andes Ecuatorianos. Se trata de una secuencia espesa, semipelítica monótona de cuarcitas, metalimolitas, esquistos grafíticos, filitas negras, pizarras y escasas metagrauvacas, derivada de una fuente continental, probablemente en una cuenca intracratónica o de un escenario de margen pasivo (Litherland et al., 1994).

-Rocas Metamórficas (M)

Conforman el terreno Chaucha-Tahuín, afloran en el extremo suroccidental del área e integran el Complejo Metamórfico El Oro (Aspden et al., 1995). Feininger (1978) calificó a estas rocas metamórficas como un conjunto de esquistos y granitos envolviendo o rodeando las serpentinitas, esquistos azules y eclogitas de la Unidad Raspas, parte integrante del Complejo Ofiolítico El Oro.

Constituyen una secuencia discordante con respecto al rumbo de los Andes Ecuatorianos, a juzgar por su orientación E-O. Básicamente, están representadas por metabasitas y metapelitas (asociación de sedimentos de origen continental, derivados de la erosión de una corteza continental vieja). Las metabasitas incluyen eclogitas (remanentes del plateau oceánico), anfibolitas y esquistos verdes, mientras que las metapelitas incluyen esquistos micáceos granatíferos portadores de grafito.

Al S de Portovelo está presente la división semipelítica del Terreno Chaucha- Tahuín que aflora a lo largo de la Cordillera Tahuín, formando un cinturón que varía de 10 a 20 km de ancho con rumbo este-oeste.

Las rocas metamórficas al N de la falla Piñas-Portovelo y al S de la falla Jubones, se consideran del Jurásico-Cretácico Inferior y están representadas por los esquistos verdes, filitas grafíticas y lentes de serpentina del Complejo Ofiolítico Palenque.

- **Mesozoico**

  -Jurásico

-Unidad El Toro (JKT)

Forma parte del Complejo Ofiolítico El Oro, aflora al sur de la falla Jubones y está en parte cubierta por depósitos volcánicos provenientes de la actividad volcano efusiva del Grupo Saraguro.

Está representada por rocas ultrabásicas y básicas, entre las que se destacan harzburgitas de grano medio, variablemente serpentinizadas, masivas a esquistosas, formando afloramientos de rumbo preferente E-O. Las harzburgitas están compuestas por olivino, ortopiroxeno y antigorita principalmente, y en menor proporción por anfíbol. Se consideran pertenecientes al Jurásico-Cretácico Inferior (Litherland et al., 1994).

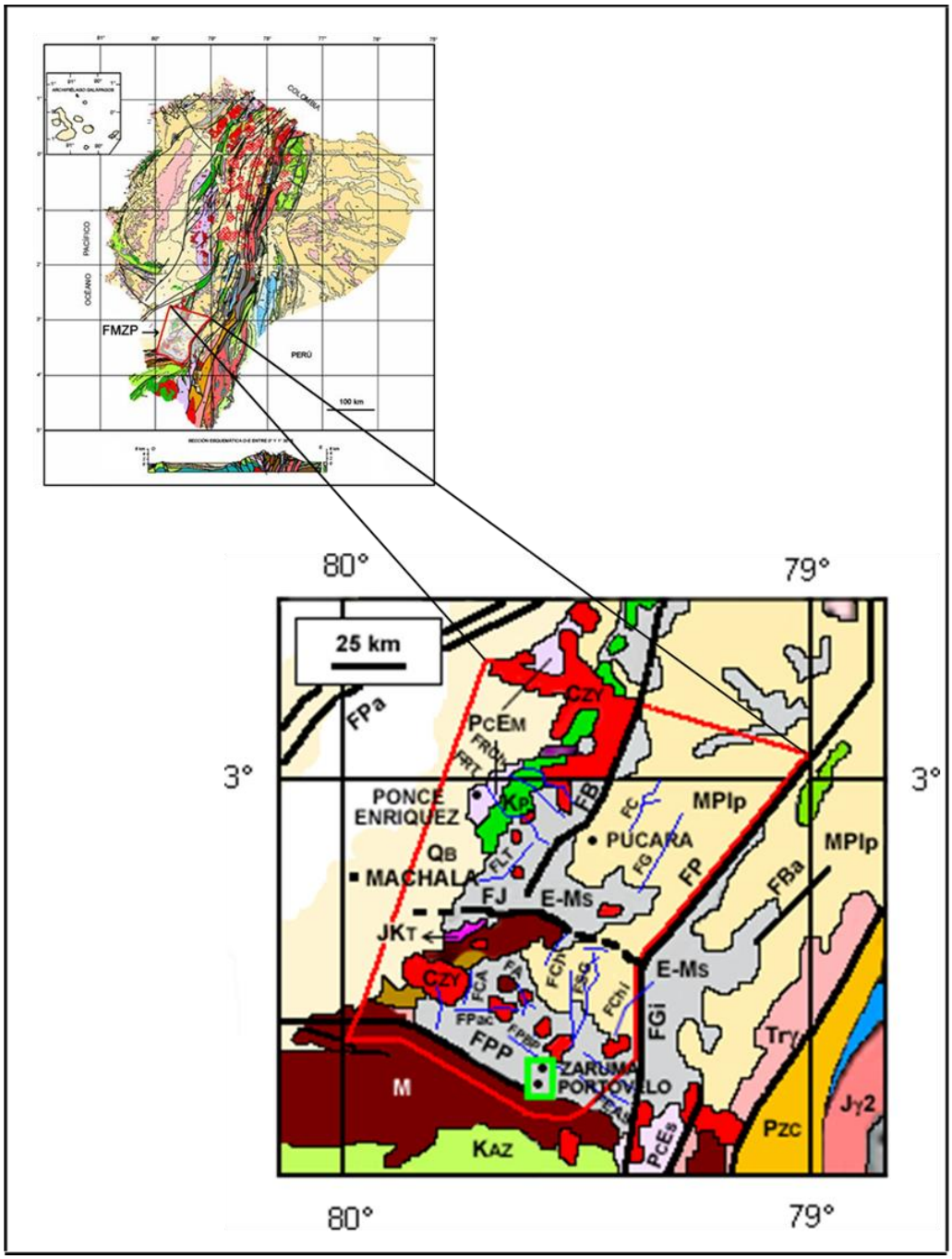


Figura 2 Mapa geológico regional del área suroeste de los Andes Ecuatorianos con localización de megaestructuras regionales: fallas Pallatanga (FPa), Bulubulu (FB), Peltetec (FP), Baños (FBa), Jubones (FJ), Piñas-Portovelo (FPP); estructuras locales: fallas Río Chico (FRCh), Culebrillas (FC), Río Tenguel (FRT), Gañarín (FG), La Tigrera (FLT), Cerro Azul (FCA), Chilla (FCh), Paccha (FPac), Atahualpa (FA), Chinchilla (FChi), Puente Buza-Palestina (FPBP), y sistemas de fallas Salvias-Guanazán (FSG) y El Arí-Salvias (FEAS) dentro de la faja de mineralización Zaruma-Portovelo (FMZP).

-Cretácico

-Unidad Pallatanga (Kp)

La Unidad Pallatanga del Cretácico Medio temprano (pre-Senoniense) fue conocida anteriormente por el nombre de Formación Piñón de la Sierra y forma parte de las unidades del Terreno Pallatanga. Se compone por una asociación ofiolítica representada por basaltos toleíticos, masivos y almohadillados (MORB) con hialoclastitas, cantidades subordinadas de volcanoclastitas, intercalaciones de chert, e intrusiones gábricas y ultramáficas. Se encuentra cubierta por depósitos post-acreción de abanico turbidítico marino de la Unidad Yunguilla y rocas volcánicas subaéreas del Grupo Saraguro. Los afloramientos alrededor de Bella Rica, al E de Ponce Enríquez, pertenecientes al Distrito Azuay presentan alteración hidrotermal penetrante con epidota, clorita, calcita y pirita diseminada.

-Formación Zapotillo-Ciano (KAZ)

Aflora al sur de las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro, pertenece al Grupo Alamor del Cretácico marino, representado por flysch compuesto principalmente de lutitas negras y grauvacas con conglomerados. Cuerpos de arenisca feldespática y micácea de 5-50 cm de ancho cortan a las lutitas negras y grauvacas. El espesor de esta formación se estima que supera 2.000 metros. De acuerdo con los moldes de Inoceramus descubiertos en esta formación sugiere una edad cretácica superior (Bonilla Guevara, 2010a).

- **Terciario**

-Paleoceno

-Unidad Macuchi (PCEM)

Aflora en las inmediaciones del pueblo Ponce Enríquez. Es una unidad volcanoclástica submarina de arco de islas intraoceánico, del Terciario Inferior (Eoceno Inferior a Medio), que forma el Terreno Macuchi. Está compuesta por lavas andesítico-basálticas de afinidad toleítica y estructuras almohadilladas (pillow lavas) y columnar. Participan, además, areniscas cuarzo feldespáticas, volcanitas de grano grueso, frecuentemente asociadas a hialoclastitas y depósitos debris, aglomerados piroclásticos (tobas, brechas), limolitas volcánicas, doleritas, escasas calcarenitas, intrusiones microgábricas, calizas y basaltos.

Se sostiene que el arco de islas Macuchi fue activo durante el Paleoceno, Eoceno y Oligoceno; sin embargo, presentan una evidencia bioestratigráfica que soporta únicamente la edad eocena (Aspden et al., 1992).

-Volcánicos Sacapalca (PCES)

Actualmente se conocen como Unidad Sacapalca, y se encuentra al E del Complejo Metamórfico El Oro; cubre la parte S del Terreno Alao. La unidad comprende lavas andesíticas, brechas tobáceas, conglomerados, lutitas lacustres y rocas piroclásticas. Estos últimos están representados por tobas andesíticas a dacíticas. Jaillard et al. (1992) le asignan al Paleoceno-Eoceno Inferior. (Bonilla Guevara, 2010d).

-Oligoceno

-Volcánicos Saraguro (E-Ms)

Definidos por Dunkley y Gaibor (1997) como Grupo Saraguro de edad eocénica superior. Se interpretan de un ambiente deposicional subaéreo; ocupan la parte centro sur del área SO de los Andes Ecuatorianos, es decir, 40% de esta región. Consisten principalmente de tobas soldadas de flujo de ceniza, probablemente facies de flujo de salida de caldera, de composición riolítica a dacítica como las que se observan al O de Manú. Participan lavas basalto-andesíticas, material volcánico retrabajado, brechas, tobas de ceniza fina y lavas con intercalaciones de areniscas, siltitas y argilitas.

Dentro del Grupo Saraguro se reconocen seis unidades litológicas: Unidad Portovelo, Formación Jubones, Formación Las Trancas, Formación Plancha Rumi, Formación La Fortuna y Formación La Paz (Dunkley y Gaibor, 1997).

-Plioceno

-Formación Pisayambo (MPlp)

Ocupa la región E-NE del sector SO de los Andes Ecuatorianos, cubre los Terrenos Chaucha y Alao, inmediatamente al E de la falla Bulubulu y al E de la falla Peltetec, respectivamente. Descansa sobre la Unidad Pallatanga del Cretácico Medio, infrayaciendo material volcánico más moderno. Se trata de una potente secuencia paleogénica de flujos de lava y piroclastos de composiciones andesítica-basáltica a riolítica.

Cuaternario

***-**Abanico Aluvial (QB)*

Comprende los sedimentos continentales más recientes que ocupan la porción O- NO del SO de los Andes Ecuatorianos. Se destaca una serie de depósitos de gravas, arenas y limos que, ocasionalmente, tienen horizontes arcillosos. Los materiales delimitan abanicos aluviales (conos de eyecciones), los cuales forman una amplia llanura costera. Tienen 20 km de ancho y cubren rocas del Cretácico- Terciario en las partes bajas de la planicie. Al E de Machala estos depósitos cubren el Grupo Saraguro.

-Rocas intrusivas

Al SE de la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo, colindando con la Unidad Chiguinda, aflora el granito “cuarzo azul” de Tres Lagunas, en claro contacto tectónico.

El granito Tres Lagunas, es de composición monzogranítica a granodiorítica con cordierita-granate-moscovita-biotita. Este granito de “cuarzo azul”, aflora al E de Saraguro y tiene dimensiones batolíticas (100 km de longitud y más de 10 km de ancho). Su textura varía desde masiva con megacristales hasta esquistosa. Más al SE afloran una granodiorita de hornblenda-biotita y diorita no deformadas del Jurásico. Se trata de exposiciones del batolito Zamora.

Cuerpos granodioríticos y dioríticos (CZγ) y riolíticos pequeños están distribuidos en el S del área. Intruyen rocas oligocénicas de la Unidad Portovelo del Grupo Saraguro y metamórficas del Terreno Chaucha-Tahuín a lo largo del Anticlinorio Cangrejos (Spencer et al., 2002), formando un cinturón con dirección NO-SE, casi paralelo a la megaestructura transversal o sutura Piñas-Portovelo.

5.2. Geología y metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP)

El Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP) ocupa la parte SE de la faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo (Fig. 1), cuya porción S es la más estudiada, conocida propiamente como tal y próxima a la falla Piñas-Portovelo (Fig. 3). Se exponen las siguientes unidades geológicas (Fig. 3).

- **Paleozoico**

  -Rocas Metamórficas (M)

Ocupan el área SO del distrito Zaruma-Portovelo e integran al S de la falla Piñas- Portovelo una litología semipelítica del Terreno Chaucha-Tahuín. Se agrupan con la denominación de Complejo Metamórfico El Oro (Aspden et al., 1995). Incluyen serpentinitas desmembradas, eclogitas, anfibolitas, gneises, paragneises, gneises graníticos, granodioritas foliadas y migmatitas de alto grado, metapelitas, arcosas metamorfizadas, metacuarcitas, pizarras, lutitas, limolitas y conglomerados con clivaje de grado bajo a muy bajo.

- **Terciario**

  -Oligoceno

-Volcánicos Saraguro (E-Ms)

Los Volcánicos Saraguro o Grupo Saraguro corresponden a un ambiente deposicional subaéreo (Dunkley y Gaibor, 1997) y ocupa la porción N y E del DMZP, es decir, un 60% del mismo. El grupo consiste de tobas soldadas de flujo de ceniza, probablemente facies de flujo de salida de caldera, de composición riolítica a dacítica. Participan lavas de composición andesítica a basalto-andesítica con texturas masiva y porfírica, material volcánico retrabajado, tobas de composición dacítica a andesítica y brechas.

En las porciones centro y oriental del distrito, Pratt (1997)definen la Unidad Portovelo como parte de este Grupo, cuya edad 38 Ma (Eoceno Superior) está definida al N del distrito por Dunkley y Gaibor (1997). Su espesor es menor a 1.000 metros. (Dunkley y Gaibor, 1997).

-Unidad Portovelo (O? Pv)

Esta unidad fue estudiada por (Billingsley, 1926) y definida por Pratt (1997). Se halla en contacto tectónico con rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro a lo largo de la falla Piñas-Portovelo. Aflora entre los poblados de Zaruma, Malvas, Arcapamba y Huertas y próximo al río Luis (9’593.100-672.100), en donde sobreyace en discordancia al basamento metamórfico. (Billingsley, 1926).

No obstante, la Unidad Portovelo fue incluida en las Formaciones Célica (DGGM 1982), Piñón (DGGM 1973 y 1975) y en las Volcanitas Saraguro (BGS y CODIGEM, 1993). En la comarca estudiada define un amplio registro de la actividad magmática plutónica y volcano efusiva terciaria. Comprende mantos de lavas basalto-andesíticas y andesíticas de textura porfírica, tobas andesíticas y dacíticas. También incluye tobas de ash flow riolíticas a dacíticas con intercalaciones sedimentarias (pizarras-cherts) menores. De acuerdo a Billingsley (1926), esta unidad la integran de E a O tres Series:

Muluncay, Portovelo y Faique. (Bonilla Guevara, 2010d).

La Serie Muluncay constituye la base de la Serie Portovelo y está representada por brechas volcánicas, tobas y flujos de composición andesítica e ignimbritas.

La Serie Portovelo comprende lavas andesíticas y basalto-andesíticas. La secuencia posee rumbo NO-SE e inclina 35° a 40° al SO. La actividad magmática prosigue con la Serie Faique, que se localiza al O y se sobreimpone a la Serie Portovelo.

La Serie Faique consiste en rocas volcánicas similares a las descriptas para la Serie Muluncay, pero con una proporción mayor de tobas y menor de lavas andesíticas; y, culmina con intrusivos subvolcánicos, dioríticos, granodioríticos, monzoníticos cuarzosos y riolíticos que, al S del distrito, adquieren en planta forma sigmoide (N a NO) y afloran entre Zaruma y Portovelo (Bonilla Guevara, 2010d). Stocks subvolcánicos de composición riolítica a dacítica afloran al O de Zaruma y en las inmediaciones de los filones del distrito (Fig. 3).

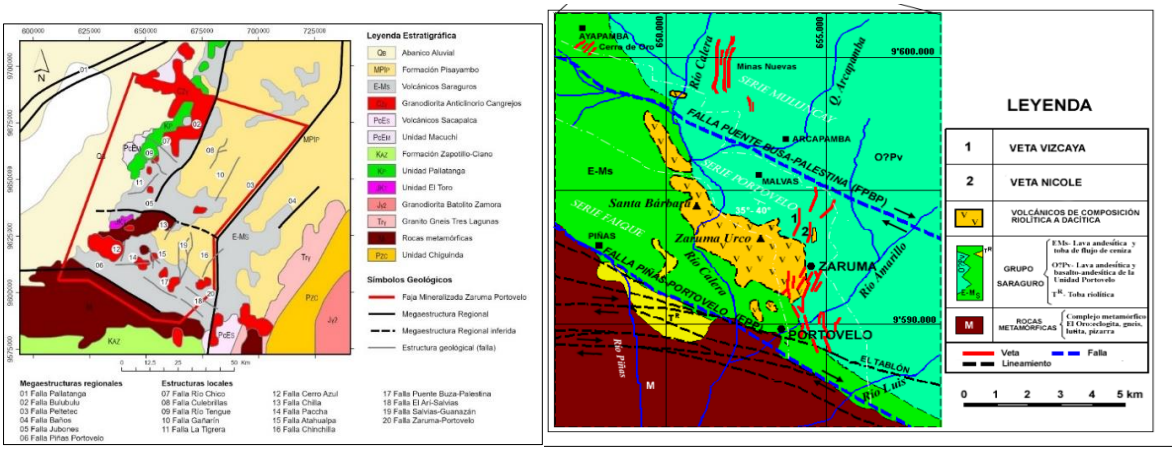


Figura 3. (a) Mapa geológico del distrito minero Zaruma-Portovelo con la ubicación de las Series de rocas. (b) Detalles de las vetas y fallas. Tomado de Billingsley (1926).

La edad establecida para esta unidad es del orden de los 28,4 a 21,5 Ma Oligoceno alto a Mioceno muy temprano; (Dunkley y Gaibor, 1997). Chiaradia et al. (2004) precisan una edad de 25 Ma para las andesitas mineralizadas de la región S y destacan aislados intrusivos de ~32 Ma. Los stocks dioríticos y granodioríticos, diques y mantos riolíticos se agrupan principalmente, en edad K/Ar de 15,3 ± 0,5 Ma, citada por (Van Thournout et al., 1996)y establecida en una muestra del Faique. Destacan intrusivos aislados de ~32 Ma. La información geoquímica disponible señala una afinidad calco-alcalina.

Como fue mencionado, Galarza et al. (1999) determinan una edad Rb/Sr de 48 ± 12 Ma para las rocas de la Serie Muluncay. También establecen la edad Rb/Sr de 211 ± 26 Ma para el granitoide El Prado de la región Zaruma-Portovelo, similar a la de los granitoides Moromoro y Marcabelí, que cortan las secuencias metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro. (Bonilla Guevara, 2010d).

La metalogenia del DMZP abarca una descripción de los sistemas mineralizados, su control estructural, evolución y características geoquímicas. A continuación, se expone la información más relevante:

- *-Sistemas mineralizados y filones principales*

El distrito comprende más de 30 filones auríferos-polimetálicos de tendencia N-S y sigmoide, relacionados temporalmente a eventos de magmatismo de arco entre 21 y 10 Ma (Oligoceno-Mioceno).

Los sistemas de filones Cerro de Oro, Minas Nuevas-Muluncay, Vizcaya-Nicole, Sexmo-Miranda, Bomba de Pacchapamba-Agua Dulce, Jorupe, Tamayo-Quebrada, Portovelo, Curipamba y Tablón corresponden a veta epitermales de sulfuración baja e intermedia que integran el distrito aurífero polimetálico Zaruma-Portovelo, dispuestas en 3 series en échelon con zonación estructural, mineralógica y de alteración de Norte a Sur. Esta organización espacial refleja diferentes niveles de erosión sobre un sistema hidrotermal vinculado a intrusivos porfídicos, donde al Norte se exponen niveles más profundos y de mayor temperatura y hacia el Sur niveles más someros, fríos y pobres en sulfuros. (Bonilla Guevara, 2010d).

En conjunto, los sistemas de filones muestran una zonación mineralógica que acompaña el rumbo de Norte a Sur, con disminución gradual de la temperatura de formación y del contenido volumétrico de sulfuros Zn, Cu y Pb. En los sistemas del Norte (Cerro de Oro y Minas Nuevas-Muluncay) predominan asociaciones de alta temperatura con cuarzo, pirita, calcopirita, clorita, epidota y hematita, parcialmente relacionadas con un sistema porfídico subyacente. En los sistemas intermedios (Vizcaya-Nicole, Sexmo-Miranda, Pacchapamba-Agua Dulce, Jorupe, Tamayo-Quebrada y Portovelo) domina una mena compleja de esfalerita, galena, calcopirita y pirita típica de sulfuración intermedia. Hacia el Sur, en Curipamba (sector Sur) y Tablón, la paragénesis se simplifica a calcita, cuarzo, minerales de Mn (rodocrosita), trazas de pirita y escasos sulfuros de metales base, reflejando condiciones de baja temperatura y ambientes más distales del sistema epitermal. (Bonilla Guevara, 2010d).

La mineralización es predominantemente de tipo epitermal de sulfuración intermedia, con vetas que alcanzan longitudes de hasta 2.5 km y profundidades probadas entre 100 y 600 m. Los espesores típicos son de 0.3 a 2.7 m, alcanzando en casos excepcionales hasta 4 m y principalmente oro asociado con sulfuros como pirita, esfalerita, galena y calcopirita.

La figura *4* (a) muestra un mapa geológico simplificado de Ecuador y la ubicación de la zona seleccionada; y (b) mapas geológicos del yacimiento aurífero Zaruma-Portovelo con geología básica (rocas volcánicas e intrusivas), estructuras principales y vetas más importantes. Tomado Berrezueta et al. (2016).

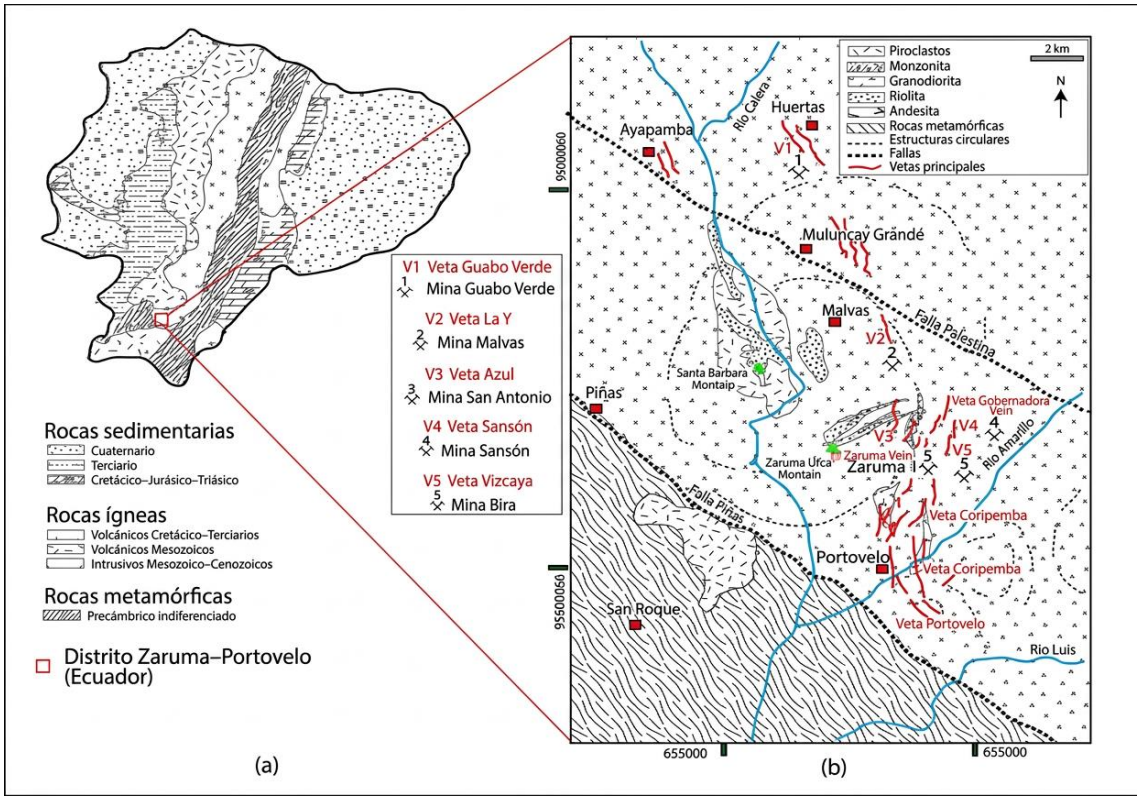


Figura 4 (a) Mapa geológico simplificado de Ecuador y ubicación de la zona seleccionada; y (b) mapas geológicos del yacimiento aurífero Zaruma-Portovelo con geología básica (rocas volcánicas e intrusivas), estructuras principales y vetas más importantes. Tomado Berrezueta et al. 2016.

- *Secuencias paragenéticas y mineralización*

Se reconocen 5 estadios paragenéticos principales en la evolución del evento hidrotermal aurífero del distrito Zaruma-Portovelo, establecidos a partir del estudio detallado de la Veta Vizcaya, que se toma como patrón para el conjunto del distrito (Fig.5). Estos estadios sintetizan la secuencia de fraccionamiento magmático, hidrotermalización, brechamiento, absorción tardía y oxidación final, vinculados a dos pulsos de ebullición y a procesos de enfriamiento brusco y remobilización supergénica:

⌖ *Fraccionamiento magmático – estadio e1*: el primer estadio corresponde a la etapa de fraccionamiento de un magma y generación de fluidos magmáticos o hidrotermales juveniles, asociados a una intensa alteración propilítica de la roca andesítica de la Unidad Portovelo. En este ambiente se desarrollan paragénesis tempranas de clorita, epidota y pirita (py1), junto con cuarzo microgranoso (qzmg1), carbonatos y hematita (hm1), que reemplazan de forma penetrativa la roca de caja y generan el material andesítico alterado que luego será fragmentado en las brechas blancas. Este estadio se relaciona con procesos de disolución por presión y sellado (crack-seal), que abren pequeños espacios rellenos por cuarzo y pirita diseminada, definiendo el marco inicial del sistema de vetas (Bonilla Guevara, 2010b).

⌖ *Hidrotermalización principal – estadio e2*: el segundo estadio marca el inicio de la etapa hidrotermal, caracterizada por el desarrollo de vetillas y vetas de cuarzo (qzgf-gm1, qzmg2) y la precipitación de pirita (py2), esfalerita temprana (sph1), calcopirita, carbonatos (cb2) y las primeras

generaciones de oro (Au1), en ambientes de ebullición. En este momento se forma calcita esparítica (cal1) y adularia (ad2), se generan brechas hidráulicas blancas tipo jigzaw con cemento de cuarzo blanco-lechoso y gris y clastos de roca andesítica propilitizada, y el Au1 se deposita en espacios dilatacionales y zonas de deformación por presión-disolución en un rango de aproximadamente 260-30°C, pH casi neutro y baja actividad de H2S. Este estadio es el más intenso en creación de espacios abiertos por dilatación y se interpreta como equivalente al primer estadio aurífero descrito en trabajos previos sobre el distrito. (Bonilla Guevara, 2010b).

- *Reemplazo y brechamiento – estadio e3*: el tercer estadio es el más importante desde el punto de vista económico, ya que concentra la mayor parte del oro y sulfuros metales base del sistema. Se caracteriza por una paragénesis de cuarzo microgranoso (qzmg3), pirita (py3), esfalerita rica en Fe (sph2), galena (gn1), calcopirita (cp1), bornita (bn1), sulfosales (tn1-th1), electrum (el1), petzita (ptz1), clorita (chl3), illita (ill3) y esmectita (sm1), asociadas a estructuras crustiformes-coloformes y a brechas negras hidráulicas freatomagmáticas. Este estadio está vinculado a una segunda etapa de ebullición y a un enfriamiento brusco por despresurización, que favorecen la precipitación masiva de sulfuros y el enriquecimiento en Au2 y electrum en el rango de 200-250°C, rellenando espacios intergranulares, fracturas y zonas de debilidad en la pirita y en los contactos entre esfalerita, galena y calcopirita (Bonilla Guevara, 2010c).

- *Depósitos tardíos y adsorción – estadio e4*: el cuarto estadio corresponde a un pulso con menor generación de espacios abiertos, que aprovecha principalmente cavidades relictas y fracturas selladas previamente. La paragénesis está dominada por cuarzo granoso fino a medio (qzgf-gm2), esfalerita tardía pobre en Fe (sph3), calcopirita (cp2), electrum (el2), oro (Au3) y esmectita (sm2), asociada a silicificación y alteracion argílica. El oro de este estadio se interpreta como resultado de procesos de absorción, donde Au3 se fija en superficies de pirita fracturada y otros sulfuros, en sitios de alta densidad de carga superficial, lo que genera un enriquecimiento aurífero tardío en planos de fractura y bordes de grano.

- *Removilización final y oxidación – estadio e5*: el quinto estadio marca el cierre del evento magmático-hidrotermal, con la precipitación de cuarzo granoso grueso (qzgg1), de hábito botroidal o bandeado, con escasa pirita oscura diseminada y oro muy subordinado (Au4). Este pulso se asocia a una aparente inactividad tectónica, fuerte silicificación y a la remobilización parcial del oro y de la mineralización generada en estadios previos, constituyendo la transición hacia la alteracion supergénica y el enriquecimiento secundario observado en las zonas de oxidación del distrito (Bonilla Guevara, 2010c).

Las asociaciones minerales paragenéticas por sistema están detalladas en Tabla 2 incluyendo: cuarzo, calcita, esfalerita, calcopirita, pirita, galena, electrum, oro nativo, petzita, hessita y menor cantidad de minerales secundarios como malaquita, piromorfita y azurita.

La figura 5 muestra el mapa geológico-estructural y la paragénesis de las vetas del sector Minas Nuevas, O Nivel, en el distrito aurífero–polimetálico Portovelo–Zaruma, donde se representan las unidades litológicas, fallas principales y la distribución de las vetas mineralizadas, según Añazco (2017).

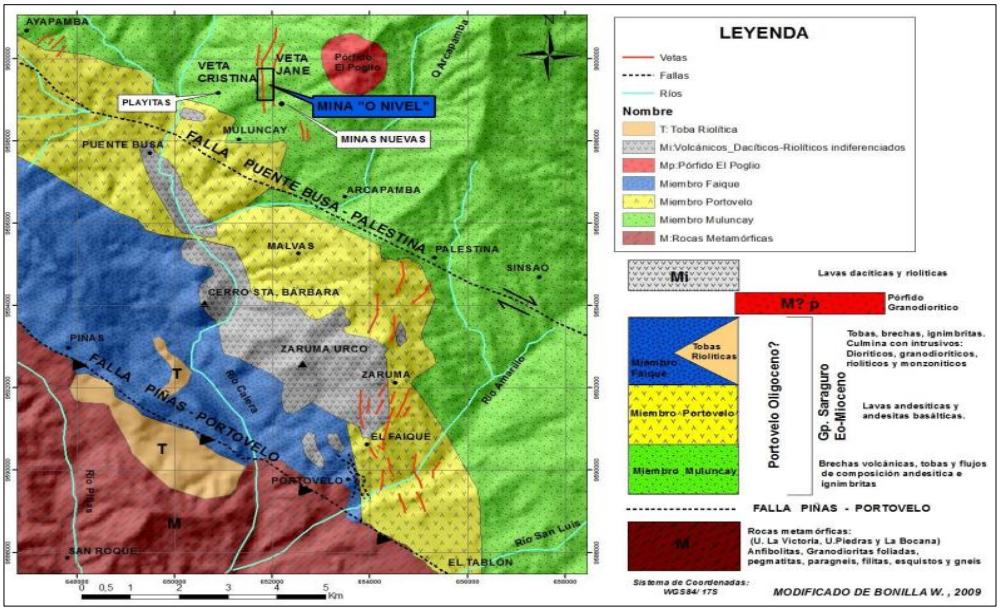


Figura 5 Paragénesis de las vetas del sector Minas Nuevas, O Nivel, ubicado en el distrito aurífero – polimetálico Portovelo – Zaruma. Añazco 2017.

Tabla 2 Asociaciones paragenéticas de los sistemas mineralizados de Zaruma-Portovelo. Tomado Bonilla Guevara, 2010.

SISTEMAS	ASOCIACION PARAGENÉTICA
1 Cerro de Oro	qz + py + cp ± chl ± ep
2 Minas Nuevas- Muluncay	chl + sph + py ± cp + chispas de oro, y qz + chl + sph + cp ± tn-th ± mg + chispas de Au
3 Vizcaya- Nicole	qz + py + hm + sph + gn + cp + bn + tn-th + ptz + el + Au
4 Sexmo- Miranda	qz + cal ± cp ± py ± tn-th ± hm ± chispas de Au
5 Bomba de Pacchapamba- Agua Dulce	qz + cal + cp + py + bn + gn + sph + chispas de Au
6 Jorupe	qz + cal + py + cp + sph + gn, con alto contenido de Cu
7 Tamayo- Quebrada	qz + cal + py + cp + sph + gn, con alto contenido de Zn
8 Portovelo o Mina Grande	qz + cal + sph + cp + py + gn + Au
9 Curipamba	cal + qz + rdc ± trazas de py
10 Tablón	cal + qz + Mn ± cp ± sph ± gn ± trazas de py ± Au

- *Alteración hidrotermal*

Los sistemas de filones muestran una zonación de alteración hidrotermal de Norte a Sur, donde se distinguen seis tipos principales: caolinítica, propilítica, argílica intermedia o subpropilítica, argílica, fílica y silicificación.

En la veta Vizcaya estas alteraciones se disponen en envolventes concéntricas tipo telescoping alrededor del filón. La alteración propilítica (clorita, epidota, cuarzo, pirita, sericita, calcita, illita, adularia y carbonatos) es la más extensa y domina los niveles profundos, pasando gradualmente a alteración argílica intermedia, argílica y fílica hacia niveles superiores. En sectores superiores se superponen zonas caoliníticas y cinturones de silicificación intensa relacionados con la antigua posición de la superficie freática y con posibles zonas de exhalación de vapor.

La mineralización aurífera se concentra en vetas extensionales y jogs dilatacionales, especialmente en brechas hidráulicas blancas y negras asociadas a procesos de ebullición y descompresión brusca del fluido hidrotermal. En estas brechas se registra una paragénesis de sulfuros (pirita, esfalerita, galena, calcopirita, sulfosales) y electrum, con varios estadios de precipitación de oro en un rango de 200-300 °C propio de un sistema epitermal de sulfuración intermedia (Bonilla Guevara, 2010d).

- *Modelo evolutivo y características geoquímicas*

El distrito se emplaza en la Unidad Portovelo (Grupo Saraguro), constituidos por lavas andesíticos-basálticas, tobas e ignimbritas de afinidad calcoalcalina, instruidas por stocks dioríticos-granodioríticos y cuerpos riolíticos subvolcánicos de edad aproximada de 32-15 Ma, que proporcionan calor y metales a los sistemas hidrotermales (Spencer et al., 2002).

La mineralización se desarrolló como vetas epitermales de sulfuración intermedia a baja, dispuesta en serie “échelon” controladas por las fallas Piñas-Portovelo y fallas subordinadas N-S y NO-SE, donde jogs y zonas de brechamiento hidráulico generaron espacios abiertos para la circulación y ebullición de fluidos (Bonilla Guevara, 2010a).

En profundidad y hacia el norte se exponen niveles más calientes, con asociaciones tipo cordillerana (cuarzo-pirita-calcopirita-clorita-epidota), que gradan lateral y verticalmente hacia vetas típicas de sulfuración intermedia ricas en esfalerita, galena, calcopirita y electrum, y finalmente hacia asociaciones de baja temperatura dominadas por cuarzo-calcita-Mn hacia el Sur (Curipamba-Tablón) (. Spencer et al., 2002).

Los estudios paragenéticos reconocen varios estadios: alteración propilítica temprana y pirita inicia; pulsos principales con cuarzo, sulfuros de metales base y oro (Au-Electrum) vinculados a episodios de ebullición y brechamiento; fases tardías con esfalerita pobre en Fe, sulfuros subordinados y mayor carbonato; y una etapa final de cuarzo grueso, escasa pirita y remobilización parcial de oro.

Los datos de inclusiones fluidas y observaciones de campo indican fluidos de pH cercanos a neutro, salinidad moderada (~11–18% en peso NaCl eq.) y estado de oxidación intermedio, compatibles con un sistema hidrotermal con sulfuración intermedia relacionados a pórfidos someros. (Bonilla Guevara, 2010a).

Isotópicamente, valores de $\delta^{34}S$ de la pirita y otros sulfuros en torno a pocos ‰ positivos sugieren una fuente predominantemente magmática del azufre y de los fluidos mineralizantes, aunque con posible mezcla limitada con aguas meteóricas en etapas más superficiales. (. Spencer et al., 2002).

- *Características geoquímicas*

Geoquímicamente el distrito se caracteriza por vetas de Au-Ag con altas leyes de metales base (Cu-Pb-Zn), particularmente en los sistemas intermedios como Vizcaya-Nicole, Sexmo-Miranda, Jorupe y Portovelo, donde la asociación esfalerita-galena-calcopirita-pirita es dominante y el oro se presenta como electrum, oro nativo y telururos subordinados (Bonilla Guevara, 2010a).

La zonificación metalogénica muestra enriquecimiento relativo en Cu y Zn hacia los niveles más profundos y al norte, con incremento proporcional de Pb y Ag en zonas intermedias, y disminución notable de sulfuros de metales base hacia el Sur, donde predominan carbonatos de Mn y vetas pobres en sulfuros (Bonilla Guevara, 2010a).

Los estudios de huellas química regional identifican para Zaruma-Portovelo una firma diagnóstica basada en la asociación Ag-Pb (plata > ~8,4 g/t y plomo > ~181 g/t) como elementos indicadores de procedencia del oro frente a otros distritos como Nambija, donde dominan tierras raras (Ce, Er, Gd, Lu, Nd, Y) (Bonilla Guevara, 2010a).

En el plano de exploración, las anomalías geoquímicas en Au, Ag, Cu, Pb y Zn asociadas a halos de alteración propilítica-argílica-silícica sobre andesitas y tobas de la Unidad Portovelo permiten delimitar metalotectos favorables, en particular donde coinciden con estructuras de échelon y zonas de brechas blancas y negras (Spencer et al., 2002).

5.2.1. Identificación y caracterización de metalotectos en el DMZP

La identificación y caracterización de metalotectos en el DMZP es fundamental para comprender la génesis y control de la mineralización aurífera y polimetálica. Según Bonilla Guevara (2010), los principales metalotectos de este distrito corresponden a unidades litoestratigráficas y estructuras tectónicas que han facilitado la circulación y precipitación de fluidos hidrotermales portadores de metales.

- Unidades litoestratigráficas (metalotectos principales)

  - *Unidad Portovelo (Serie Portovelo, Oligoceno-Mioceno)*:

La unidad Portovelo (O?Pv), definida originalmente por Billingsley (1926) y formalizada por Pratt (1997), se apoya en discordancia sobre rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro y se encuentra en contacto tectónico con éstas a lo largo de la falla Piñas-Portovelo, que marca la sutura principal al sur del distrito. Aflora ampliamente entre Zaruma, Malvas, Arcapamba, Huertas y el valle del río Luis, donde constituye un espeso paquete volcánico de lavas basalto-andesíticas y andesitas porfídicas, tobas andesíticas y dacíticas, ignimbritas riolíticas a dacíticas y niveles subordinados de pizarras y cherts volcánicos.

En el contexto regional, la Unidad Portovelo integra el Grupo Saraguro, un conjunto de tobas de flujo de ceniza subaéreas de edad Eocena-Oligocena Superior con intercalaciones de lavas y depósitos volcano-sedimentarios que cubren alrededor del 40% del sector suroccidental de los Andes ecuatorianos.

Desde el punto de vista geomecánico, las andesitas y basalto-andesitas porfídicas de la Unidad Portovelo presentan una fracturabilidad elevada y una permeabilidad secundaria bien desarrollada, producto de la intensa deformación frágil asociada a fallas transcurrentes como la Piñas-Portovelo y otros sistemas de cizalla de rumbo N-S a NNE-SSO. Esta combinación de litología competente, pero fracturable, junto con la red de fracturas extensionales, cizallas Riedel y jogs dilatacionales, convierte a la Unidad Portovelo en un receptáculo ideal para el emplazamiento de vetas epitermales, stockworks y brechas hidrotermales cargadas en Au-Ag y sulfuros de metales base. Adicionalmente, la naturaleza volcánica intermedia y la proximidad a intrusivos granodioríticos y dioríticos del Anticlinorio Cangrejos sugieren un vínculo magmático directo entre el arco volcánico Oligoceno y los fluidos hidrotermales mineralizantes que circularon a través de esta unidad.

La mayor parte de los sistemas de vetas económicamente importantes del distrito, como Vizcaya-Nicole, Sexmo-Miranda, Bomba de Pacchapamba-Agua Dulce, Jorupe, Tamayo-Quebrada, Portovelo y Curipamba, se alojan casi exclusivamente en las lavas y tobas de la Unidad Portovelo, especialmente en la Serie Portovelo definida por Billingsley (1926)

En profundidad, los niveles más bajos de la Serie Muluncay, también asignados a la Unidad Portovelo, exponen porciones más profundas y calientes del sistema epitermal, con asociaciones de alta temperatura (pirita-calcopirita) que gradan hacia paragénesis de mena compleja (esfalerita-galena-calcopirita-pirita) y finalmente hacia asociaciones de baja temperatura dominadas por calcita y rodocrosita al Sur del distrito. Esta zonación vertical y lateral, desarrollada dentro del mismo paquete volcánico, confirma la función de la Unidad Portovelo como metalotecto regional que concentra y organiza la mineralización en tres series en échelon de norte a sur (Bonilla Guevara, 2010a).

La estrecha correspondencia espacial entre la Unidad Portovelo y los clavos mineralizados en profundidad, junto con la coincidencia de esta unidad con el cinturón de intrusivos granodioríticos-dioríticos alineados NO-SE, respalda la interpretación de un sistema epitermal de sulfuración intermedia vinculado a magmatismo de arco terciario (Bonilla Guevara, 2010a).

En este modelo, la Unidad Portovelo actúa simultáneamente como: (i) secuencia receptora de fluidos, por su elevada permeabilidad secundaria, (ii) sello local y medio de contrate reológico que favorece jogs y brechamiento hidráulico, y (iii) medio reactivo para procesos de intercambio iónico roca-fluido que contribuyen a la precipitación de sulfuros y oro, especialmente en las zonas de stockworks y brechas blancas y negras asociadas a la Veta Vizcaya y filones análogos del distrito (Bonilla Guevara, 2010a).

- Serie Muluncay:

Constituye un metalotecto de menor extensión, pero alta importancia en el sector Norte del distrito Zaruma-Portovelo, donde hospeda parte significativa de la mineralización epitermal asociada al sistema Minas Nuevas-Muluncay. Se dispone estratégicamente por debajo y lateralmente respecto a la Serie Portovelo, exponiendo niveles algo más profundos del sistema hidrotermal dentro del mismo paquete volcánico terciario.

La Serie Muluncay forma parte del conjunto volcánico asignado a la Unidad Portovelo y aflora principalmente al norte del distrito, en el entorno de las minas Minas Nuevas y Muluncay, donde fue delimitada y cartografiada como una sucesión de tobas andesíticas, brechas volcánicas y lavas subordinadas. Estas rocas muestran texturas piroclásticas de grano fino a medio, con fragmentos

líticos andesíticos y cristales de plagioclasas y hornblenda inmersos en una matriz vítrea alterada, lo que favorece una respuesta más dúctil-frágil frente a la deformación y facilita el desarrollo de zonas de cizalla y fracturamiento intenso (Bonilla Guevara, 2010a).

Propiedades como metalotecto: las tobas y brechas volcánicas de la Serie Muluncay presentan buenas condiciones de porosidad primaria intergranular y porosidad secundaria asociada a disolución y microfracturación, que se ven reforzadas por un fuerte fracturamiento tectónico ligado al corredor de cizalla Zaruma-Portovelo. Esta combinación de porosidad y permeabilidad, sumada a la presencia de contactos litológicos contrastantes entre niveles masivos y niveles piroclásticos más "blandos", convierte a la serie Muluncay en un medio particular propicio para canalizar fluidos hidrotermales y concentrar mineralización en vetas, stockworks y brechas hidrotermales asociadas al sistema Minas Nuevas-Muluncay.

Relación con la mineralización Minas Nuevas-Muluncay: en el sistema Minas Nuevas-Muluncay, la mineralización se organiza en vetas y cuerpos filonianos que aprovechan fracturas de alto ángulo estructuras en échelon, alojadas preferentemente en las tobas y brechas de la Serie Muluncay. La paragénesis registra una evolución desde asociaciones tempranas clorita-esfalerita-pirita-calcopirita con oro fino en los márgenes, hasta bandas centrales con cuarzo, clorita, esfalerita rica en Fe, calcopirita, sulfosales y magnetita-hematita, indicando un enfriamiento progresivo de los fluidos en un mismo metalotecto volcánico piroclástico. Estas características confirman a la Serie Muluncay como un metalotecto clave en el norte del distrito, complementario a la Serie Portovelo y controlado por el mismo sistema de fallas regionales (Pérez, 2026).

- Intrusivos subvolcánicos y riolíticos**:**

En el marco del DMZP, los intrusivos subvolcánicos y riolíticos constituyen un elemento metalogenético clave, tanto por su papel como fuentes de calor y metales como por su control estructural sobre el emplazamiento de vetas epitermales de Au-Ag y sulfuros de metales base. Estos cuerpos intrusivos, de composición predominante riolítica, granodiorítica y diorítica, se asocian al magmatismo de arco terciario que afecta al Grupo Saraguro y a la Unidad Portovelo en el Suroeste de los Andes ecuatorianos (Pérez, 2026).

Desde el punto de vista geológico, se reconocen stocks y diques subvolcánicos de riolitas afíricas y andesitas porfídicas que cortan la secuencia volcánica intermedia a silícea de la Unidad Portovelo, así como cuerpos granodioríticos y dioríticos situados principalmente en la periferia del distrito y alineados en sentido NO-SE junto al cinturón intrusivo del Anticlinorio Cangrejos. Estos intrusivos conforman centros emisores y conductos magmáticos someros que aportan calor al sistema hidrotermal condicionan la distribución de las zonas de alteración propilítica, fílica y silicificación intensa que envuelven a las vetas mineralizadas (Bonilla Guevara, 2010a).

La relación espacial entre intrusivos y mineralización se manifiesta en la concentración de numerosos filones importantes en los contactos o en la vecindad inmediata de estos cuerpos, donde los contrastes reológicos y térmicos favorecen el desarrollo de fracturas, brechas hidráulicas y jogs dilatacionales. En estos entornos, los fluidos hidrotermales metalíferos ascendieron a lo largo de fallas transcurrentes y estructuras en échelon asociadas a la falla Piñas-Portovelo, generando vetas de cuarzo-sulfuros, stockworks y brechas blancas y negras típicas de sistemas epitermales de sulfuración intermedia (Bonilla Guevara, 2010a) .

Geoquímicamente (Fig.6), los intrusivos granodioríticos y dioríticos se interpretan como la

fuente principal de metales base (Cu, Zn, Pb) y parte del Au-Ag, mientras que las riolitas subvolcánicas estan vinculadas a pulsos tardíos de fluidos más oxidantes y ricos en sílice, responsables de la silicificación masiva y del desarrollo de texturas crustiforme-coloforme y de cuarzo en peine en sectores como Vizcaya-Nicole y Portovelo. La superposición de estos pulsos magmáticos e hidrotermales en torno a los intrusivos explica la compleja secuencia paragenética multiepisódica observada en las vetas, con dos etapas principales de ebullición y brechamiento que concentra el oro en electrum, telururos y asociaciones de sulfuros de metales base. (i) generan el gradiente térmico necesario para la circulación de fluidos hidrotermales, (ii) aportan una fracción significativa de metales al sistema, y (iii) controlan, por contraste reológico y fracturamiento, la nucleación y crecimiento de los filones epitermales a lo largo de la Unidad Portovelo y las unidades volcánicas asociadas (Fig.6).

La figura 6 muestra un mapa de mineralización y alteración epitermal de sulfuración intermedia en el distrito Zaruma-Portovelo, que muestra la distribución de vetas, fallas principales y litologías hospedantes en torno a la falla Piñas-Portovelo. Modificado de Lomas et al. (2022).

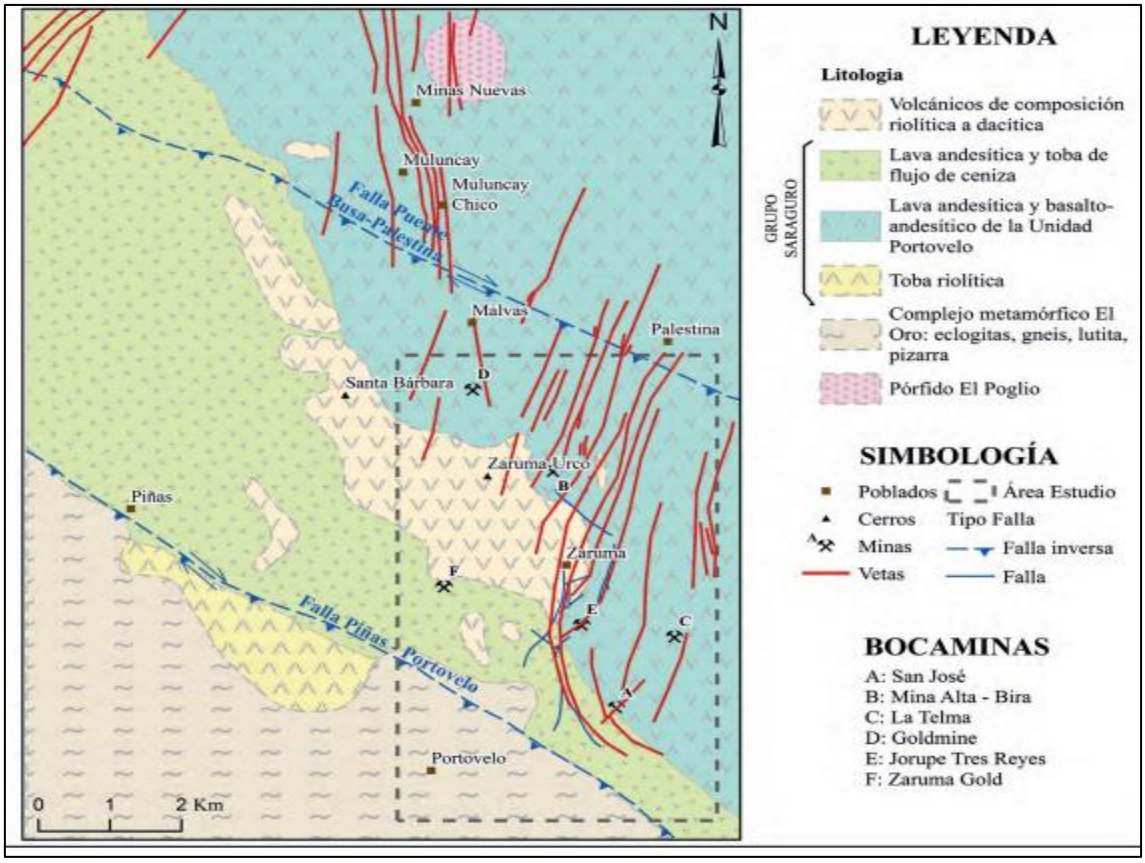


Figura 6 Mineralización y alteración epitermal de intermedia sulfuración de Zaruma-Portovelo, Ecuador. Tomado de Lomas et al. (2022).

- Estructuras tectónicas (metalotectos estructurales)

  - Falla Piñas-Portovelo y fallas subordinadas:

La falla Piñas-Portovelo es una sutura de rumbo NO-SE que limita por el Sur la faja aurífera Zaruma-Portovelo y concentra un sistema de fallas asociadas N-S y NO-SE (como el sistema Puente de Buza-Palestina), que segmenta el campo de vetas y controla su continuidad y potencia (Fig.7)

Este corredor transcurrente genera zonas de cizalla y fracturación intensas en la volcanitas de la Unidad Portovelo, favoreciendo la formación de duplexes extensivos y jogs dilatacionales que actuaron como conductos principales para fluidos hidrotermales mineralizantes durante los pulsos Oligoceno-Mioceno (Bonilla Guevara, 2010a) .

En los bloques limitados por estas fallas se observa una clara zonación estructural y metalogénica: los segmentos más favorables corresponden a sectores donde las fallas NO-SE y N-S se solapan o flexionan, produciendo espacios abiertos donde se emplazan vetas de cuarzo-sulfuros con espesores métricos y continuidad lateral kilométrica. Esta configuración convierte a la falla Piñas-Portovelo y a sus subfallas en metalotectos estructurales prioritarios para la exploración, ya que delimitan el corredor donde se superponen fracturación, permeabilidad secundaria y focos de alteración hidrotermal (Van Thournout et al., 1996).

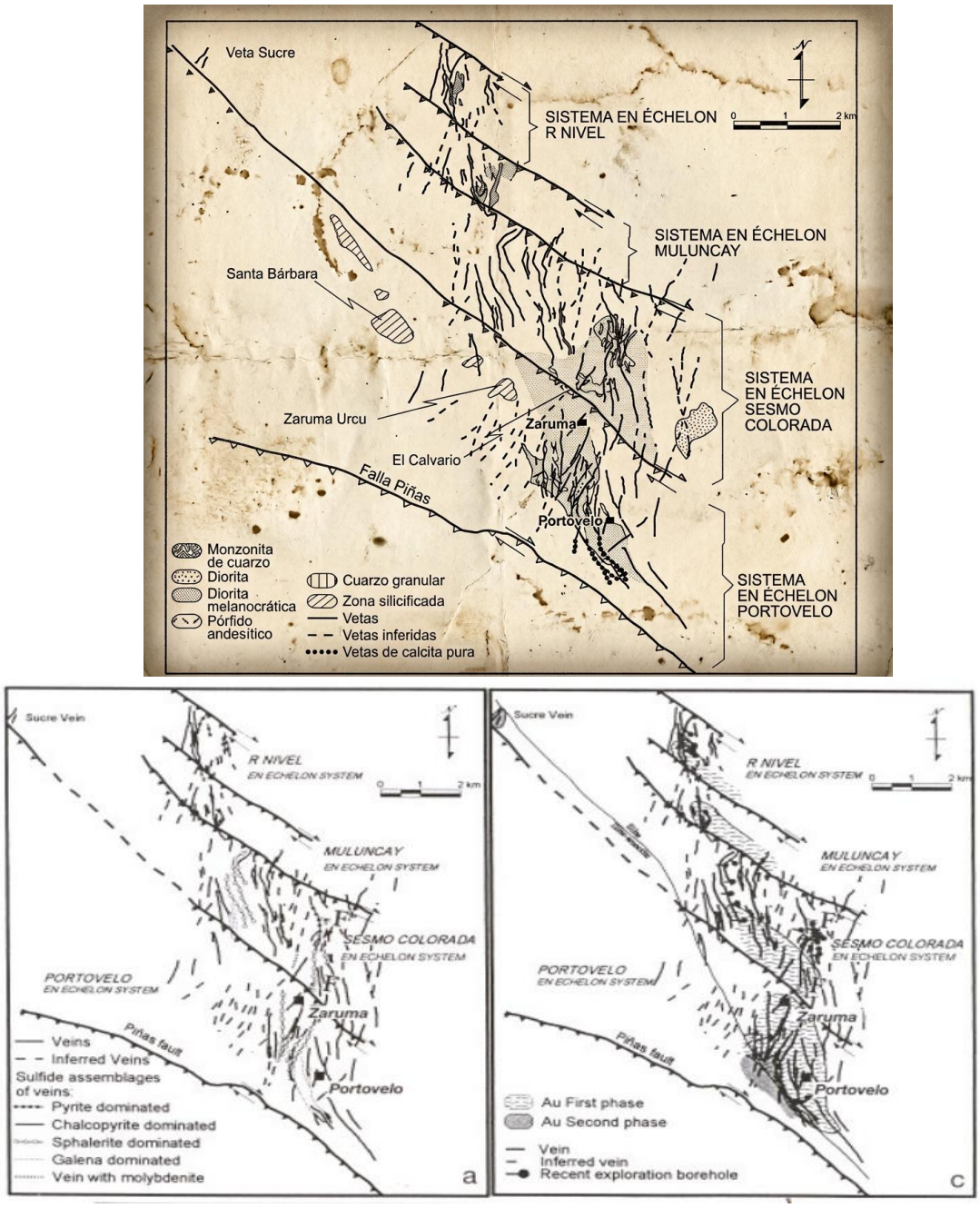


Figura 7. El campo minero de Portovelo-Zaruma, suroeste de Ecuador: ambientes de pórfido y epitermales, mapa estructural simplificado. Spencer et al. 2002.

- Jog estructurales y zonas de brechamiento hidrotermal:

En las intersecciones, bifurcaciones y cambios de rumbos de las fallas principales se desarrollan jogs estructurales donde la componente extensiva del régimen transpresivo generó zonas de dilatación y sobrepresión de fluidos. Estos volúmenes se caracterizan por brechas blancas y negras, stockworks de cuarzo, y texturas crustiformes-coloidales, que registran episodios repetidos de brechamiento hidráulico y relleno hidrotermal, íntimamente asociados con los máximos contenidos de Au y Ag dentro de las vetas (Fig.8).

Las vetas minerales siguen predominantemente sistemas de fracturas N-S y NO-SE, y donde estos sistemas se cruzan o curvan se concentran zonas de brechamiento hidrotermal y vetilleo denso que funcionan como verdaderas trampas metalogénicas. Desde el punto de vista de prospección los jogs dilatacionales, duplexes extensivos y cuerpos de brecha hidrotermal asociados a la falla Piñas-Portovelo y sus subfallas representan metalotectos estructurales de alta prioridad, ya que integran controles cinemáticos, permeabilidad y evidencia directas de focos de precipitación de sulfuros y oro (Spencer et al., 2002).

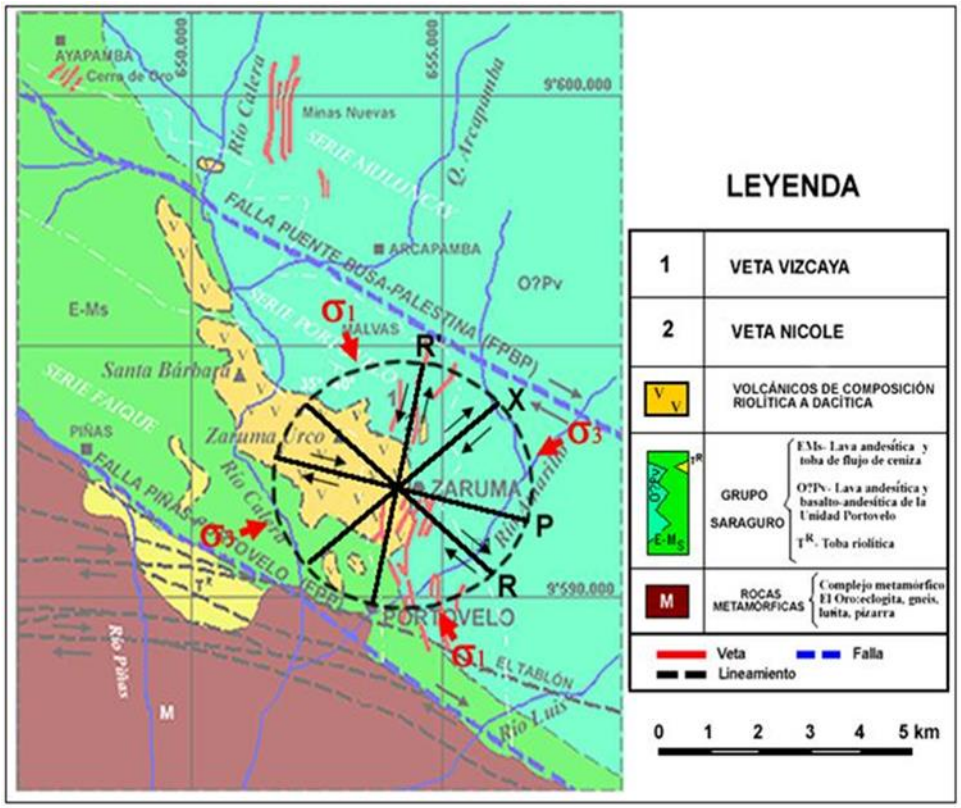


Figura 8. Modelo de cizallas de Riedel aplicadas al DMZP y su relación con la mineralización. R = cizalla sintética, R' = cizalla antitética, X = fractura de cizallamiento, P = cizalla sintética secundaria, σ1 dirección del esfuerzo principal máximo (NO-SE a NNO-SSE) y σ 3 esfuerzo principal mínimo. Las vetas Vizcaya y Nicole se localizan preferentemente en intersecciones R-R' y R-X, donde la distensión relativa favorece la permeabilidad y la precipitación de sulfuros y oro. Tomado de Bonilla, 2010.

En el modelo estructural del DMZP, la orientación del esfuerzo principal máximo σ1σ desde los cuadrantes NO–SE a NNO–SSE genera un sistema de cizallas conjugadas de tipo Riedel (R, R', X y P) que controla la apertura y reactivación de vetas mineralizadas. Las vetas principales (por ejemplo, Vizcaya y Nicole) se ubican en segmentos R y en intersecciones R–R' y R–X, donde se combinan cizallas sintéticas y antitéticas, lo que incrementa la permeabilidad del macizo rocoso y permite el

ascenso de fluidos hidrotermales mineralizantes. Este patrón de deformación explica la concentración de focos de precipitación de sulfuros y oro a lo largo de las estructuras NE–SO que limitan el corredor Zaruma–Portovelo.

➢ Rasgos de alteración hidrotermal asociados a metalotectos

- Alteración propilítica, argílica y silicificación:

En la roca de caja andesítica de la Unidad Portovelo se reconocen amplios halos de alteración propilítica caracterizados por asociaciones de clorita, epidota, carbonatos (cb) y pirita, que reemplazan sistemáticamente minerales máficos y plagioclasas cálcicas definiendo una alteración perfusiva en torno a los filones. Sobre esta alteración se superponen dominios argílicos (arcillas tipo illita/esmectita, sericita) y zonas de silicificación intensa (cuarzo microgranoso y cuarzo más grueso, con adularia subordinada), generando una zonación aparente en "capas concéntricas" tipo telescoping alrededor de la veta Vizcaya y otros filones principales (Berrezueta et al., 2021).

Estos halos concéntricos de alteración, donde la propilitización y silicificación perfusiva son especialmente desarrolladas en el encajonante inmediato, reflejan el tránsito de los fluidos desde condiciones de mayor temperatura y pH cercano a neutro hacia ámbitos algo más fríos y ligeramente más ácidos. La presencia conjunta de clorita, epidota, carbonatos y cuarzo en la roca encajante señala zonas preferenciales de paso de fluidos metalíferos dentro de los metalotectos estructurales definidos por las fallas Piñas-Portovelo y Puente de Buza-Palestina.

➢ Secuencia paragenética y pulsos hidrotermales

A escala de todo el distrito, la secuencia paragenética se organiza en al menos 5 estadios, bien representados en la veta Vizcaya y extrapolados al resto de vetas principales. De forma sintética se observa:

⌖ Un estadio temprano de alta temperatura dominado por cuarzo microgranoso y pirita, acompañado de alteración propilítica (clorita, epidota y carbonatos) en la roca caja.

⌖ Estadios intermedios donde se desarrolla la paragénesis "compleja" de sulfuros de metales base (esfalerita + galena + calcopirita +- bornita), aún con abundante pirita y cuarzos de varias generaciones, que concentran la mayor parte de oro (electrum) y plata (Bonilla Guevara Wilson Rodrigo, 2010c).

⌖ Un estadio tardío de menor temperatura, caracterizado por disminución marcada de sulfuros y mayor proporción de carbonatos (calcita bladed, rodocrosita) y óxidos/hidróxidos de Fe y Mn, asociados a vetas como Tablón.

Esta evolución define un gradiente longitudinal Norte-Sur y vertical: hacia el Norte y a mayores profundidades dominan asociaciones de mayor temperatura (pirita-calcopirita), mientras que hacia el centro-Sur se imponen ensamblajes intermedios ricos en esfalerita-galena-calcopirita, y finalmente zonas de baja temperatura con escasos sulfuros y abundantes carbonatos. El distrito se inscribe así en el cinturón Mioceno de depósitos porfiríticos y epitermales del Sur del Ecuador, donde los sistemas epitermales auríferos se disponen como "hanging-wall" de pórfidos Cu-Au, compartiendo parte de la historia magmático hidrotermal (Bonilla Guevara, 2010b).

➢ Caracterización geoquímica y físico-estructural

La caracterización geoquímica y físico-estructural del distrito Zaruma-Portovelo refuerza su interpretación como sistema epitermal de sulfuración intermedia hospedado en volcanitas

calcoalcalinas de la Unidad Portovelo, con firmas elementales Au-Ag-Cu-Pb-Zn y un sello particular Ag-Pb para el distrito (Bonilla Guevara, 2010a).

- Hospedantes calcoalcalinos y comportamiento físico-estructural

Las rocas encajantes de la mineralización corresponden principalmente a lavas andesíticas y tobas andesítico-dací-ticas de la Unidad Portovelo (Grupo Saraguro), con afinidad calcoalcalina a calcoalcalina-alcalina propia de un arco continental oligoceno-mioceno. Estos cuerpos volcánicos forman un paquete máfico-intermedio intensamente fracturado por la falla Piñas-Portovelo y por sistemas de fallas N-S y NO-SE, cuya competencia y reactividad favorecieron la apertura de espacios tensionales (jogs, duplexes, brechas) y permitieron el ingreso repetido de fluidos metalíferos en múltiples pulsos hidrotermales (Bonilla Guevara, 2010d).

Desde el punto de vista físico-estructural (Fig.9), la presencia de andesitas y tobas relativamente rígidas, pero con contrastes mecánicos internos (fenocristales, líticos, cambios de facies) condiciona la localización de venas en zonas de cizalla y fracturas extensionales, donde se desarrollan texturas crustiformes, brechas de cementación y stockworks. Este comportamiento mecánico convierte a ciertos niveles volcánicos dentro de la Unidad Portovelo en metalotectos litológico-estructurales, especialmente donde coinciden con jogs dilatacionales entre la falla Piñas-Portovelo y subfallas como Puente Buza-Palestina. La figura 9 muestra la caracterización mineralógica y petrográfica de las vetas Vizcaya, Octubrina y Gabi del yacimiento aurífero epitermal Zaruma-Portovelo, Ecuador y un mapa con la geología simplificada y las principales formaciones geológicas, estructuras y venas mineralizadas, tomado de Berrezueta et al. (2021).

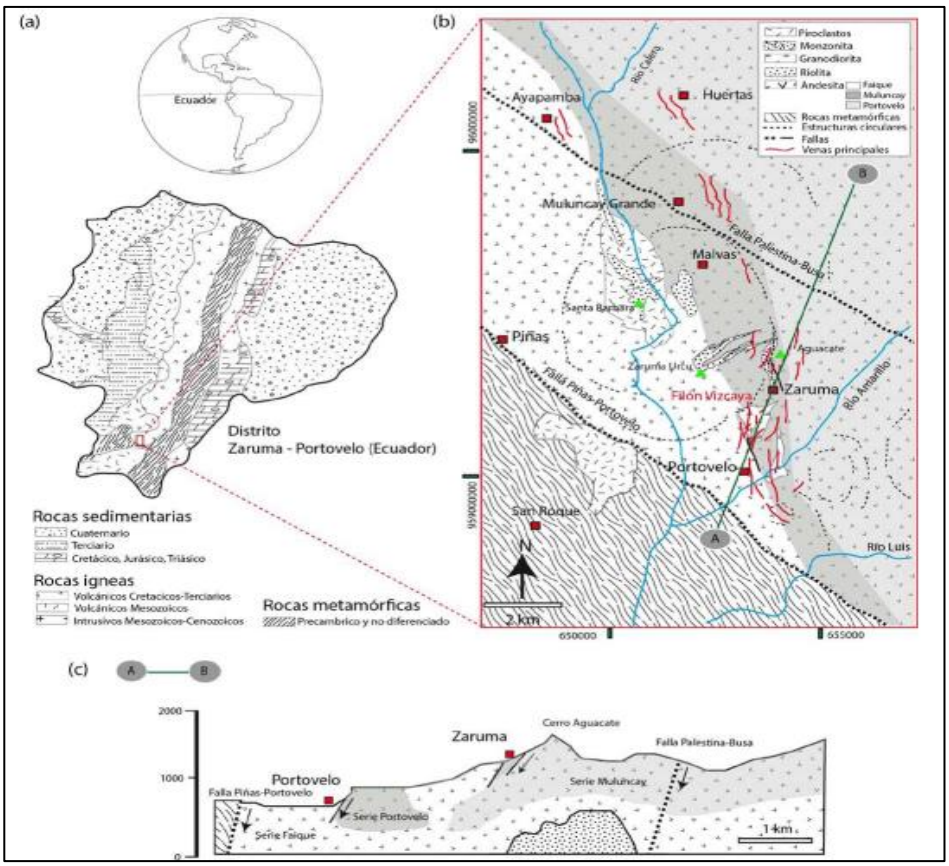


Figura 9 Caracterización mineralógica y petrográfica de las vetas Vizcaya, Octubrina y Gabi del yacimiento aurífero epitermal Zaruma-Portovelo, Ecuador. Mapa con la geología simplificada + principales formaciones geológicas, estructuras y venas mineralizadas. Tomado de Berrezueta et al. (2021).

- Firma geoquímica Au-Ag-Cu-Pb-Zn

Geoquímicamente, el distrito muestra enriquecimientos sistemáticos en Au, Ag, Cu, Pb y Zn en las vetas y en los halos de alteración inmediata (propilítica-argílica-silícica), coherentes con un sistema epitermal de sulfuración intermedia con fuerte componente polimetálico (Fig.10). Descripciones metalogénicas regionales sitúan a Zaruma-Portovelo dentro del cinturón mioceno de pórfidos Cu-Au y sistemas epitermales del sur de Ecuador, donde las asociaciones Au-Ag-Cu-Pb-Zn son típicas de depósitos epitermales ligados a intrusivos calcoalcalinos (Bolaños, 2015).

En el interior del distrito se observa además una zonación geoquímica: dominios más profundos y al norte con mayor proporción de Cu y Zn asociados a pirita-calcopirita, y sectores más superficiales y al sur con mayor presencia de Pb y Ag y vetas cuarzo-carbonato con sulfuros subordinados. Estas variaciones laterales y verticales en Au-Ag-Cu-Pb-Zn constituyen una herramienta de exploración para delimitar metalotectos favorables, ubicando las mejores intersecciones estructurales coincidentes con anomalías geoquímicas multielemento.

- Asociación Au-Ag y sello Ag-Pb del distrito

Los estudios de huella química multielemento en concentrados y muestras de mena muestran que Zaruma-Portovelo se caracteriza por una asociación Au-Ag donde la plata suele estar enriquecida respecto al oro, y especialmente por altos contenidos de Ag y Pb frente a otros distritos ecuatorianos. Enríquez-Almeida y Quezada-Ochoa (2021) demostraron que más del 70% de las muestras de Zaruma-Portovelo presentan contenidos de Ag superiores a 8,4 g/t y de Pb superiores a 180 g/t, con un valor medio de Pb del orden de 1 900 g/t, lo que define a Ag y Pb como elementos identificadores de procedencia del distrito.

Este sello geoquímico Ag-Pb (fig.10), junto con la presencia sistemática de Cu y Zn en las vetas, permite diferenciar el oro de Zaruma-Portovelo de otros campos como Nambija, donde la firma está dominada por tierras raras (Ce, Er, Gd, Lu, Nd, Y) y elementos como U, P y Zr. En términos de metalotectos, las combinaciones Au-Ag y Ag-Pb de alta ley, asociadas a vetas controladas por la falla Piñas-Portovelo y sus jogs, permiten definir dominios estructurales y geoquímicos prioritarios para exploración y trazabilidad del metal producido (Bonilla Guevara, 2010).

Los metalotectos del Distrito Zaruma-Portovelo son definidos por unidades volcánicas permeables y altamente fracturadas (principalmente andesitas y tobas de la Unidad Portovelo), su relación con intrusivos subvolcánicos y controles estructurales complejos (fallas, jogs y brechas), así como por su geología de alteración hidrotermal y geoquímica distintiva. Todo esto delimita los espacios más favorables para la concentración de oro y metales polimetálicos en el distrito (Bonilla Guevara, 2010).

La figura 10 muestra en el diagrama de las asociaciones de minerales de alteración hidrotermal, en el campo de los sistemas epitermales la dirección de flujo (flecha roja), Veta Vizcaya. Tomado de Corbett y Leach 1998.

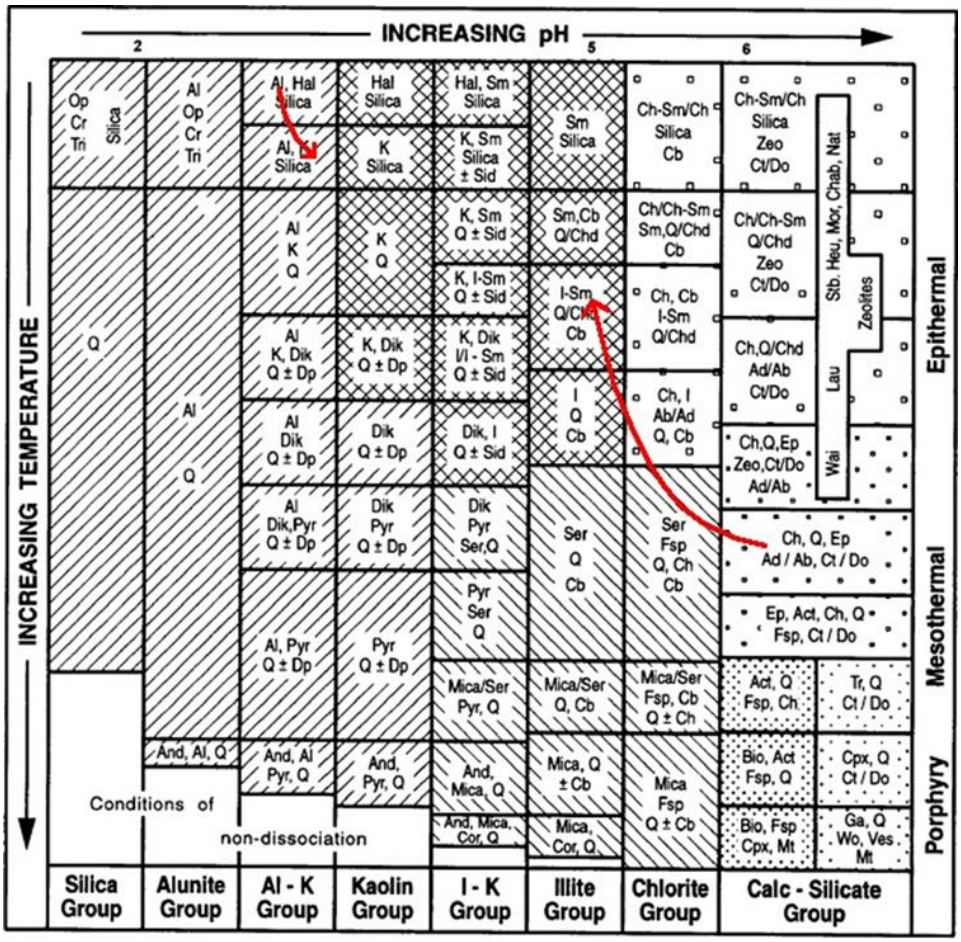


Figura 10 Dirección de Flujo (flecha roja) de las asociaciones de minerales de alteración hidrotermal en el campo de los sistemas epitermales, Veta Vizcaya. Tomado de Corbett y Leach 1998.

6. MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

6.1. Los metalotectos como guía de prospección y exploración

En el marco del enfoque de sistemas minerales, los metalotectos constituyen elementos fundamentales para reducir el área de búsqueda y priorizar blancos durante las etapas iniciales y avanzadas de prospección y exploración. Se entiende por metalotecto cualquier rasgo geológico litológico, estructural, geoquímico, paleogeográfico o alteracion, estrechamente vinculado con la formación o localización de un depósito mineral, cuya presencia indica condiciones favorables para la concentración de metales de interés económico (Pohl, 2022b).

En el DMZP (Grupo Saraguro) y sus series volcánicas andesíticas y basalto-andesíticas constituyen el principal metalotecto litológico, al configurarse como un paquete de rocas calcoalcalinas intensamente fracturadas y afectadas por intrusivos subvolcánicos diorítico-granodioríticos que aportaron calor y metales a los sistemas epitermales de Au-Ag-Cu-Pb-Zn. La combinación de competencia mecánica, elevada fracturabilidad y buena permeabilidad secundaria convierte a estas volcanitas en rocas huéspedes preferenciales para el relleno de vetas, stockworks y brechas hidrotermales mineralizadas (Corbett, 2012.).

Desde el punto de vista estructural (Fig.11), la falla Piñas-Portovelo y los sistemas de fallas subordinadas con rumbo predominante N-S y NO-SE definen un corredor de cizalla transcurrente que genera jogs dilatacionales, dúplex extensionales y zonas de brechamiento hidráulico, los cuales actúan como metalotectos estructurales de primer orden al concentrar la mayoría de los filones del distrito. En el marco de los modelos metalogénicos modernos aplicados a sistemas epitermales, estos dominios de dilatación se interpretan como trampas estructurales de alto potencial, por su capacidad para controlar la arquitectura y continuidad de los ore shoots auríferos (Australian Institute Geoscientists, 2001).

A escala de alteración y halos de exploración (Fig.11), los cinturones concéntricos de alteración propilítica, argílica y silícica que rodean a las vetas y brechas mineralizadas constituyen metalotectos hidrotermales que permiten vectorizar hacia las zonas de mayor flujo de fluidos mineralizantes. La presencia sistemática de asociaciones clorita-epidota-carbonatos-pirita (propilitización) superpuestas por dominios de argilización (illita-esmectita, sericita) y silicificación intensa es típica de sistemas epitermales de sulfuración intermedia, lo que justifica el uso de cartografía de alteración, espectroscopía de reflectancia y geoquímica de halos como herramientas clave de delimitación de áreas prioritarias (Gemmell, 2006.).

La firma geoquímica multielemento Au-Ag-Cu-Pb-Zn, con un sello característico Ag-Pb que distingue al distrito frente a otros campos auríferos ecuatorianos, funciona como metalotecto geoquímico regional que permite discriminar dominios de mayor prospectividad. En términos de análisis de sistemas minerales, la superposición espacial de metalotectos litológicos (Unidad Portovelo), estructurales (fallas Piñas Portovelo y jogs asociados), hidrotermales (halos de alteración) y geoquímicos (anomalías multielemento) constituye la base para la construcción de mapas de prospectividad y modelos predictivos a escala distrito (Corbett, 2012).

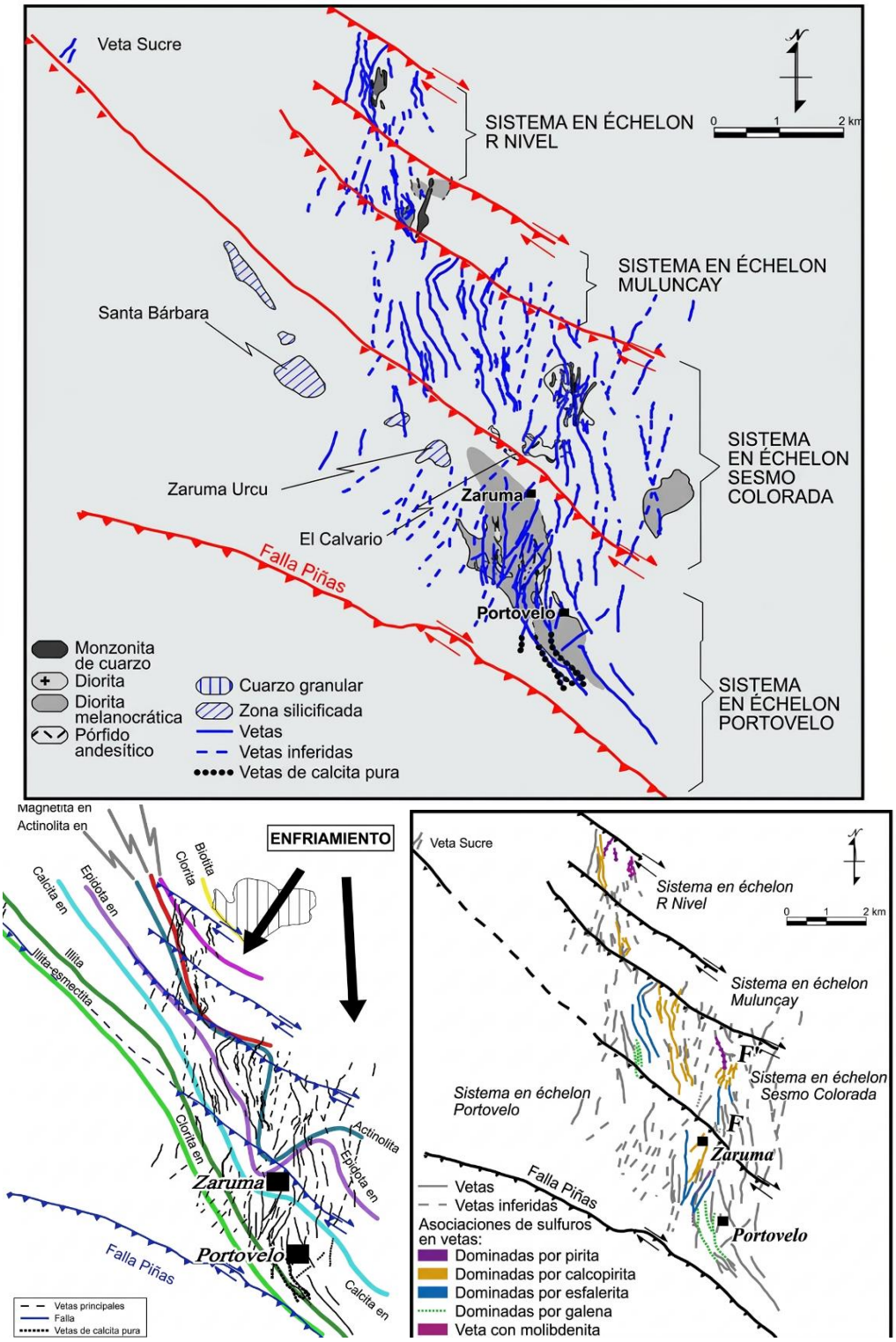


Figura 11 (a) Arreglo estructural de las vetas del distrito Zaruma-Portovelo y su relación con las fallas regionales. (b) Evolución espacial de las vetas y de las asociaciones minerales a lo largo del corredor Zaruma-Portovelo durante el enfriamiento del sistema hidrotermal. (c) Distribución de vetas y zonación de asociaciones de sulfuros en los sistemas en échelon del distrito Zaruma-Portovelo. Kalinaj 2004.

La técnica de exploración propuesta para el DMZP se estructura en torno a los principios del análisis de sistemas minerales y de los modelos metalogénicos integrados, priorizando la identificación, cartografía y cuantificación de metalotectos en un entorno de sistemas de información geográfica y modelamiento tridimensional. En una primera fase, se desarrolla una revisión sistemática de literatura científica, cartografía geológica y metalogénica, informes técnicos e investigaciones de postgrado, con el objetivo de definir los metalotectos dominantes y formular un modelo conceptual de sistema epitermal de sulfuración intermedia asociado a intrusivos porfídicos someros (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022b).

Sobre esta base conceptual, la técnica se organiza en 3 grandes bloques complementarios:

- Cartografía geológica – estructural detallada.
- Prospección geoquímica multimedio.
- Aplicación de métodos geofísicos orientados a la detección de estructuras y contrastes físicos vinculados a zonas de alteración y brechamiento.

La cartografía estructural se apoya en el análisis cinemático de fallas y fracturas, aplicando modelos de cizalla tipo Riedel para delimitar dominios de cizalla, jogs y duplexes extensionales que concentran vetas auríferas y estableciendo sus relaciones espaciales con la Unidad Portovelo y los intrusivos asociados.

En el componente geoquímico, se plantea el muestreo sistemático de suelos, rocas de caja y material de vetas a lo largo de secciones perpendiculares a las estructuras principales, con análisis multielemento (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg) destinados a delimitar halos anómalos y definir vectores geoquímicos hacia los focos de mineralización (Australian Institute Geoscientists, 2001). El tratamiento estadístico de estos datos, mediante técnicas de análisis multivariante y métodos de interpolación espacial, permite cuantificar el grado de coincidencia entre anomalías geoquímicas y metalotectos estructurales, optimizando la selección de blancos de perforación para operaciones de pequeña y mediana minería.

De forma complementaria, la aplicación de métodos geofísicos (como, por ejemplo: magnetometría terrestre, métodos electromagnéticos y donde resulte viable se puede aplicar magnetotelúrica de reconocimiento) se orienta a cartografiar la profundidad de intrusivos subvolcánicos, zonas de brechamiento y cuerpos intensamente alterados, considerados metalotectos volumétricos que no siempre pueden reconocerse en superficie.

Adicionalmente, la integración de modelos digitales de terreno, fotointerpretación estructural y datos de sensores remotos (Landsat, Sentinel e información hiperespectral disponible) contribuye a delimitar zonas de alteración hidrotermal y cambios morfoestructurales sutiles, reforzando el modelo de metalotectos a escala regional y local.

Finalmente, toda la información generada (litología, estructuras, intrusivos, alteración, geoquímica y geofísica) se integra en un entorno SIG y de modelamiento geológico tridimensional, donde se construyen volúmenes de probabilidad de mineralización asociados a la superposición de metalotectos previamente definidos. Esta aproximación permite priorizar sectores para campañas de perforación escalonadas y focalizar los recursos disponibles de la pequeña minería en blancos de alta probabilidad, reduciendo el riesgo geológico y contribuyendo a una exploración más eficiente y ambientalmente responsable en el DMZP (Melcher, 2021).

7. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN Y TRATAMIENTO

7.1. Métodos de explotación

En el distrito minero Zaruma-Portovelo la explotación de los filones auríferos – polimetálicos se realiza casi exclusivamente mediante minería subterránea, orientadas a vetas de cuarzo-sulfuros que se encuentran alojadas en andesitas y tobas de la Unidad Portovelo y de la Serie Muluncay.

Las operaciones se desarrollan mayoritariamente bajo esquemas de minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), con un alto número de concesiones de reducida dimensión, frentes de explotación dispersos y niveles limitados de mecanización, lo que condiciona la selección de métodos de laboreo de baja tecnificación. (Sandoval, 2001).

Los métodos de explotación (Fig.12) se basan en variantes de cámaras y pilares, corte y relleno y explotación por subniveles sobre vetas de alto ángulo, adaptados a la geometría estrecha y continuidad lateral de los filones. En algunos sectores con vetas de espesores entre 0.3 y 1.5 m se emplean tajos estrechos con sostenimiento puntual y ocasional relleno con desmonte, mientras que en zonas de mayor potencia de veta se desarrollan cámaras más amplias, subdivididas por pilares de seguridad (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022).

En muchas faenas de minería de pequeña escala el acceso se realiza a través de socavones horizontales, galerías principales y chimeneas de ventilación y transporte, que siguen el rumbo N-S o NO-SE de las vetas principales por ejemplo Vizcaya, Portovelo, Sexmo-Miranda, Minas Nuevas-Muluncay. La extracción del mineral se efectúa mediante perforación y voladura con martillos neumáticos o máquinas barrenadoras YT 27 y explosivos convencionales, con ciclos cortos de arranque, limpieza manual o mecanizada que es limitada para ciertas minas, y transporte inicial en vagones o por gravedad hacia tolvas y piques (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2023).

Los estudios recientes del IIGE han documentado que en el contexto MAPE (Minería Artesanal y de Pequeña Escala) del distrito los diseños de malla de perforación, los factores de carga y los controles geomecánicos son frecuentemente empíricos, generando problemas de sobre-rotura, fragmentación deficiente y afectación de la estabilidad de los caserones. Como respuesta, se están implementando propuestas de mejora técnica que incluyen caracterización geomecánica del macizo, modelación de voladura, monitoreo de deformaciones y optimización de mallas, con el objetivo de reducir sobreexcavaciones, mejorar el factor de recuperación y disminuir riesgos de hundimientos, especialmente bajo el casco urbano del cantón Zaruma (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022).

En conclusión, la explotación en el distrito minero Zaruma-Portovelo se caracteriza por:

- Minería subterránea selectiva sobre vetas epitermales.
- Métodos de cámaras y pilares, tajos estrechos y corte-relleno adaptados a pequeñas y mediana minería.
- Un fuerte componente artesanal que coexiste con esfuerzos recientes de tecnificación y control geotécnico impulsados por el IIGE y la normativa nacional.

La figura 12 muestra un esquema general de explotación subterránea MAPE en el DMZP.

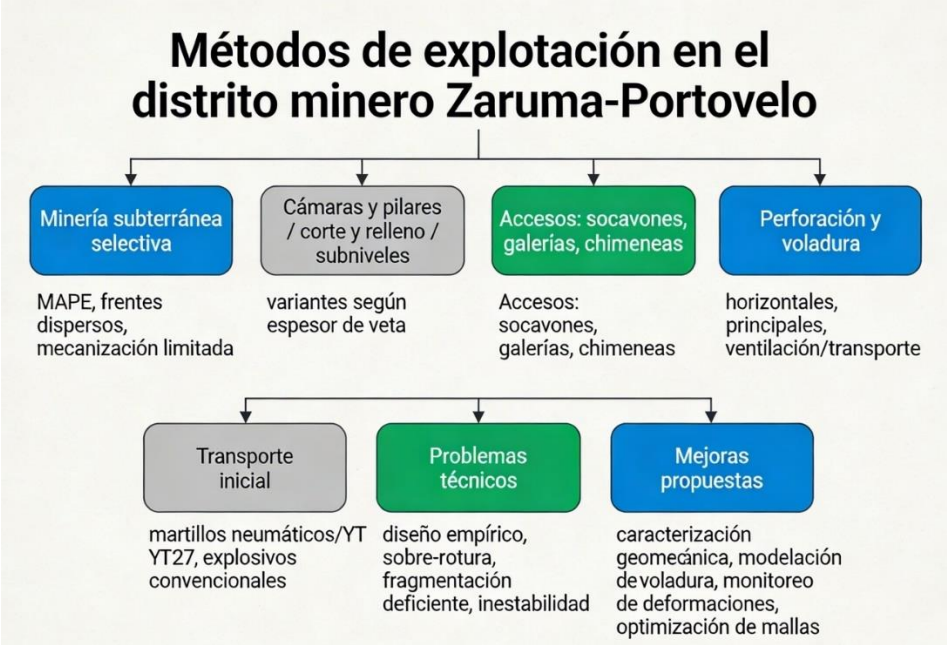


Figura 12 Esquema general de explotación subterránea MAPE en el distrito minero Zaruma – Portovelo.

7.2. Procesos metalúrgicos

El tratamiento de los minerales auríferos del DMZP (Fig.13) se desarrolla principalmente en plantas de beneficio privadas ubicadas en el cantón Portovelo sitio el Pache y en el valle del río Puyango, donde reciben mineral de cientos de minas de pequeña y mediana escala. Este esquema ha dado lugar a un clúster de más de 80-150 plantas de procesamiento, donde se combinan circuitos de conminución, concentración gravimétrica, amalgamación con mercurio que actualmente esta práctica presenta serias limitaciones ambientales y sanitarias y cianuración de relaves, con diferentes grados de tecnificación y control ambiental (Collahuazo González y González, 2018).

El diagrama de flujo típico comienza con la conminución en chancadoras de quijadas y cónicas, seguida de molienda en molinos chilenos, molinos de bolas y en algunos casos molinos de martillos, buscando alcanzar tamaños de liberación del orden de 70-80% bajo 75 µm. Históricamente una parte del mineral o de los concentrados gravimétricos se somete a amalgamación en chanchas (trómeles o tambores rotatorios) o en los mismos molinos chilenos, donde se adiciona mercurio metálico para formar amalgama Au-Hg que posteriormente se retorta a cielo abierto para recuperar el oro (Lane, 2004).

Diversos estudios han demostrado que la amalgamación de todo el mineral (Whole-ore amalgamation) presenta bajas eficiencias metalúrgicas y pérdidas muy elevadas de mercurio, con emisiones estimadas de hasta 1.5 t/año en el distrito, de las cuales aproximadamente 70% se liberaba a la atmósfera y el 30% se pierde con relaves. Como respuesta técnica, diversos estudios han promovido la sustitución de la amalgamación de todo el mineral por circuitos de concentración gravimétrica como mesas vibratorias, canaletas y centrífugas y la restricción del uso de mercurio únicamente a concentrados, con el fin de reducir significativamente su consumo y su pérdida en relaves (Velásquez-López et al., 2010).

Los relaves gravimétricos y/o amalgamados son sometidos posteriormente a cianuración en tanques agitados o en pilas de menor escala, mediante soluciones de cianuro de sodio con tiempos de lixiviación de 24-72 h para recuperar el oro residual. En el DMZP predominan los sistemas de cianuración por lotes (batch) en tanques de agitación con adición de cal, cianuro, zinc y colectores, siendo frecuente el uso de cemento y zinc en procesos tipo Merrill-Crowe o variaciones locales para precipitar el oro de las soluciones cargadas (De y Gonçalves, 2001).

Las investigaciones recientes señalan que la gestión inadecuada de las colas de cianuración y de las soluciones residuales ha provocado episodios de contaminación por cianuro en el sistema fluvial Puyango-Tumbes, asociados a descargas directas de tailings con contenido de Hg y CN- desde al menos 80-90 centros de procesamiento. Para mitigar estos impactos el estado ecuatoriano y el IIGE han impulsado la construcción de instalaciones comunales de relaves (CTF), el monitoreo sistemático de calidad de agua y campañas para implementar retortas individuales de mercurio y la eliminación progresiva de la amalgamación de todo el mineral (Marshall et al., 2020a).

Desde el punto de vista metalúrgico, la mineralogía polimetálica del distrito (pirita, esfalerita, galena, calcopirita, sulfosales) ofrece potencial para circuitos de flotación diferencial que permitan recuperar metales base y mejorar la eficiencia global del proceso, pero su implementación a gran escala en la MAPE ha sido limitado por factores económicos, tecnológicos y de mercado. Propuestas recientes de mejora técnica contemplan la introducción de circuitos gravimétrico - flotación – cianuración, la optimización del tamaño de molienda para mejorar la liberación del oro encapsulado y el diseño de balances de masa y energía en plantas, con el fin de reducir consumos de reactivos, mejorar recuperaciones y minimizar la huella ambiental de las plantas de beneficio de Zaruma-Portovelo (Samaniego Moya, 2024).La figura 13 esquematiza los métodos de explotación y beneficio mineral en el DMZP.

Figura 13 Métodos de explotación y beneficio mineral en el DMZP.

8. IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIO-ECONÓMICOS ANTE UNA EVENTUAL PRODUCCIÓN

8.1. Introducción

El Distrito Minero Zaruma-Portovelo (DMZP)se localiza en la cuenca alta del río Puyango-Tumbes, un sistema transfronterizo entre Ecuador y Perú que ha sido fuertemente impactado por descargas de relaves con cianuro, mercurio y metales pesados procedentes de más de 80 plantas de beneficio que procesan oro. La eventual intensificación de la producción aurífera implica un aumento de remoción de rocas, generación de galerías subterráneas, volúmenes de relaves y consumos de reactivos sobre un entorno geomorfológicamente inestable y con alta sensibilidad hidrológica y ecológica (Marshall et al., 2020a).

Los principales impactos ambientales incluyen:

- Subsidencias y deslizamientos asociados a labores subterráneas bajo el casco urbano y laderas inestables.
- Contaminación de aguas superficiales y sedimentos por cianuro, mercurio y metales traza.
- Alteración de suelos por disposición inadecuada de relaves y desmontes
- Pérdida y fragmentación de hábitats ribereños y andinos. En el plano socio-económico, la producción genera empleo e ingresos locales, pero también genera costos ambientales y sanitarios aguas abajo, afectando comunidades agrícolas y pesqueras de la cuenca Puyango-Tumbes e intensificando conflictos socioambientales.

8.2. Línea de base ambiental

8.2.1. Línea de base ambiental del medio físico

La siguiente línea base ambiental del DMZP describe el estado actual del medio físico y de la calidad ambiental, incorporando los efectos acumulativos de más de un siglo de minería aurífera y procesamiento de minerales. Metodológicamente conviene estructurarla en subcomponentes (Fig. 14):

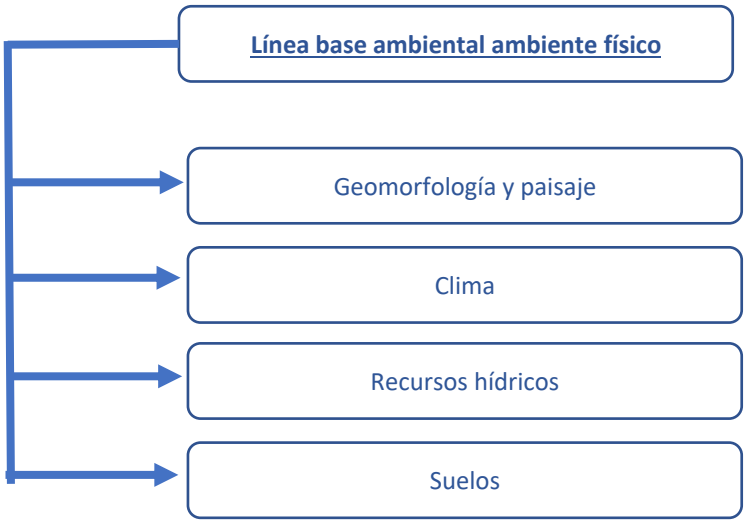


Figura 14 Subcomponentes de la línea de base

- *Geomorfología y paisaje*

El área del DMZP se ubica en el flanco suroccidental de los Andes ecuatorianos, en un relieve montañoso fuertemente disectado, conformado por laderas escarpadas, valles encajados y superficies estructurales controladas por la tectónica andina y las fallas Peltetec y Piñas-Portovelo (Fig.15). Las altitudes varían aproximadamente entre 400 y 2600 m.s.n.m., con pendientes superiores al 30%, lo que conforma un paisaje de alta energía geomorfológica y susceptibilidad a movimientos en masa, intensificada por la excavación subterránea histórica (ARCOM, 2019).

La geomorfología local se caracteriza por terrazas fluviales estrechas a lo largo de los ríos Calera, Amarillo y Puyango, disertados por conos de deyección y abanicos coluviales que reciben material de deslizamientos recurrentes. Algunos estudios de riesgos geológico realizados para delimitar la zona de exclusión minera en Zaruma detallan hundimientos, subsidencias y colapsos de cavidades mineras bajo el casco urbano, evidenciando la interacción entre estructuras geológicas, excavaciones subterráneas y procesos gravitacionales.

Figura 15 Paisaje y condiciones geomorfológicas del distrito minero Zaruma-Portovelo, con relieve montañoso, pendientes pronunciadas y fuerte influencia antrópica asociada a la actividad minera.

- *Clima*

El clima en la zona del DMZP se define como una transición entre ambientes tropicales húmedos de estribación andina y ambientes más secos hacia la cuenca del Puyango, con un régimen pluviométrico marcado por una estación lluviosa concentrada entre diciembre y mayo de 1000-2000 mm/año, con fuerte variabilidad interanual asociada a eventos ENSO, que exacerban crecidas, erosión de laderas y movilización de contaminantes en la red de drenaje (FAO, 2020).

Las temperaturas medias anuales oscilan aproximadamente entre 18° y 24°C según la altitud, con baja amplitud térmica diaria típica de climas subtropicales de montaña. Desde la perspectiva de línea base, el clima condiciona la recarga hídrica, la estabilidad de laderas y la dispersión de contaminantes atmosféricos procedentes de hornos de amalgama y calcinación de concentrados, factores clave para la modelación de impactos de una eventual intensificación de la producción (Velásquez-López et al., 2010).

➢ *Recursos hídricos*

El área de estudio drena hacia el sistema Puyango-Tumbes, a través de los ríos Calera, Amarillo y otros tributarios que atraviesan Portovelo y las zonas de las plantas de beneficio, constituyendo el principal receptor de efluentes minero-metalúrgico. Investigaciones recientes han demostrado que el tramo del Puyango hasta al menos 50 Km aguas debajo de Portovelo presenta concentraciones de cianuro libre muy por encima de los estándares de calidad de agua, con máximos reportados hasta 9088 veces superiores al valor guía CCME de 5 µg/L (Marshall et al., 2020a).

Estudios isotópicos de mercurio en la cuenca Puyango-Tumbes han identificado una firma geoquímica atribuible a las plantas de procesamiento de Portovelo-Zaruma, detectable más de 100 Km aguas abajo, evidenciando la persistencia y transporte de Hg, Pb, Cu y Zn asociados a relaves y efluentes cianurados. La línea base debe incluir:

- Red de monitoreo de caudal y niveles
- Calidad físico-química (pH, conductividad, sólidos, nutrientes)
- Metales y metaloides (Hg total, MeHg (metilmercurio), As, Pb, Zn, Cu, Fe)
- Cianuro libre y total, con series temporales representativas de época seca y lluviosa.

Ciertos estudios de calidad de agua en el distrito han evidenciado concentraciones elevadas de cianuro, mercurio y metales pesados en los ríos adyacentes a las plantas de beneficio, con valores de cianuro libre que superan en varios órdenes de magnitud los límites normativos para protección de la vida acuática y niveles de Hg disuelto y particulado que reflejan la contribución de la minería artesanal y de pequeña escala. Estos contaminantes se absorben en sedimentos de fondo y en suelos de las terrazas aluviales, constituyendo un pasivo ambiental acumulativo que interacciona con los nuevos proyectos mineros que se desarrollan en la zona (Marshall et al., 2020a).

➢ *Suelos*

El DMZP se ubica en el flanco suroccidental de los Andes, con fuertes pendientes (>30%) y materiales de base volcánicos andesítico-basálticos (Unidad Portovelo, Grupo Saraguro) y rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro, lo que condiciona suelos jóvenes poco desarrollados y alta susceptibilidad a erosión y movimientos en masa. Estos suelos se derivan de tobas, lavas y brechas volcánicas intensamente fracturadas, con texturas generalmente francas a franco-arenosas con buen drenaje y baja profundidad efectiva en laderas escarpadas donde los procesos de meteorización física dominan sobre la formación de horizontes bien diferenciados (López Sigüenza et al., 2019).

Desde el punto de vista taxonómico, la combinación del clima húmedo subtropical de montaña (1000 a 2000 mm/año, 18-24°C) y litología volcánica y coluviales favorecen el desarrollo de suelos Inceptisoles – Entisoles en laderas fuertes (cambisoles coluviales poco evolucionados con horizontes someros) y Fluvisoles en terrazas aluviales estrechas de los ríos Calera, Amarillo y Puyango. En las partes altas y mesetas estructurales pueden aparecer suelos algo más evolucionados (Andisoles locales con contenidos de materiales amorfos derivados de cenizas), en estos sitios el relieve disectado limita el espesor de los perfiles y aumenta la frecuencia de deslizamientos, especialmente donde la excavación subterránea minera ha alterado al equilibrio geotécnico del macizo rocoso (Betancourt Óscar, 2012). La presencia de relaveras mineras, botaderos de estériles y caminos de acceso ha modificado localmente las propiedades físicas y químicas de los suelos, con incremento de

metales de transición (Cu, Zn, Pb, Mn) y mercurio en zonas de deposición, tal como evidencian estudios recientes en la relavera comunitaria El Tablón en Portovelo (Díaz Medina y Pico Carrasco, 2024).

– *Calidad y contaminación de suelos*: más de un siglo de minería ha generado extensos depósitos de relaves, desmontes y suelos contaminados por metales pesados y reactivos (Hg, Pb, Zn, Cu, cianuro), particularmente en Portovelo y a lo largo del corredor del río Puyango. Algunos estudios geoquímicos en sedimentos de fondo en el río Puyango muestran concentraciones elevadas de Hg, Pb, Zn y Cu aguas abajo de las plantas de beneficio que se encuentran en Portovelo, superando los valores guía de calidad sedimentaria e indicando la deposición crónica de partículas finas metalíferas que también impactan los suelos de márgenes y terrazas inundables (Mora et al., 2016).

– *Investigaciones sobre la contaminación por el cianuro en la cuenca hídrica Puyango-Tumbes* documentan que más de 80 plantas de beneficio en Portovelo utilizan cianuración de relaves previamente amalgamados con mercurio, generando complejos Hg-CN altamente bioasimilables y liberando efluentes con cianuro libre hasta 9088 veces por encima del estándar de 5 µg/L, lo que indica riesgos de adsorción y acumulación de CN- y metales pesados en suelos ribereños y agrícolas aguas abajo. La disposición inadecuada de relaves en taludes y cauces secundarios produce cierto sello de horizontes superficiales, pérdida de estructura y disminución de materia orgánica, reduciendo la capacidad de retención de agua y nutrientes y aumenta la erosión laminar en forma de surcos (Marshall et al., 2020a).

8.2.2. Línea base ambiental del medio biótico

La línea base ambiental del medio biótico incluye la descripción y análisis de la biota, enfatizando en aquellas especies que se encuentren en alguna categoría de conservación.

⌖ Fauna: Alberga una fauna diversa propia de los bosques montanos y subtropicales de la región andina. Se destacan aves endémicas (Paloma de Zaruma), mamíferos pequeños (zorros) y medianos (guatusas), reptiles (lagartija de lava o cuilanes) y anfibios (ranas) asociados a los ríos y quebradas que atraviesan la zona. La conservación de aves endémicas, anfibios sensibles y mamíferos emblemáticos como el oso andino depende de programas de restauración ecológica y control ambiental (Fig. 16).

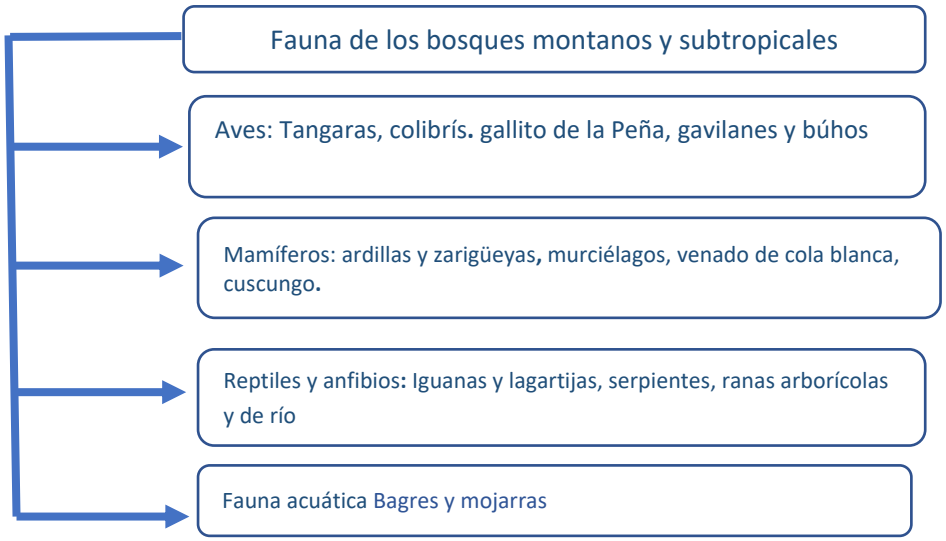


Figura 16. Fauna propia de los bosques montanos y subtropicales

⌖ Flora: La zona minera Zaruma-Portovelo se sitúa en un ecosistema entre bosques siempreverdes y formaciones montañosas secas de la provincia de El Oro, con una alta diversidad de especies agrícolas, forestales, ornamentales y remanentes de vegetación nativa (Fig. 17).

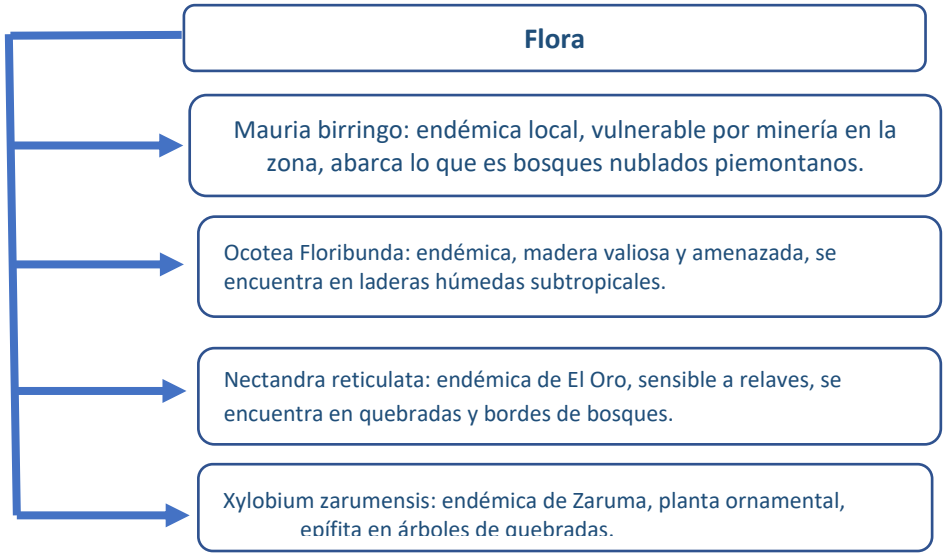


Figura 17. Flora endémica del DMZP.

8.2.3. Línea de base socio-económica

La línea de base socio económica del DMZP presenta el estado actual de la población, las actividades económicas, la infraestructura y los servicios en el área de estudio, como escenario de referencia sobre el cual se evaluarán los impactos derivados de una eventual intensificación de la pequeña y mediana minería aurífera. Esta caracterización integra aspectos demográficos, económicos, de infraestructura y sociales que condicionan la viabilidad y sostenibilidad de operaciones mineras en la región (Fig.18).

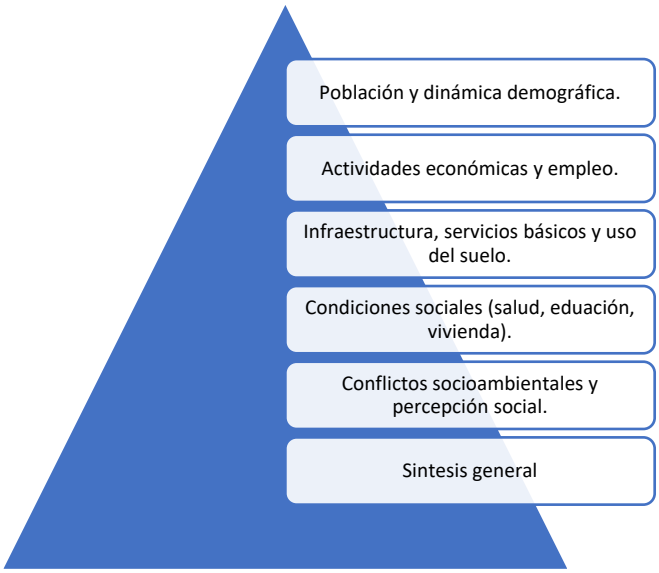


Figura 18 Estructura de la línea base socioeconómica del distrito minero Zaruma-Portovelo.

- ***Población y dinámica demográfica, localización y contexto territorial***

El distrito minero Zaruma-Portovelo se ubica en la provincia de El Oro, en el flanco suroccidental de los Andes Ecuatorianos, abarcando las áreas urbanas consolidadas de los cantones Zaruma y Portovelo, así como numerosos asentamientos mineros dispersos en las laderas que drenan hacia la cuenca alta del río Puyango-Tumbes. El distrito se extiende aproximadamente entre las cotas 400 y 1500 m.s.n.m. en la región de topografía accidentada caracterizada por profundos valles fluviales, taludes de gran pendiente y zonas de ladera frecuentemente inestables (*Ubicación Geográfica – GAD DE PORTOVELO*, n.d.).

- ***Tamaño y estructura de la población***

Según estimaciones del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la población combinada de los cantones Zaruma-Portovelo ascienden aproximadamente entre 25000 a 30000 habitantes, de los cuales el 60-65% reside en los centros urbanos de Zaruma y Portovelo, y el 35-40% en asentamientos rurales y periurbanos dispersos en laderas y zonas de explotación minera. Históricamente el crecimiento poblacional ha estado asociado a la expansión de la actividad aurífera y a las migraciones laborales hacia Portovelo, atraídas por la presencia de plantas de beneficio y servicios mineros especializados.

La estructura demográfica refleja una población económicamente activa, con predominio de población masculina en edades de 18-64 años vinculada directamente a labores subterráneas, perforación, voladura y operaciones de plantas de beneficio. Existe también un componente importante de población femenina en servicios conexos: comercio, hospedaje, alimentación y servicios técnicos informales (Zaruma - Population Statistics, Charts, Map and Location, n.d.).

- ***Distribución urbana-rural y dispersión de asentamientos***

La población total del cantón Zaruma, según el censo de 2022 indica que en la cabecera cantonal existen 10,005 habitantes. (Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC) proporciona datos sobre la población urbana y rural del cantón. En 2010, la población urbana era de 9.631 habitantes y la población rural era de 13.787 habitantes.

La concentración de población en las cabeceras cantonales de Zaruma y Portovelo contrasta con la dispersión de caserios mineros, denominados localmente como barrios mineros, ubicados en laderas y valles aledaños a los ríos Calera, Amarillo y Puyango, donde se localizan frentes de explotación subterránea y relaves. Esta configuración espacial genera dinámicas de movilidad laboral diaria con trabajadores que se desplazan desde las cabeceras cantonales hacia los frentes mineros ubicados a distancias entre 2 y 8 kilómetros.

Zaruma es la cabecera del cantón homónimo y el más antiguo asentamiento minero de la región, con arquitectura patrimonial consolidada sobre un terreno altamente inestable por las labores subterráneas que la subyacen. Portovelo en cambio constituye el centro administrativo y comercial vinculado a la metalurgia y beneficio de mineral, con una dinámica urbana y con presencia de servicios especializados en plantas de procesamiento y comercio de concentrados (Herrera Franco et al., 2020).

- Actividades económicas y empleo

  - *El Rol central de la minería en la estructura económica*

La minería aurífera de pequeña y mediana escala constituye la actividad económica principal del distrito Zaruma – Portovelo, generando el 70-80% del empleo directo en la región y un porcentaje aún mayor del empleo indirecto a través de servicios especializados (Tabla 3). La estructura productiva se organiza en torno a:

Tabla 3 Estructura productiva

Explotación subterránea de vetas epitermales	Beneficio y procesamiento metalúrgico
•Concentrada en minas de pequeña escala operadas por minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), con presencia también de operaciones de mediana minería organizadas como cooperativas o empresas con capacidad técnica y financiera intermedia.	•Concentrado principalmente en Portovelo, donde operan más de 80 plantas de beneficio de distintas escalas, que procesan mineral proveniente de diversas concesiones y constituyen el núcleo económico y comercial del distrito.

La cadena de valor minera genera empleo en múltiples eslabones: minería subterránea, transporte de mineral, molienda, flotación, cianuración, fundición informal y comercialización de concentrados auríferos (Franco et al., 2020).

En paralelo a la actividad minera formal, en el DMZP persisten operaciones de minería ilegal caracterizadas por la ausencia de concesión y permisos ambientales, así como por el uso de plantas de beneficio no registradas. Estas actividades se concentran en labores subterráneas abandonadas y en frentes de explotación de difícil control institucional, generan empleo precario sin afiliación a la seguridad social y compiten de manera desleal con los operadores formalizados al evitar el pago de regalías e impuestos. La minería ilegal incrementa la presión sobre el territorio y los recursos hídricos, al utilizar de forma inadecuada sustancias como mercurio y cianuro, y contribuye a la generación de pasivos ambientales adicionales respecto de los ya asociados a más de un siglo de explotación en Zaruma-Portovelo, exacerbando los conflictos socioambientales y las asimetrías económicas en la región.

- ***Empleo directo en minería y operaciones asociadas***

El empleo minero apropiado se estima entre 2000 y 3000 trabajadores directos involucrados en labores subterráneos (mineros, barrenadores, ayudantes), perforación y voladura, acarreo y acopio de mineral (Franco et al., 2020). Estas actividades están caracterizadas por:

- Baja mecanización y predominio de técnicas manuales y herramientas simples.
- Falta de formalización laboral en un alto porcentaje de casos.
- Exposición ocupacional a riesgo geológicos (derrumbes, socavones), químicos (exposición a mercurio, cianuro) y ergonómicos.

➢ ***Empleo en plantas de beneficio***

Aproximadamente 800-1200 trabajadores distribuidos en plantas de molienda, flotación, cianuración y separación gravimétrica, con roles como operadores de equipo, químicos, técnicos de laboratorio y personal de seguridad (*Delve | Mercury Balance in Amalgamation in Artisanal and Small-Scale…*, n.d.).

➢ **Empleo indirecto**

Incluye comercio de insumos mineros (explosivos, herramientas, tuberías), transporte de mineral y concentrados, hospedajes de trabajadores migrantes, alimentación, servicio técnicos y reparación de equipos, estos generan empleo adicional estimado entre 1000 y 2000 personas (Franco et al., 2020).

➢ ***Otras actividades económicas***

Si bien la minería es dominante, existen otras actividades con contribución económica local:

- Agricultura y ganadería: cultivo de café, banano y cacao en zonas de ladera, así como ganadería extensiva en pastos, principalmente para autoconsumo y mercado local.
- Comercio y servicio urbanos: pequeños comercios, restaurantes, tiendas de abarrotes y servicios de transporte en los centros urbanos de Zaruma y Portovelo.

La Tabla 4 muestra la estructura ocupacional y sectores económicos del DMZP

Tabla 4 Estructura ocupacional y sectores económicos del DMZP

Sector económico	Estimado de empleados	% del empleo total	Tipo de ocupación
Minería subterránea (MAPE)	2000 - 3000	45-50%	Mineros, barrenadores, ayudantes
Plantas de beneficio	800 - 1200	15-20%	Operadores, químicos, técnicos
Servicios mineros indirectos	1000 - 2000	20-25%	Transporte, comercio, hospedaje
Agricultura y ganadería	400 - 600	8-10%	Agricultores, ganaderos
Otros servicios urbanos	500 - 800	10-12%	Comerciantes, empleados públicos
Total	**4700 - 7600**	**100%**	

Nota. Estimaciones adaptadas de INEC (2010, 2020), estudios locales de empleo minero.

➢ ***Infraestructura, servicios básicos y uso del suelo***

El distrito está conectado a través de:

- Carretera panamericana Sur que vincula Portovelo con la cabecera provincial Machala (55 Km al N) y con Zaruma (30 km al SE).
- Red de caminos secundarios y terciarios que acceden a los frentes mineros, muchos de los cuales están construidos sobre laderas inestables y requieren mantenimiento frecuentemente.
- Acceso interior a concesiones mineras: caminos de herradura y veredas que conectan asentamientos dispersos con minas, frecuentemente deteriorados y expuestos a deslizamientos de inestabilidad climática.

La infraestructura vial presenta vulnerabilidad a fenómenos hidrometeorológicos (lluvias intensas, ENSO), limitando la accesibilidad a zonas de explotación durante períodos de inestabilidad climática (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022c).

- ***Agua potable y saneamiento***

La cobertura de servicios de agua potable y saneamiento es desigual:

- En centros urbanos (Zaruma, Portovelo): existe red de distribución de agua potable gestionada por juntas de agua locales, con problemas recurrentes de disponibilidad estacional y calidad microbiológica.

- En asentamientos rurales: predominan captaciones locales de agua de manantiales y riachuelos, sin tratamiento y con riesgo de contaminación por descarga de efluentes mineros.

Un aspecto critico es el riesgo de afectación de fuentes de agua potable por vertidos de relaves y efluentes de plantas de beneficio, particularmente sobre los ríos Calera, Amarillo y Puyango, que abastecen a poblaciones aguas abajo, tanto en Ecuador como en territorio peruano (AME, 2022).

- ***Energía eléctrica y telecomunicaciones***

- Energía eléctrica: cobertura relativamente amplia en centros urbanos y en plantas de beneficio, suministrada por la empresa distribuidora regional. En asentamientos dispersos la cobertura es parcial y el acceso a energía a menudo depende de conexiones informales (López Sigüenza, 2019).

- Telecomunicaciones: acceso a telefonía móvil en centros urbanos; cobertura más limitada en zonas dispersas de ladera.

- ***Uso del suelo y configuración territorial***

El uso del suelo en el distrito es heterogéneo y refleja la historia de la explotación minera:

- Áreas urbanas consolidadas: Zaruma (patrimonio arquitectónico colonial) y Portovelo (expansión comercial y residencial vinculada a las plantas de beneficio).

- Zonas de explotación minera: socavones abiertos, bocaminas dispersas, depósitos de estériles (botaderos) y relaveras ubicadas frecuentemente en los márgenes de ríos y quebradas.

- Áreas de riesgo geotécnico: zonas de hundimiento y subsidencia bajo el casco urbano de Zaruma, colindantes con labores subterráneas históricas.

- Laderas agrícolas: terrazas y parcelas dedicadas al café, banano y pasto, intercaladas con áreas de ladera sin cobertura vegetal y erosionada.

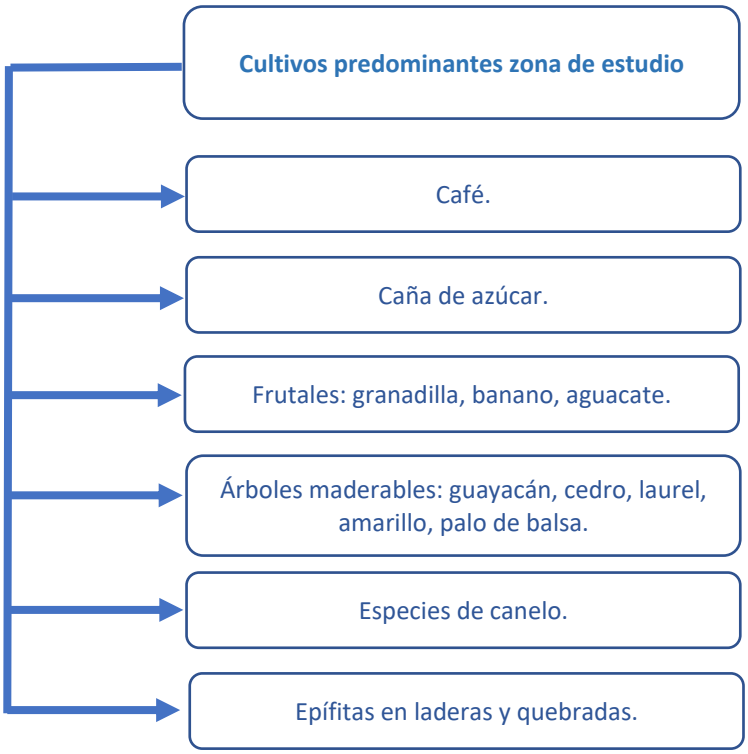


Figura 19. Cultivos predominantes en la zona

En síntesis, el uso del suelo en el distrito combina áreas urbanas patrimoniales, laderas agrícolas fragmentadas y una densa ocupación minera con socavones, botaderos y relaves ubicadas en posiciones topográficas cercanos a los cursos fluviales (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022c).

- ***Condiciones Sociales: salud, educación y vivienda***

El distrito cuenta con:

- Centro de salud de Zaruma y centro de salud de Portovelo, adscritos a la red del Ministerio de Salud Pública, con capacidad limitada de atención especializada.
- Puestos de salud rurales en asentamientos dispersos, con atención irregular.
- Clínicas y consultorios privados en Portovelo, vinculados a servicios de medicina ocupacional para trabajadores formalizados (Pérez, 2026).

- ***Riesgos sanitarios asociados a la minería***

La población del distrito está expuesta a riesgos sanitarios específicos derivados de la minería aurífera:

- Exposición ocupacional a metales pesados: trabajadores mineros y de plantas de beneficio presentan exposición crónica de mercurio (Hg), plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu), tanto por inhalación de polvos como por contacto dérmico, sin medidas de protección personal adecuadas en la mayoría de operaciones (NIH, 2016).

- Exposición a cianuro: trabajadores en plantas de cianuración enfrentan riesgos de intoxicación aguda por inhalación o contacto con soluciones cianuradas, particularmente en

operaciones sin formalización y sin controles de seguridad (Marshall et al., 2020b).

- Contaminación de aguas de consumo: poblaciones ribereñas aguas debajo de plantas de beneficio, así como usuarios de agua captada directamente de quebradas, enfrentas riesgos de contaminación por drenaje ácidos, metales disueltos y cianuro residual.

- Impactos acumulativos: la exposición prolongada genera riesgos de enfermedades crónicas (neurotoxicidad por mercurio, nefrotoxicidad por plomo) aún no sistematizadas epidemiológicamente en el distrito (NIH, 2016).

- ***Educación***

La red educativa del distrito incluye:

- Educación básica: 25-30 escuelas primarias y 8-10 colegios secundarios en centros urbanos y asentamientos dispersos (Pérez, 2026).

- Acceso a educación superior: limitado, con estudiantes que se desplazan a Machala (capital provincial) o a ciudades como Guayaquil, Cuenca y Quito para estudios universitarios (Pérez, 2026).

- Formación técnica y capacitación minera: presencia de instituciones como escuelas de operadores de equipo minero y cursos de seguridad, frecuentemente organizados por cooperativas o empresas mineras.

Los desafíos educativos más destacados

- Deserción escolar en nivel secundario, asociada a la atracción económica inmediata del empleo minero.

- Limitaciones en la capacitación especializada para operarios de plantas de beneficio y seguridad en minas.

- ***Vivienda y asentamientos***

El distrito presenta una mezcla de:

- Viviendas consolidades en centros urbanos: Zaruma (patrimonio arquitectónico colonial) y Portovelo (expansión residencial planificada y no planificada), con acceso relativo a servicios básicos.

- Viviendas informales en laderas y zonas mineras: asentamientos sin regularización catastral, construidos frecuentemente sobre taludes inestables, con materiales precarios (zinc, madera)(Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2022c).

Los riesgos geotécnicos asociados a la vivienda están asociados a la inestabilidad de taludes y subsidencias bajo áreas urbanas:

- Zaruma: numerosas viviendas están ubicadas sobre labores subterráneas históricas, generando riesgo de hundimiento diferencial y colapso localizado.

- Zonas de ladera: asentamientos mineros en laderas de pronunciada inclinación enfrentan riesgos de deslizamientos, especialmente durante períodos de lluvia intensa.

- Declaratoria de zonas de exclusión minera: bajo el casco urbano de Zaruma existen áreas prohibidas para realizar explotaciones mineras por seguridad ciudadana, lo que genera tensión entre preservación de vivienda y oportunidades de empleo minero (ARCOM, 2019).

8.3 Los conflictos socioambientales y percepción social de la minería

El distrito minero Zaruma – Portovelo representa un caso paradigmático de conflicto socioambiental en la minería aurífera ecuatoriana. Con más de un siglo de actividad extractiva continua, la región enfrenta una compleja dualidad: por un lado, la dependencia económica del 90% de su población a actividades mineras directas e indirectas; por otro lado, los severos impactos ambientales y sociales derivados de la minería ilegal y las prácticas inadecuadas de beneficio mineral (Yandún Torres et al., 2021).

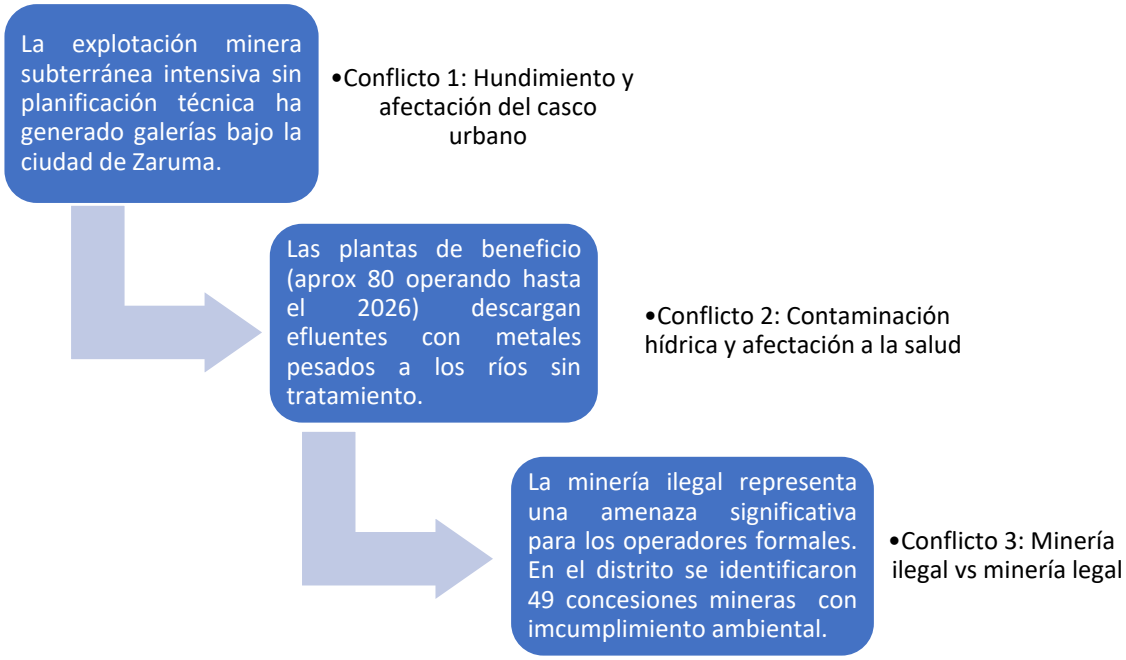
La compresión de esta problemática requiere un análisis sistemático que integre la dimensión social, ambiental y jurídica del conflicto, empleando metodologías de evaluación reconocidas internacionalmente. Este apartado analiza los conflictos socioambientales específicos del distrito, la percepción social de las comunidades afectadas y propone herramientas de evolución aplicables al contexto de la pequeña y mediana minería (Arce, 2017).

8.3.1 Marco conceptual de conflictos socioambientales mineros

Los conflictos socioambientales en contexto mineros surgen cuando las actividades extractivas generan impactos que afectan los derechos, el bienestar y los medios de vida de las comunidades locales, produciendo tensiones entre actores con intereses divergentes: operadores mineros, población local, autoridades gubernamentales y organizaciones ambientales (Arce, 2017).

En el caso Zaruma – Portovelo, estos conflictos se caracterizan por (Figs. 20 y 21).

Figura 20. Conflictos socioambientales en DMZP



Figuras 21. Caracterización de los principales conflictos socioambientales

Dentro del conflicto por hundimiento y afectación del casco urbano existen actores involucrados (Tabla 5):

- Población afectada: 71 familias en Zaruma y 19 en Portovelo requirieron reubicación habitacional, este problema fue tomado por el gobierno y el GAD cantonal.
- Mineros artesanales y pequeños: Operadores que trabajaban en la zona de exclusión.
- Gobierno Nacional: Ministerios de Minería, Ambiente, Desarrollo Urbano y Vivienda, Gestión de Riesgo.
- Gobiernos Autónomos Descentralizados: Alcandías de Zaruma y Portovelo.

Tabla 5 Impactos sociales identificados

Dimensión	Impacto	Magnitud
Vivienda	Pérdida de 90 viviendas por colapso o riesgo estructural.	Alta
Patrimonio Cultural	Afectación de arquitectura colonial en centro histórico.	Crítica
Desplazamiento	Reubicación forzosa de 90 familias.	Alta
Actividad turística	Reducción del 60-70% en visitantes.	Alta
Seguridad ciudadana	Incremento de riesgo de colapsos.	Crítica

Dentro del conflicto 2, en febrero del 2026 hubo una suspensión indefinida de 80 plantas de beneficio por incumplimiento ambiental en el río Calera, existe una contaminación crítica y significativa en tramos donde se concentran gran cantidad de plantas de beneficio (Expreso, 2026). Un activista social Fredy Orellana reportó “la gente está tomando arsénico en Santa Rosa”.

La Tabla 6 detalla los principales contaminantes identificados en recursos hídricos del distrito minero Zaruma – Portovelo y sus efectos en la salud pública. Elaboración propia con base en informes

técnicos del Ministerio de Ambiente y Agua.

Según estudios de percepción social en comunidades mineras ecuatorianas el 11% de la población identifica problemas estomacales como consecuencia directa de la contaminación minera. En Zaruma -Portovelo la falta de sistemas adecuados de tratamiento de agua potable agrava esta problemática (NIH, 2016).

Tabla 6 Principales contaminantes identificados en recursos hídricos del distrito minero Zaruma – Portovelo y sus efectos en la salud pública. Elaboración propia con base en informes técnicos del Ministerio de Ambiente y Agua. Pérez, 2026.

Contaminante	Fuente principal	Efecto en salud	Nivel de preocupación comunitaria
Arsénico (As)	Oxidación de arsenopirita en relaves.	Cáncer, enfermedades gastrointestinales.	Muy alta
Mercurio (Hg)	Amalgamación artesanal.	Neurotoxicidad, daño renal.	Alto
Cianuro (CN-)	Lixiviación en plantas de beneficio.	Toxicidad aguda, respiratoria.	Medio
Plomo (Pb)	Procesamiento de galena.	Daño neurológico infantil.	Alto
Cadmio (Cd)	Asociado a esfalerita.	Daño renal, óseo.	Medio

Dentro del conflicto 3 existe la siguiente caracterización de actores (Tabla 7):

Tabla 7 Estratificación de actores mineros en el distrito Zaruma – Portovelo según escala de producción y grado de formalización. Datos estimados con base en registros del Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. Pérez, 2026.

Tipo de actor	Característica	Población estimada	Nivel de formalización
Gran minería	Empresas con concesiones >1000 ha	2 – 3 empresas.	100 % formal.
Mediana minería	Producción 1001 – 2000 t/día.	5 – 8 operadores.	80 % formal.
Pequeña minería	Producción hasta 1000 t/día.	30 – 50 operadores.	60 % formal.
Minería artesanal	Operaciones familiares.	200 – 300 familias.	20 – 30 % formal.
Minería ilegal	Sin concesión ni permisos.	Variable (fluctuante).	0 % formal.

La conflictividad generada se produce por:

- Competencia por recursos: invasión de concesiones legales por mineros informales.
- Asimetría en exigencias: operadores formales deben cumplir estándares ambientales estrictos, mientras la minería ilegal opera sin controles.
- Percepción de injusticia: los operadores legales perciben que asumen costos ambientales que otros evaden.

- Deterioro de imagen sectorial: las prácticas ilegales deterioran la percepción social de toda la actividad minera.

- Para comprender la percepción social de la minería, se emplean encuestas estructurales y metodologías participativas que evalúan:

- Aceptación vs. rechazo de la actividad minera.

- Identificación de beneficios percibidos.

- Reconocimiento de impactos negativos.

- Confianza institucional en autoridades reguladoras.

- Disposición a participar en procesos de gestión ambiental.

Los estudios realizados en comunidades mineras artesanales de Ecuador revelan patrones de percepción social aplicables al análisis de Zaruma – Portovelo (Tabla 10) (Ayala-Camacho y Manuel García-Samaniego, 2016).

Tabla 8 Distribución de percepciones sobre minería artesanal en comunidades ecuatorianas. Fuente: Ayala (2016), estudio en La Paz, Amazonía ecuatoriana.

Percepción	Porcentaje	Justificación principal
A favor de la minería	58%	Fuente de sustento familiar, vía rápida de ingresos económicos.
En contra de la minería	42%	Contaminación ambiental, deterioro de salud, conflictividad socioambiental.

El 49% de los encuestados en comunidades mineras considera a la minería como una fuente de empleo a pesar de reconocer daños ambientales y efectos en la salud. Esta cifra refleja la tensión inherente entre necesidades económicas y preocupaciones ambientales (Ayala-Camacho y Manuel García-Samaniego, 2016).

A nivel nacional, estudios recientes indican que el 60% de la población apoya una minería responsable, desmintiendo la idea de un rechazo generalizado. La preocupación principal se centra en la minería ilegal, no en la actividad formal bien regulada (Ayala-Camacho y García-Samaniego, 2016). Los factores que influyen en la percepción positiva se detallan en la figura 21.

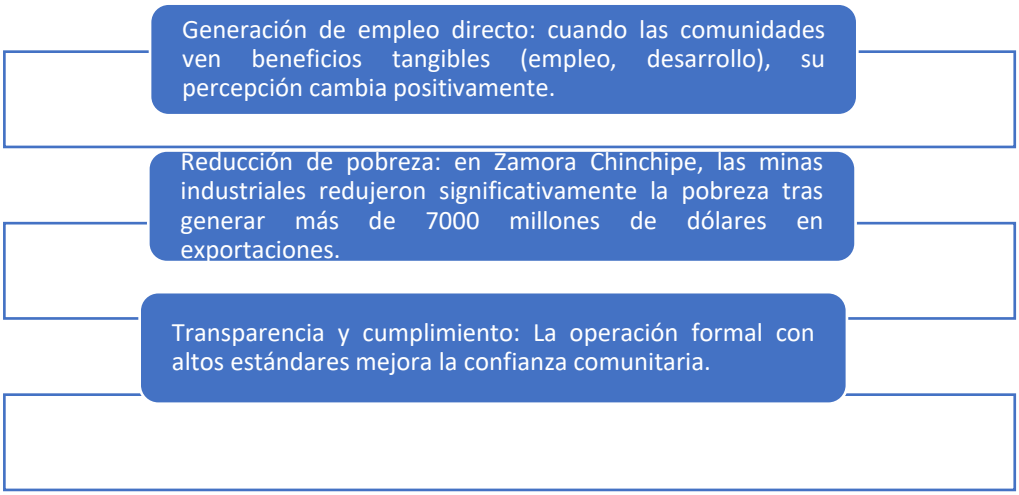


Figura 22. Factores que influyen en la percepción positiva

- ***Percepción específica en Zaruma – Portovelo***

El 90% de la población de Zaruma obtiene sus ingresos por actividades relacionadas con la minería (directa o indirectamente) (El Universo, 2026). Esta dependencia económica extrema condiciona fuertemente las percepciones sociales, generando (Fig. 23).

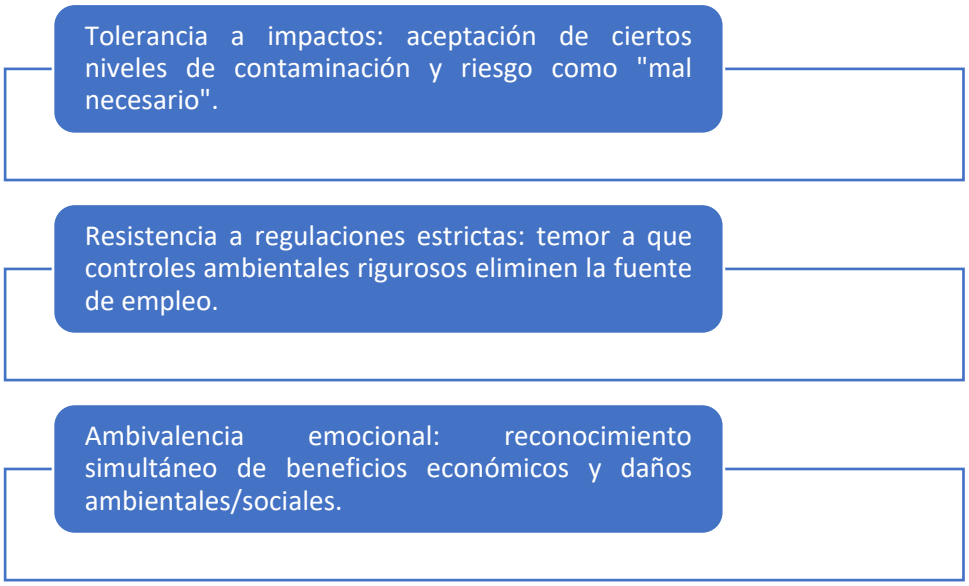


Figura 23: Percepciones sociales en DMZP

Zaruma es reconocido como segundo cantón de El Oro que más impuesto paga, a pesar de su población reducida (El Universo, 2026). Esta identidad económica contrasta con su declaratoria como Patrimonio Cultural de la Nación, generando tensión entre:

- Identidad minera: tradición de más de 100 años, orgullo por la productividad aurífera.
- Identidad patrimonial: valor arquitectónico colonial, potencial turístico.

Las demandas sociales recurrentes se visualizan en la figura 24:

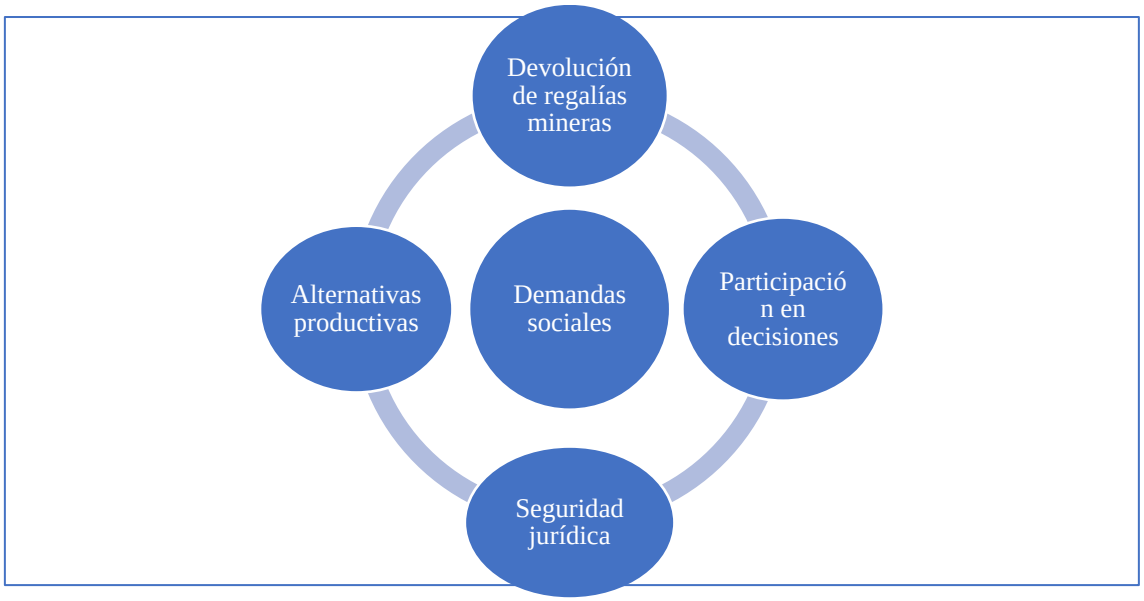


Figura 24. Demandas sociales recurrentes

8.3.2. Metodología de evaluación de impactos socioambientales

La aplicación de la matriz de Leopold modificada**,** desarrollada originalmente por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1971, constituye un método matricial de identificación y evaluación de impactos ambientales ampliamente utilizado en proyectos mineros. Para su aplicación en el contexto socioambiental de Zaruma – Portovelo, se propone una adaptación que incluye componentes sociales (Leopold et al., 1971). La figura 25 enumera los principios metodológicos.

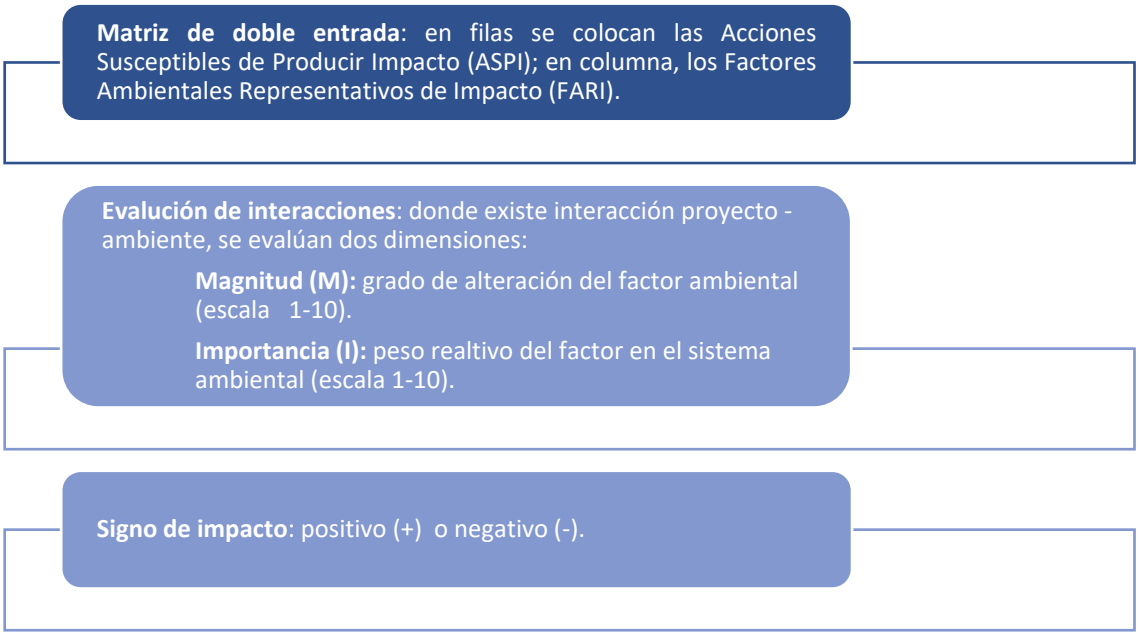


Figura 25. Principios metodológicos

- **Matriz de identificación de componentes ambientales afectados**

Etapas del proyecto minero vs. componentes ambientales (Tabla 9):

Tabla 9 Matriz de identificación de componentes ambientales afectados por etapas y ASPI de la actividad minera en el distrito minero Zaruma–Portovelo. X indica interacción directa entre la acción susceptible de producir impacto y el componente ambiental. Elaboración propia con base en metodología de Leopold adaptada y en la materia Aspectos Ambientales.

Etapa/ ASPI	Suelo	Agua	Aire	Flora	Fauna	Paisaje	Población	Economía	Patrimonio
1.Exploración									
Aperturas de trochas y reconocimiento	x	x	x	x	x	x	x	-	-
Muestreo geológico y trincheras	x	x	-	x	-	x	x	-	-
Perforación exploratoria	x	x	x	-	x	x	x	x	-
2.Construcción de accesos									
Desbroce y remoción de cobertura vegetal	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Corte de taludes y habilitación de caminos	x	x	x	-	x	x	x	x	-
Instalación de infraestructura auxiliar	x	x	x	-	-	x	x	x	-
3.Explotación subterránea									
Perforación y voladura	x	-	x	-	x	x	x	x	x
Extracción y acarreo	x	-	x	-	-	x	x	x	-
Sostenimiento y drenaje labores	x	x	-	-	-	x	x	x	X
4.Transporte de mineral									
Carga de mineral	x	-	x	-	-	-	x	x	-
Transporte por vías locales	x	-	x	-	x	x	x	x	-
5.Beneficio/procesamiento									
Trituración y molienda	x	x	x	-	-	-	x	x	-
Concentración gravimétrica/flotación	x	x	-	-	-	-	x	x	-
Cianuración	x	x	x	-	-	-	x	x	-
Fundición/refin	x	-	x	-	-	-	x	x	-

ación artesanal									
6.Disposición de relaves									
Descarga de relaves	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**-**	**-**
Almacenamiento en relaves	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**-**	**-**
Manejo de efluentes y escorrentías	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**-**	**-**
7.Cierre y abandono									
Sellado de bocaminas e infraestructura	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**
Estabilización de taludes y relaves	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**-**
Revegetación y rehabilitación del área	**x**	**x**	**-**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**

Para la evaluación cuantitativa, se propone la siguiente matriz que identifica los impactos más significativos del distrito (Tabla 10).

Tabla 10 Matriz de evaluación de impactos socioambientales en Zaruma–Portovelo. Valores expresados como M/I (Magnitud/Importancia) en escala 1–10. El signo negativo (-) indica impacto adverso y el signo positivo (+) indica impacto benéfico. Elaboración propia con base en metodología de Leopold adaptada.

Actividad/Factor ambiental	Calidad de agua	Estabilidad del suelo	Calidad del aire	Empleo local	Salud pública	Patrimonio cultural
Explotación Subterránea no planificada	-8/9	-9/10	-4/6	+7/6	-7/8	-9/9
Beneficio sin tratamiento de efluentes	-9/10	-3/5	-6/7	+6/5	-8/9	-2/4
Disposición inadecuada de relaves	-8/9	-7/8	-2/4	+2/3	-7/8	-3/5
Explotación subterránea ilegal sin control técnico	-6/7	-8/9	-4/5	+4/6	-6/7	-8/9
Beneficio ilegal con uso inadecuado de Hg y CN-	-8/9	-5/6	-6/7	+5/6	-8/9	-4/5
Plantas de beneficio formales	-5/8	-2/4	-4/6	+8/8	-4/6	-1/3
Remediación de suelos contaminados	+4/6	+6/8	+1/2	+3/5	+4/6	+2/4
Tratamiento y remedición de aguas contaminadas	+8/9	+2/4	+1/2	+3/4	+7/8	+2/3
Estabilización geotécnica y sellado de labores	+2/3	+8/9	+1/2	+4/5	+5/6	+8/9
Revegetación y rehabilitación paisajística	+3/5	+5/7	+3/5	+2/3	+2/4	+5/7

- **Matriz de conflictos, actores e interés**

Para una comprensión integral de la conflictividad socioambiental, se propone la siguiente matriz analítica (Tabla 11):

Tabla 11 Matriz de análisis de conflictos socioambientales en el distrito Zaruma – Portovelo: actores, interés, posiciones y mecanismos de resolución. Elaboración propia con base en información de fuentes gubernamentales y académicas.

Conflicto	Actores principales	Interés en juego	Posiciones	Nivel de tensión	Mecanismo de resolución actual
Hundimientos urbanos	Población afectada, Estado, mineros ilegales.	Seguridad habitacional vs. continuidad minera	Población: cierre de minas. Mineros: permanecer operando.	**Muy alto**	Zona de exclusión, reubicación habitacional.
Contaminación hídrica	Comunidad aguas abajo, plantas de beneficio, autoridades ambientales.	Acceso a agua limpia vs. operación de plantas.	Comunidades: cierre de plantas. Plantas: permanecer operando.	**Alta**	Suspensión temporal, planes de acción ambiental.
Minería ilegal	Mineros ilegales, concesionarios legales, Estado.	Subsistencia económica vs. legalidad y control.	Ilegales: amnistía. Legales: erradicación. Estado: control.	**Alto**	Operativos de control, detenciones.
Distribución de regalías	GAD municipales, Estado Central.	Reinversión local vs. recaudación nacional.	GAD: mayor transferencia. Estado: control centralizado.	**Medio**	Negociación política, asignación presupuestaria.
Turismo vs. minería	Sector turístico, sector minero, comunidad.	Desarrollo turístico vs. actividad extractiva.	Turismo: restricción minera. Minería: coexistencia.	**Medio**	Ordenamiento territorial, marketing dual.
Salud pública	Población, sistema de salud, operadores mineros.	Derecho a salud vs. costo de mitigación.	Población: controles estrictos. Mineros: flexibilidad.	**Alto**	Monitoreo epidemiológico, estudios de salud.

Las Tablas 12 y 13 muestran los Indicadores ambientales y sociales.

Tabla 12 Indicadores Ambientales

Indicador	Unidad	Línea base (2020)	Meta 2030	Responsable de medición
Calidad de agua – arsénico en río Calera	mg/L	>0.05 (límite OMS).	<0.01	Ministerio de Ambiente y Agua.
Calidad de agua-pH en ríos receptores	Unidades pH	3.5 – 4.5	6.5 – 8.5	MAE
Subsidencia del terreno en casco urbano	mm/año	50 – 100	<10	Instituto Geográfico Militar.
Cobertura vegetal en áreas de relaves	% de área	5%	40%	IIGE
Concentración de PM10 en aire urbano	ug/m^3	>80%	<50	Gobierno Municipal.

Tabla 13 Sistemas de indicadores para el monitoreo de la situación socioambiental en el DMZP. Líneas base estimadas con información disponible 2017-2020; metas propuestas al horizonte 2030. Elaboración propia.

Indicador	Unidad	Línea base	Meta	Responsable
Percepción positiva de minería responsable	% población	49%	>70%	INEC, encuestas locales
Familias afectadas por hundimientos	Número	90 familias	0 nuevas afectaciones	MIDUVI
Empleo directo en minería formal	Número de empleos	2500 (estimado).	3000	Ministerio de Trabajo
Conflictos socioambientales reportados	Eventos / año	15-20	<5	Defensoría del pueblo
Cobertura de agua potable segura	% población	70%	95%	SENAGUA, GAD
Inversión de regalías en proyectos locales	USD/año	Variable	>$2.000.000	GADA Zaruma y Portovelo

9. PLAN DE CIERRE DE MINA

9.1. Introducción

El plan de cierre de mina constituye un instrumento técnico ambiental fundamental para garantizar la sostenibilidad post-operativa de las actividades mineras en el DMZP, provincia de El Oro, Ecuador (Tarras-Wahlberg, 2002). Este plan tiene como objetivo establecer las medidas, actividades y procedimientos necesarios para rehabilitar, remediar y restaurar las áreas afectadas por más de 100 años de explotación minera subterránea de vetas epitermales de Au-Ag-Cu-Pb-Zn (Tarras-Wahlberg, 2002).

En el contexto del distrito minero, donde coexisten operaciones de pequeña y mediana minería en un entorno urbano densamente poblado y con elevada fragilidad geomorfológica, el cierre de mina adquiere características particulares relacionadas con (Fig.26):

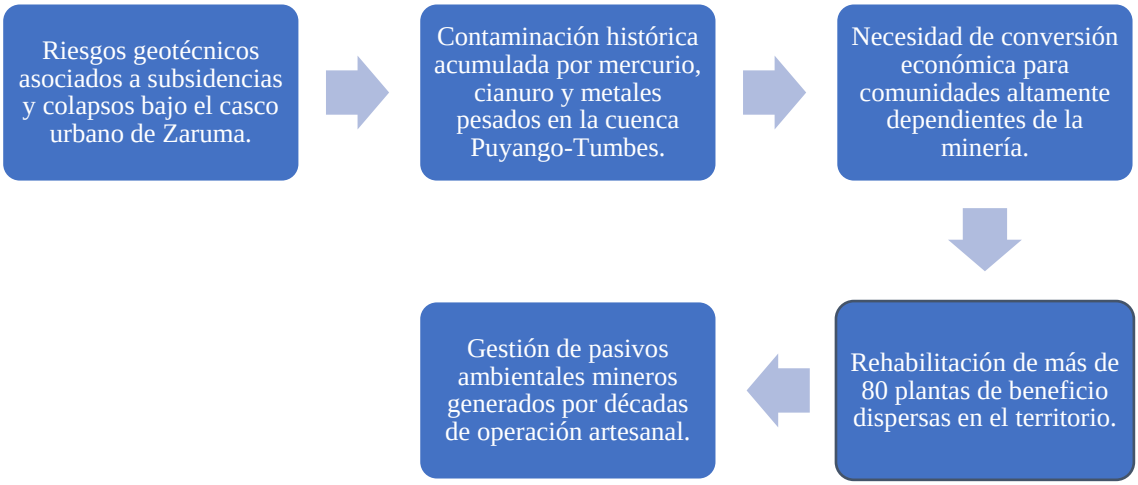


Figura 26. Características del cierre de mina

9.2. Marco normativo aplicable en Ecuador

El cierre de minas en Ecuador se regula principalmente a través de Ley de Minería (2009) y sus reformas, que establecen obligaciones de rehabilitación ambiental (Vergara, 2009). El reglamento ambiental de actividades mineras, que define requisitos para planes de cierre, el artículo 124 del reglamento ambiental, la normativa de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM) para pequeña y mediana minería y el Código Orgánico Ambiental (2017) que regula pasivos ambientales (Benítez et al., 2018). Se ampliará en el Capítulo 10.

La legislación ecuatoriana exige además la constitución de garantías financieras para cubrir los costos de cierre, incluyendo tratamiento a largo plazo y monitoreo post-cierre. La figura 27 plantea los objetivos específicos del plan de cierre para Zaruma – Portovelo.

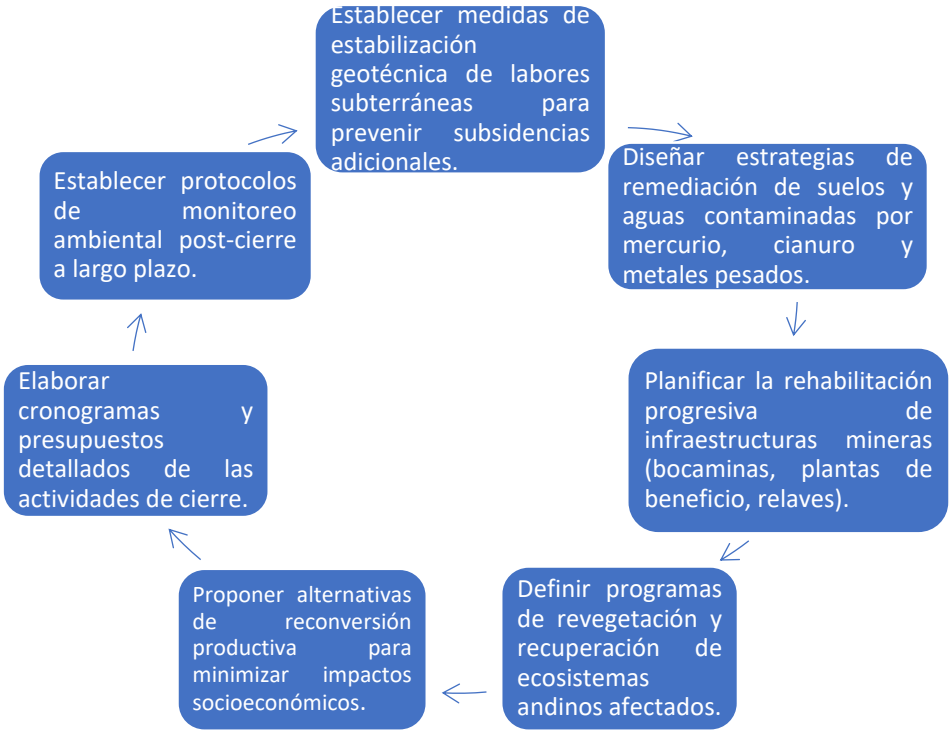


Figura 27. Objetivos específicos del plan de cierre para Zaruma – Portovelo.

El DMZP presenta una configuración compleja de instalaciones y pasivos acumulados durante su extensa historia operativa (Tabla 14). En el marco jurídico ecuatoriano, la responsabilidad primaria por la gestión y remediación de estos pasivos recae sobre los titulares mineros formalmente concesionados, a través de sus planes de cierre y de las garantías financieras exigidas por la Ley de Minería y el RAAM. No obstante, en el caso de pasivos históricos huérfanos o asociados a minería ilegal, la normativa atribuye al Estado, mediante las agencias competentes (ARCOM, Ministerio de Ambiente y gobiernos autónomos descentralizados), la obligación de diseñar programas específicos de remediación y de priorizar intervenciones en función del riesgo para la población y los ecosistemas.

Tabla 14 Inventario de instalaciones y pasivos ambientales en el DMZP. Tomado de ARCOM, 2025.

Componente	Cantidad	Descripción
Bocaminas activas e inactivas	200 +	Accesos horizontales a vetas, muchos sin soporte adecuado.
Labores subterráneas	>300 km	Red de galerías, túneles y caserones bajo Zaruma y Portovelo.
Plantas de beneficio	80 – 150	Instalaciones de molienda, concentración y cianuración.
Depósitos de relaves	25 -40	Represas y disposiciones informales con contenido de Hg, CN y metales.
Botaderos de desmonte	15 – 30	Acumulaciones de estéril con potencial de drenaje ácido.
Piscinas de cianuración	60 – 100	Infraestructuras activas y abandonadas con riesgo de infiltración.
Áreas de subsidencia	15 - 25 ha	Zonas urbanas afectadas por hundimientos del terreno.

Las labores mineras subterráneas en el distrito presentan características que condicionan el diseño del plan de cierre:

- Profundidad de excavaciones: entre 100 y 600 metros desde superficie.
- Roca huésped: andesitas y tobas de la Unidad Portovelo (Grupo Saraguro), competentes, pero intensamente fracturadas.
- Métodos de explotación históricos: cámaras y pilares, corte y relleno ascendente, tajos estrechos con recuperación excesiva de pilares (Pérez, 2026).
- Problemas geomecánicos identificados: pilares subdimensionados, caserones sin relleno, conexiones entre labores de distintos operadores, falta de mapeo sistemático.
- Los estudios del IIGE (2022) han documentado que las zonas de mayor riesgo geotécnico coinciden con:
- Intersecciones con vetas principales (Vizcaya, Sexmo-Miranda, Portovelo).
- Áreas bajo el casco urbano de Zaruma con profundidades <150 metros (ARCOM, 2019).
- Zonas de fallas regionales (Piñas-Portovelo) con alto grado de fracturamiento (Pérez, 2026).
- Sectores con presencia de brechas hidráulicas y stockworks intensos.

El cierre de operaciones mineras en Zaruma – Portovelo genera impactos sociales significativos que deben ser gestionados (Fig.28):

Figura 28. Impactos sociales significativos

El plan de cierre para el DMZP se estructura en seis componentes técnicos principales, cada uno con objetivos, actividades y cronogramas específicos.

– Componente 1: Estabilización geotécnica de labores subterráneas

Objetivos

- Prevenir subsidencias adicionales que afecten áreas urbanas y rurales.
- Eliminar riesgos de colapsos de cavidades mineras.
- Estabilizar pilares remanentes en zonas críticas.
- Sellar accesos que representan peligro para la población.

La Tabla 15 describe las actividades específicas de estabilización geotécnica de labores subterráneas.

Tabla 15 Actividades de estabilización geotécnica de labores subterráneas

Actividad	Descripción técnica
Levantamiento topográfico de vacíos	Mapeo 3D mediante escáner láser (Lidar) de galerías accesibles para cuantificar volúmenes de vacíos bajo zonas urbanas.
Evaluación geomecánica de pilares	Caracterización RMR (Rock Mass Rating) de pilares remanentes, cálculo de factores de seguridad mediante métodos numéricos (Phase2, RS3).
Relleno hidráulico de caserones	Inyección de relleno cementado (pasta-fill) en caserones críticos bajo Zaruma, con resistencia mínima de 0.5 – 1.5 MPa.
Relleno convencional con desmonte	Transporte y compactación de estéril en cavidades accesibles mediante labores horizontales.
Colapso controlado	Voladura programada de caserones inestables en zonas alejadas de infraestructura crítica.
Sellado de bocaminas	Construcción de tapones de concreto reforzado (espesor 2 – 3 m) en accesos principales, con válvulas de drenaje controlado.
Instalación de bulones y malla	Refuerzo local de pilares y techos en accesos que requieran mantención temporal para trabajos de cierre.
Monitoreo geodésico	Instalación de 15 – 25 estaciones de monitoreo de deformación superficial (GPS diferencial, inclinómetros).

La intervención geotécnica priorizará zonas según matriz de riesgo (Fig.29):

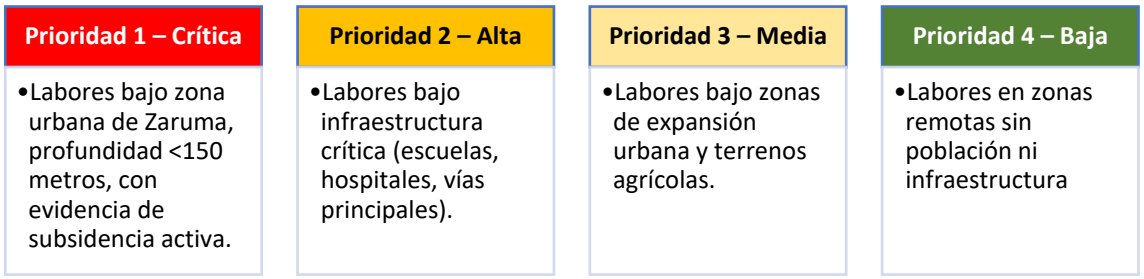


Figura 29. Intervención geotécnica según prioridad

– Componente 2: Desmantelamiento de infraestructura de superficie

La Tabla 16 detalla el procedimiento de desmantelamiento de plantas de beneficio

Tabla 16. Procedimientos de desmantelamiento de plantas de beneficio

Instalación	Procedimiento de desmantelamiento
Molinos (chilenos, bolas, martillos).	Drenaje de aceites hidráulicos, desconexión eléctrica, desmonte mecánico, transporte a centros de reciclaje de metales.
Circuitos de cianuración.	Neutralización de soluciones residuales con H_2O_2 o hipoclorito, lavado de tanques, desmantelamiento y disposición en relleno sanitario industrial.
Mesas concentradoras y canaletas.	Limpieza de concentradores residuales, recuperación de mercurio adherido mediante retorta, corte y reciclaje de acero.
Piscinas y tanques de procesos.	Drenaje, tratamiento de efluentes, neutralización química, demolición de estructuras, relleno con material limpio.
Infraestructura eléctrica.	Desmonte de transformadores, conductores y paneles; gestión de PCBs si aplica.
Edificaciones auxiliares.	Demolición controlada, segregación de residuos (madera, metal, concreto), disposición según clasificación.

Con respecto a la gestión de equipos y materiales se debe hacer con:

- Equipos reutilizables: vender o donar a operaciones mineras activas bajo regulación.
- Chatarra metálica: reciclar en plantas autorizadas de la región.
- Residuos peligrosos: (aceites, baterías, reactivos) disponer en rellenos de seguridad autorizados (más cercanos: Guayaquil).
- Residuos no peligrosos: madera plásticos, escombros, disponer en relleno sanitario municipal.

– Componente 3: Remediación de depósitos de relaves

Los depósitos de relaves en Zaruma – Portovelo presentan desafíos particulares por su dispersión, ubicación en laderas inestables y contenido de contaminantes (Hg, CN^-, As, Pb, Zn, Cu) (NIH, 2016). La Tabla 18 describe la estrategia de remediación según tipología.

Tabla 17. Estrategias de remediación de depósitos de relaves según tipología. Elaboración propia.

Tipo de depósito	Características	Estrategia de remediación
Represas formales pequeñas (<10000 m^3).	Con dique, cercanas a plantas, riesgo medio.	Estabilización in-situ con cobertura seca: capa drenante (30 cm grava), geotextil, capa impermeable (50 cm arcilla compactada), capa vegetal (30 cm suelo orgánico).
Disposiciones informales en laderas.	Sin contención, erosión activa, riesgo alto.	Remoción y reubicación a instalación de disposición controlada; si no viable encapsulamiento con geomembrana HDPE 1.5 mm + cobertura.
Relaves en cauce y terrazas.	Contacto directo con agua, dispersión alta.	Remoción prioritaria, dragado controlado, disposición en celda impermeabilizada, restauración de morfología fluvial.
Depósitos históricos consolidados.	Antigüedad >30 años, vegetación establecida.	Caracterización de estabilidad química, mejora de cobertura vegetal, monitoreo de lixiviados.

La cobertura estándar recomendada para relaves estabilizados in-situ:

- Capa 1 (base): nivelación y compactación de superficie de relaves.
- Capa 2 (drenaje): 30 cm de grava graduada (20-50 mm) para control de filtración.
- Capa 3 (separación): geotextil no tejido 200 g/m^2.
- Capa 4 (impermeabilización): 50 cm de arcilla local compactada (k<10^{-7}cm/s) o geomembrana HDPE 1.5 mm.
- Capa 5 (protección): geotextil no tejido 300 g/m^2.
- Capa 6 (suelo vegetal): 30-40 cm de suelo orgánico con enmiendas.
- Capa 7 (revegetación): especies nativas adaptadas a condiciones locales.

– Componente 4: Rehabilitación de botaderos de estéril

Se debe evaluar el potencial de drenaje ácido (PDA). Los desmontes del DMZP contienen sulfuros (pirita, calcopirita, esfalerita, galena) que pueden generar drenaje ácido de roca. Las medidas de rehabilitación según clasificación PDA serán:

- Incorporación de estéril no generador (PNN>20)

- Reconformación morfológica con pendientes estables (<20°).
- Cobertura vegetal directa con 20-30 cm de suelo orgánico.
- Revegetación con especies nativas.
- Control de erosión (terrazas, trincheras).
- Estéril generado o incierto (PNN<20)
- Encapsulamiento con cobertura seca tipo *store-and-release*.
- Capa de material no generador (1-2 m) sobre material sulfurado.
- Cobertura de baja permeabilidad (arcilla 50 cm o geomembrana).
- Sistema de recolección y tratamiento de drenajes.
- Monitoreo hidro químico a largo plazo.
- Sistema de manejo de aguas de contacto
- Canales perimetrales de derivación de escorrentía limpia.
- Piscinas de sedimentación y tratamiento para aguas de contacto.
- Tratamiento con cal o carbonato para neutralización si pH<6.
- Descarga controlada cumpliendo límites permisibles.

– Componente 5: Remediación de suelos contaminados

Las técnicas de remediación aplicables se detallan en la Tabla 18.

Tabla 18 Técnicas de remediación de suelos contaminados. Elaboración propia.

Técnica	Aplicación	Descripción
Excavación y confinamiento	Suelos con Hg>5 mg/kg, As>100 mg/kg	Remoción de horizonte contaminado (20-50 cm), disposición en celdas de seguridad, reemplazo con suelo limpio.
Estabilización química	Metales pesados, pH ácidos	Adicción de enmiendas: cal agrícola (CaCO3) 5-10 t/ha, fosfato, materia orgánica, zeolitas para inmovilizar metales.
Fitorremediación	Contaminación leves-moderada (Hg<3 mg/kg)	Plantación de especies acumuladoras/estabilizadoras: Pteris vittata (As), pastos nativos tolerantes, mejoramiento gradual en 5-10 años.
Cobertura con suelo limpio	Áreas extensas con baja criticidad	Aporte de 30-50 cm de suelo no contaminado, reducción de exposición directa y biodisponibilidad.
Lavado de suelos	Sitios puntuales, alta concentración	Extracción con soluciones quelantes (EDTA), separación por tamaño de partícula, tratamiento exsitu.

– Componente 6: revegetación y restauración ecológica

Los objetivos de la restauración se resumen en:

- Controlar erosión hídrica y eólica en superficies rehabilitadas.
- Restablecer cobertura vegetal funcional y autosostenible.
- Recuperar servicios ecosistématicos (regulación hídrica, hábitat fauna).
- Integrar áreas rehabilitadas al paisaje andino circundante.
- Generar oportunidades productivas (forestación, agroforestería).

La selección prioriza especies nativas del ecosistema montañoso del Sur de Ecuador (800-2600 msnm, Tabla 19). La Tabla 20 muestra un cronograma para el establecimiento de cobertura vegetal.

Tabla 19 Especies vegetales recomendadas para revegetación en Zaruma – Portovelo. (ELTI, n.d.)

Especie	Tipo	Características y función
Alnus acuminata (aliso)	Árbol pionero	Fijador de nitrógeno, crecimiento rápido, mejora suelos degradados, raíz profunda.
Cedrela adorata (cedro)	Árbol maderable	Valor comercial, crecimiento medio, altura 15-25 m.
Cordia alliodora (laurel)	Árbol maderable	Tolerante a sequía, buena regeneración.
Inga spp. (guabo)	Árbol leguminoso	Fijador N, rápido crecimiento, sombra para sotobosque.
Piper aduncum (matico)	Arbusto pionero	Colonizador agresivo, control de erosión.
Baccharis latifolia (chilca)	Arbusto nativo	Tolerancia a metales, rápido establecimiento.
Axonopus scoparius	Gramínea	Cobertura de suelo, control erosión, tolerante a pH bajo.
Paspalum spp.	Gramínea	Rápida cobertura, biomasa, protección superficial.
Ipomoea spp. (campanilla)	Trepadora	Cobertura rápida de taludes, fijación de suelo.

Tabla 20 Cronograma de establecimiento de cobertura vegetal. Elaboración propia.

Período	Actividades
Mes 0-1	Preparación de sustrato, análisis de suelo, adquisición de plantas en vivero, preparación de sistema de riego.
Mes 2-3	Hidrosiembra de gramíneas, plantación de arbustos pioneros (inicio época lluviosa).
Mes 4-6	Plantación de árboles, riego de establecimiento, primer control de maleza.
Mes 7-12	Mantenimiento intensivo: riego, deshierbe, fertilización, replante sin mortalidad >20%.
Año 2	Monitoreo trimestral, mantenimiento reducido, fertilización semestral.
Año 3-5	Monitoreo semestral, mantenimiento mínimo, evaluación de éxito de revegetación.

Los criterios de éxito de la revegetación se basan en:

- Cobertura vegetal: >70% al año 3, >85% al año 5.
- Supervivencia de plantaciones: >80% al año 1, >70% al año 3.
- Control de erosión: ausencia de cárcavas o erosión significativa.
- Diversidad florística: presencia de al menos 8-10 especies establecidas.
- Regeneración natural: evidencia de reclutamiento de plántulas de especies nativas.
- Fauna: presencia de aves, insectos polinizadores y pequeños mamíferos.

El plan de cierre debe contemplar la gestión diferenciada de tres tipos de aguas:

- Aguas de escorrentía limpia: provenientes de áreas no impactadas, se derivan mediante canales perimetrales hacia cauces naturales sin tratamiento.
- Aguas de contacto: que han estado en contacto con áreas mineras (botaderos, relaves, infraestructura), requieren recolección y tratamiento antes de descarga.
- Aguas de infiltración subterránea: drenaje de labores mineras inundadas, pueden contener metales disueltos y acidez.

Los tratamientos de efluentes mineros se tratan de acuerdo a lo planteado en la Tabla 21.

Tabla 21 Tecnología de tratamiento de efluentes minero.

Tipo de contaminante	Tecnología de tratamiento	Eficiencia esperada
Sólidos suspendidos	Sedimentación en piscinas con tiempo de residencia >4 h.	Remoción >90%
Acidez (pH<6)	Neutralización con cal hidratada Ca (OH)2 o carbonato de sodio.	pH final 6,5-8,5
Metales disueltos (Cu, Zn, Pb, Cd).	Precipitación alcalina (pH 8-9) + floculación + sedimentación.	Remoción 85-98%
Mercurio disuelto	Adsorción en carbón activado o resinas específicas.	Remoción >95%
Cianuro residual	Oxidación con hipoclorito de sodio o peróxido de hidrógeno.	CN- <0,2 mg/L
Arsénico	Coprecipitación con hierro (FeCl3) a pH 7-8	Remoción 90-95%

El cierre progresivo permite rehabilitar áreas que han concluido su vida útil mientras otras secciones de la mina continúan operando, distribuyendo costos en el tiempo y reduciendo el pasivo final.

En Zaruma – Portovelo, el cierre progresivo es particularmente relevante dado que:

- Existen múltiples concesiones pequeñas con diferentes ciclos de vida.
- Algunas plantas de beneficio pueden cerrar antes que las minas.
- Sectores de mayor riesgo geotécnico requieren intervención prioritaria.
- La rehabilitación temprana reduce el costo financiero total.

La Tabla 22 muestra las fases de implementación del plan de cierre.

Tabla 22 Fases de implementación del plan de cierre. Elaboración propia.

Fase	Duración	Actividades principales
Cierre progresivo	Durante operación	Rehabilitación de botaderos inactivos, cierre de bocaminas agotadas, revegetación de áreas liberadas.
Cierre temporal	6-12 meses	Suspensión de operaciones con posibilidad de reinicio, mantenimiento de instalaciones críticas, monitoreo continuo.
Pre-cierre	12-24 meses	Desmantelamiento gradual de equipos, inicio de obras geotécnicas mayores, intensificación de revegetación.
Cierre final	24-36 meses	Desmantelamiento total, sellado definitivo de acceso, obras de estabilización completas, cobertura final de relaves.
Post-cierre	10-30 años	Monitoreo ambiental, mantenimiento de obras, tratamiento de efluentes, ajustes de revegetación.

La Tabla 23 propone un programa general de cierre.

Tabla 23 Cronograma general de actividades de cierre (X indica período de ejecución). Elaboración propia.

Actividad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4-5	Año 6-10
Levantamiento de vacíos subterráneos	X				
Relleno de caserones críticos	X				
Sellado de bocaminas		X			
Desmantelamiento de plantas		X	X		
Remediación de relaves		X	X		
Rehabilitación de botaderos	X	X	X		
Remediación de suelos	X	X	X	X	
Revegetación		X	X	X	X
Monitoreo geotécnico intensivo	X	X	X	X	
Monitoreo ambiental intensivo	X	X	X	X	X
Monitoreo de mantenimiento					X

El Programa de monitoreo post-cierre tiene como objetivos

- Verificar la efectividad de las medidas de rehabilitación implementadas.
- Detectar tempranamente problemas emergentes (subsidencias, erosión, contaminación).
- Asegurar cumplimiento de estándares ambientales en el largo plazo.
- Generar información para mantenimiento correctivo.
- Documentar la recuperación progresiva del ecosistema.

Los componentes del programa de monitoreo geotécnico consisten según la Tabla 24.

Tabla 24. Monitoreo geotécnico post-cierre. Elaboración propia.

Parámetro	Frecuencia	Método/Instrumento
Deformación superficial	Semestral (años 1-5), anual (años 6-15)	Estaciones GPS diferencial, nivelación topográfica.
Estabilidad de taludes	Anual	Inspección visual, levantamiento fotográfico, evaluación geotécnica.
Asentamientos en relaves	Trimestral (años 1-3), semestral (años 4-10).	Placas de asentamiento, inclinómetros.
Integridad de sellados	Semestral (años 1-5), anual (años 6-10).	Inspección visual, termografía infrarroja.

La Tabla 25 indica el monitoreo de calidad de suelo

Tabla 25. Monitoreo de calidad de suelo en áreas rehabilitadas. Elaboración propia.

Parámetro	Metodología
Metales pesados (Hg, As, Pb, Zn, Cu).	Análisis cada 2 años en áreas remediadas, muestreo compuesto 0-20 cm profundidad, mínimo 5 puntos por hectárea.
pH y conductividad eléctrica	Anualmente en áreas con cobertura sobre material sulfurado.
Materia orgánica	Cada 2 años para evaluar recuperación de fertilidad.
Cianuro residual	Anualmente en zonas de antiguos circuitos de cianuración.

La Tabla 26 recomienda las pautas para el monitoreo ecológico

Tabla 26. Monitoreo ecológico de áreas vegetales. Elaboración propia.

Indicador	Frecuencia	Metodología
Cobertura vegetal	Semestral (años 1-3), anual (4-1 años).	Fotografía aérea con dron, análisis de imagen, transectos de vegetación.
Supervivencia de plantaciones	Semestral (años 1-2), anual (3-5 años).	Censo en parcelas permanentes (10% del área plantada).
Diversidad florística	Anual	Inventario botánico en cuadrantes 10x10 m, índices de Shannon y Simpson.
Regeneración natural	Anual (años 3-10).	Conteo de plántulas reclutadas naturalmente.
Fauna (aves)	Semestral	Puntos de conteo, identificación de especies indicadoras.
Erosión y sedimentación	Semestral (época lluviosa).	Medición en parcelas de escorrentía, inspección de canales.

Por último, se plantea la reconversión productiva y desarrollo post-cierre con alternativas de uso del territorio post-cierre. La planificación del cierre debe incorporar una visión de desarrollo territorial que trascienda la simple rehabilitación ambiental (Tabla 27):

Tabla 27. Alternativas de uso productivo del territorio post-cierre. Elaboración propia.

Alternativa	Descripción y viabilidad
Turismo minero patrimonial	Conversión de minas históricas (ej. Sexmo) en atractivos turísticos con recorridos guiados, museo de sitio, infraestructura interpretativa. Requiere estabilización geotécnica, señalización, capacitación de guías locales.
Agroforestería en áreas rehabilitadas	Establecimiento de sistemas productivos de café de sombra, cacao, frutales (aguacate, cítricos) en áreas con suelos remediados. Requiere capacitación técnica, apoyo crediticio, certificación orgánica.
Forestación comercial	Plantación de especies maderables (Cedrela, Cordia, Tectona) en botaderos rehabilitados para cosecha a 15-25 años. Requiere planificación silvicultura, mercado regional de madera.

Energías renovables	Instalación de paneles solares en superficies planas de relaves cubiertos o pequeñas centrales hidroeléctricas en cauces rehabilitados. Requiere inversión, conexión a red.
Acuicultura extensiva	Uso de piscinas de sedimentación rehabilitadas para crianza de tilapia o trucha. Requiere tratamiento previo de aguas, control de calidad.
Áreas de conservación	Declaratoria de zonas rehabilitadas como reservas ecológicas municipales para servicios ambientales (captura de carbono, regulación hídrica, biodiversidad).

10. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

10.1. Marco normativo minero-ambiental ecuatoriano

El marco normativo minero – ambiental del Ecuador se fundamenta en un conjunto jerárquico de normas que regulan la actividad extractiva de minerales con enfoque en la sostenibilidad ambiental, la participación social y el desarrollo sustentable. Este marco jurídico se estructura conforme al principio de supremacía constitucional establecido en la Constitución de la República del Ecuador de 2008, que reconoce derechos a la naturaleza (Arts. 71-73) y estable el régimen de desarrollo sustentable (Art. 275) (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

- **Jerarquía normativa del sector minero – ambiental**

El ordenamiento jurídico ecuatoriano para el sector minero – ambiental se organiza en los siguientes niveles:

- *Constitución de la República del Ecuador (2008):* norma suprema que establece que los recursos naturales no renovables pertenecen al patrimonio inalienable del Estado (Art. 1), declara el derecho a vivir en un ambiente sano (Art. 14) y reconoce los derechos de la naturaleza (Arts. 71-73). El artículo 313 reserva al Estado el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar sectores estratégicos, incluyendo recursos naturales no renovables, bajo principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

- *Ley de Minería (2009, reformada 2013):* norma el ejercicio de los derechos soberanos del Estado para administrar, regular, controlar y gestionar el sector estratégico minero con principios de sostenibilidad ambiental. Establece el marco institucional, los regímenes mineros (gran minería, mediana, pequeña minería y minería artesanal), derechos y obligaciones de los titulares mineros, y el régimen de participación económica del Estado (Asamblea Nacional, 2009).

- *Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017):* establece el Sistema Único de Información Ambiental (SUIA), el proceso de regularización ambiental (Arts. 172-179) y las obligaciones de elaborar estudios de impacto ambiental para proyectos que generen mediano y alto impacto. Introduce la clasificación de impactos en no significativo, bajo, mediano y alto, determinando automáticamente el tipo de permiso ambiental requerido (Correa Delgado, 2017).

- *Reglamento Ambiental de Actividades Mineras (RAAM, Acuerdo MAATE-2025-0045-A):* Expendido en junio de 2025, deroga el anterior Acuerdo Ministerial 037 de 2014. Constituye la normativa técnica de aplicación nacional que establece disposiciones, procedimientos y requisitos específicos para prevenir, minimizar, evitar y controlar impactos ambientales en todas las fases mineras: exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación y cierre de minas (Recalde Larrea, 2025).

➢ **Clasificación de regímenes mineros**

La Ley Minera establece cuatro regímenes mineros según la escala de producción y superficie concesionada (Tabla 28):

Tabla 28 Clasificación de regímenes mineros en Ecuador (adaptado de la Ley de Minería Arts. 39-48).

Régimen	Superficie máxima (ha)	Producción máxima (t/día)
Gran minería	Sin límite	>1,000
Mediana minería	1,000	301 – 1,000
Pequeña minería	300	Hasta 300
Minería artesanal	50	Hasta 30

10.1.1. Principios rectores del marco normativo

El marco normativo minero – ambiental ecuatoriano se fundamenta en los siguientes principios constitucionales y legales:

- *Sostenibilidad ambiental*: garantizar que la actividad minera se desarrolle de manera que preserve los ecosistemas y permita la regeneración de ciclos naturales (Const. Arts. 71-72, Ley de Minería Art. 1).

- *Precaución y prevención*: adoptar medidas anticipadas para eliminar o mitigar consecuencias ambientales nocivas, incluso ante incertidumbre científica (Const. Art. 73, COA Arts. 9-10).

- *Responsabilidad objetiva*: los titulares mineros son responsables civil, penal y administrativamente por impactos ambientales causados, incluidos los de sus contratistas y subcontratistas (Ley de Minería Art. 78, RAAM Art. 5).

- *Participación ciudadana*: derecho de las comunidades afectadas a participar en procesos de toma de decisiones mediante consulta ambiental previa (Const. Art. 398, RAAM Art. 4).

- *Jerarquía de mitigación:* priorizar evitar, minimizar, rehabilitar y solo con última instancia, compensar los impactos ambientales (COA Art. 17).

La Tabla 29 enumera las autoridades competentes en el marco minero – ambiental ecuatoriano.

Tabla 29 Autoridades competentes en el marco minero – ambiental ecuatoriano.

Autoridad	Competencias principales
Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables	Rectoría sectorial minera; otorgamiento de títulos mineros; administración del catastro minero; formulación de políticas sectoriales (Ley de Minería Art. 7).
Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM)	Vigilancia, auditoría, intervención y control de todas las fases mineras; emisión de guías técnicas; fiscalización de operaciones (Ley de Minería Art. 8).
Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)	Autoridad Ambiental Nacional; regularización y control ambiental; emisión de licencias ambientales; monitoreo de calidad ambiental (RAAM Arts. 3, 7).
Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD)	Autoridad ambiental competente en su jurisdicción para proyectos conforme competencias descentralizadas (RAAM Art. 3).

El marco normativo establece los siguientes instrumentos obligatorios para la gestión ambiental de actividades mineras (Agual Barrero, 2024):

- *Registro ambiental*: requerido para exploración inicial y minería artesanal. Incluye información del proyecto, Plan de Manejo Ambiental (PMA), participación ciudadana y certificado de intersección con áreas protegidas (RAAM Art. 11).

- *Licencia Ambiental*: obligatoria para exploración avanzada, explotación, beneficio, fundición y refinación en pequeña, mediana y gran minería. Requiere estudio de impacto ambiental (EIA) elaborado por consultores calificados, participación ciudadana y garantía financiera (RAAM Art. 179, RAAM Art. 18).

- *Plan de Manejo Ambiental (PMA*): instrumento de gestión que establece medidas específicas para prevenir, mitigar, controlar, rehabilitar y compensar impactos ambientales durante todas las fases del proyecto minero (RAAM Arts. 11-18).

- *Auditorías Ambientales de Cumplimiento*: evaluación sistemática del cumplimiento del PMA y normativa ambiental vigente, con frecuencia trimestral, semestral o anual según régimen minero (RAAM Art. 41).

- *Garantía Financiera*: seguro o garantía financiera incondicional e irrevocable para asegurar el cumplimiento de obligaciones ambientales, ejecutable ante incumplimientos (RAAM Arts. 34-37).

El cierre de minas en Ecuador se regula principalmente a través de:

- *Ley de Minería* (2009) y sus reformas, que establecen obligaciones de rehabilitación ambiental (Vergara Francisco, 2009).

- *Reglamento Ambiental de Actividades Mineras*: define requisitos para planes de cierre (Correa Delgado, 2009).

- *Artículo 124 del Reglamento Ambiental*: “El titular Minero, Previo a la finalización prevista del proyecto en sus fases de explotación, beneficio, fundición o refinación deberá presentar un plan de cierre del proyecto, en un plazo no inferior a dos años (Correa Delgado, 2009) .

- *Normativa de la Agencia de Regulación y Control Minero* (ARCOM) para pequeña y mediana minería.

- *Código Orgánico Ambiental* (2017) que regula pasivos ambientales (Benítez Stephanie et al., 2018).

10.2. Legislación minera vigente en Ecuador para pequeña y media minería

El régimen especial de pequeña y mediana minería en Ecuador se encuentra regulado por la (Asamblea Nacional, 2009), sus reglamentos generales y el Reglamento del Régimen Especial de Pequeña Minería, con el objetivo de promover el desarrollo sustentable de este sector mediante asistencia técnica, capacitación y financiamiento (Ley de Minería Art. 6).

- **Pequeña minería: marco legal específico**

La pequeña minería se define como operaciones que se enmarcan en superficie máxima de 300 hectáreas mineras y producción hasta 300 toneladas diarias de material mineralizado (Ley de Minería Art. 40) (Recalde Larrea, 2025). El marco legal específico comprende:

- *Registro especial*: las concesiones de pequeña minería deben inscribirse en el Registro de Pequeña Minería bajo supervisión técnica y administrativa de ARCOM (Ley de Minería Art. 41).

- *Fomento estatal*: el Estado establece mecanismos de asistencia técnica, capacitación y financiamiento y sistemas incentivos para protección ambiental y generación de unidades productivas eficientes.

- *Regularización ambiental simplificada*: para pequeña minería en exploración sin sondeos se requiere Registro Ambiental con monitoreo anual. Para explotación se requiere Licencia Ambiental con monitoreo semestral (RAAM Art. 10, Art. 41).
- *Exploración simultánea con explotación*: actividades de pequeña minería pueden realizar labores simultáneas de exploración y explotación, requiriendo una sola licencia ambiental que abarque ambas fases.
- *Límites en sondeos de exploración*: máximo 30 plataformas de perforación por concesión, reducido a 20 en concesiones que intercepten con bosques y vegetación protectores (RAAM Art. 12).
- *Garantía financiera*: obligatoria para exploración con sondeos y para todas las actividades de explotación, con monto proporcional a la magnitud del proyecto (RAAM Arts. 15, 34).

- **Mediana minería: disposiciones aplicables**

La mediana minería comprende operaciones con superficie máxima de 1,000 hectáreas y producción entre 301 y 1,000 toneladas diarias (Asamblea Nacional, 2009). Las disposiciones específicas incluyen:

1. *Exploración por fases*:
- Exploración inicial (con o sin perforaciones): registro ambiental con monitoreo anual.
- Exploración avanzada: Licencia Ambiental con monitoreo trimestral.
- Explotación: Licencia Ambiental con monitoreo trimestral (RAAM Arts. 10, 41).

2. *Licencia Ambiental Unificada*: posibilidad de obtener una sola licencia para explotación conjuntamente con construcción y operación de plantas de beneficio, fundición y refinación, sin pertenecer al mismo titular y se ubican en la misma concesión (RAAM Art. 18)(Correa Delgado, 2017).

3. *Estudios de impacto ambiental robustos:* Los EIA deben incluir caracterización detallada de línea base ambiental, análisis de riesgos, planes de manejo, contingencias, cierre y abandono, elaborados por consultores ambientales calificados (RAAM Art. 18) (Correa Delgado, 2017).

4. *Monitoreo frecuente*: informes trimestrales de cumplimiento ambiental y auditorías ambientales periódicas para verificar cumplimiento del PMA (RAAM Art. 41).

Tanto pequeña como mediana minería compartes las siguientes obligaciones establecidas en la Ley de Minería en el RAAM (Agual Barrero, 2024):

- Presentar estudios ambientales aprobados por la Autoridad Ambiental previo al inicio de actividades (Ley de Minería Art. 78).

- Implementar el Plan de Manejo Ambiental (PMA) durante todas las fases del proyecto, incluyendo medidas de prevención, mitigación, control, rehabilitación y compensación (RAAM Art. 18).

- Realizar monitoreo continuo de calidad de aire, agua, suelo y ruido conforme límites permisibles establecidos en normativa ambiental (RAAM Arts. 50-55).

- Gestionar adecuadamente desechos peligrosos (mercurio, cianuro y aceites usados) y no peligrosos conforme el Código Orgánico del Ambiente (RAAM Arts. 60-62).

- Mantener vigente la garantía financiera durante toda la vida del proyecto, incluyendo fase de cierre (RAAM Art. 36).

- Ejecutar plan de cierre y abandono de minas, presentado con al menos 2 años de anticipación, que incluya rehabilitación de áreas degradadas y monitoreo post-cierre por 5 años (RAAM Arts. 110-116).

- Participar en procesos de participación ciudadana y consulta ambiental con comunidades afectadas (RAAM Art. 24).

10.3. Normas técnicas y ambientales aplicables al DMZP

El DMZP está sujeto a un régimen normativo especial debido a su condición histórica de alta actividad minera artesanal y de pequeña escala, los impactos ambientales acumulativos documentados y los riesgos geotécnicos asociados a labores subterráneas bajo áreas urbanas (Correa Delgado, 2009).

Además de la normativa general aplicable a todo el territorio nacional, el DMZP está regulado por instrumentos específicos:

- *Zona de exclusión minera (Acuerdo Ministerial 0050 de 2019):* delimita áreas bajo el casco urbano de Zaruma donde se prohíbe la actividad minera por riesgos de subsidencia y colapsos estructurales. Los títulos mineros interceptados con esta zona deben excluir dichas áreas (Correa Delgado, 2009).

- *Guía Técnica para el DMZP (ARCOM 2025)**:*** establece parámetros técnicos mínimos que deben cumplir los titulares mineros con derechos otorgados dentro de la zona, incluyendo diseño de labores subterráneas, sostenimiento, ventilación, manejo de agua de mina y monitoreo geotécnico (Agual Barrero, 2024).

- *Estado de Excepción (Decreto Ejecutivo 2017-002):* declarado en febrero de 2017 para el área minera Zaruma – Portovelo por actividades que podrían provocar daños irreparables a la población residente, habilitando intervenciones emergentes de control y regularización.

- *Declaratoria de Patrimonio Cultural (1990):* Zaruma fue declarado segundo Patrimonio Cultural de la Nación, generando restricciones adicionales para actividades que puedan afectar arquitectura colonial y valores patrimoniales (Fig. 30).

Figura 30. Estilo Arquitectónico de las casas de Zaruma e iglesia

El DMZP debe cumplir con las siguientes normas técnicas ambientales nacionales, establecidas en el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)(Ministerio del Medio Ambiente, 2018) y reglamentos específicos (Tabla 30).

Tabla 30 Normas técnicas ambientales aplicables al DMZP.

Componente ambiental	Norma técnica aplicable y límites permisibles
Calidad de agua	TULSMA libro VI Anexo 1: Límites permisibles para descargas a cuerpos de agua dulce. Parámetros críticos: pH (6-9), DBO_5 (<100 mg/L), cianuro total (<0,1 mg/L), mercurio (<0,005 mg/L), arsénico (<0,1 mg/L), plomo (<0,2 mg/L).
Calidad de aire	TULSMA libro VI Anexo 3: Concentraciones máximas de emisión desde fuentes fijas. PM_{10} (<100 ug/m^3), SO_2 (<5000 ug/m^3), NO_X (<2000 ug/m^3).
Ruido ambiental	TULSMA libro VI Anexo 5: niveles máximos de ruido permisibles según uso de suelo. Zona residencial: 55 dB (día), 45 dB (noche). Zona industrial: 70 dB (día), 65 dB (noche).
Suelos	TULSMA libro VI Anexo 2: criterios de calidad de suelo. Valores máximos para uso agrícola e industrial, según metales pesados (Hg, Pb, As, Cd, Cu, Zn).
Desechos peligrosos	Acuerdo Ministerial 142: listado de desechos peligrosos y gestión integral. Mercurio, cianuro, relaves con metales pesados clasificados como peligrosos (código NE-01, NE-06).

Dada la naturaleza metalogénica del distrito (vetas epitermales de Au-Ag-Cu-Pb-Zn) y las prácticas históricas de beneficio de mineral con amalgamación y cianuración, la normativa establece controles estrictos sobre:

- *Mercurio (Hg)*: prohibición de amalgamación de todo el mineral (whole-ore amalgamation). Solo se permite amalgamación restringida a concentrados gravimétricos con uso obligatorio de retortas individuales para recuperación de Hg. El mercurio metálico y sus residuos se clasifican como desecho peligroso (RAAM Art. 62, Acuerdo 142)(Recalde Larrea María, 2025).

- *Cianuro (CN^-):* Las plantas de cianuración requieren licencia ambiental específica. Obligatorio implementar sistemas de detoxificación de efluentes (oxidación con hipoclorito o

peróxido) para alcanzar límites de descarga (<0,1 mg/L CN^- libre). Monitoreo continuo de efluentes (RAAM Arts. 60, 95-98).

- *Drenaje ácido de roca (DAR):* Caracterización geoquímica de escombreras y relaves. Implementación de sistemas de recolección, tratamiento y neutralización de aguas ácidas. Revestimiento e impermeabilización de depósitos de relaves (RAAM Arts. 84-88)(Agual Barrero, 2024).

- *Aguas de mina*: tratamiento previo a descargas, cumpliendo límites para metales disueltos (Hg, Pb, As, Zn, Cu, Fe). Sistemas de sedimentación y neutralización de pH (TULSMA Anexo 1)(Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

Los titulares mineros en Zaruma – Portovelo han enfrentado procesos intensivos de regularización y control ambiental desde 2017. El Ministerio del Ambiente reportó en 2022 que, de 69 titulares notificados, solo un porcentaje menor había completado el proceso de licenciamiento ambiental conforme el Art. 26 del a Ley de Minería (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). Los procedimientos vigentes comprenden:

- Evaluación de estado de regularización: inspecciones técnicas a concesiones mineras y plantas de beneficio para determinar cumplimiento de obligaciones ambientales. Desde enero de 2022 se han realizado más de 107 inspecciones a plantas y 39 a concesiones mineras.

- Inicio de procesos administrativos sancionatorios: La Autoridad Ambiental ha iniciado 12 procesos administrativos contra operadores que no cuentan con licencia ambiental o incumplen condiciones PMA.

- Suspensión temporal de actividades: en febrero del 2026 se suspendieron 80 plantas de beneficio por incumplimiento ambiental y contaminación crítica del río Calera, evidenciando descargas de cianuro, arsénico y mercurio al río.

- Plazos de regularización: Notificación a titulares para iniciar proceso de regularización con plazo máximo de 10 días según normativa vigente (RAAM Art. 26).

- Instalaciones de tratamiento comunitario: construcción de relaveras comunitarias (actualmente existe la relavera comunitaria en El Tablón – Portovelo) para gestión centralizada de relaves y efluentes de múltiples operadores de pequeña escala.

La aplicación del marco normativo en Zaruma – Portovelo enfrenta desafíos particulares:

- Minería ilegal: operaciones sin concesión ni permisos ambientales que evaden controles y generan asimetrías competitivas frente a operadores formalizados.

- Pasivos ambientales históricos: más de un siglo de actividad minera ha generado contaminación acumulativa en suelos, sedimentos y cursos de agua (ríos Calera, Amarillo, Puyango), con concentraciones de Hg y CN^- que superan límites permisibles en varios órdenes de magnitud.

- Conflicto minería – patrimonio: tensión entre identidad minera (90% dependencia económica) e identidad patrimonial (arquitectura colonial, potencial turístico).

- Riesgos geotécnicos: hundimientos bajo el casco urbano de Zaruma que han afectado cerca de 90 viviendas y requirieron ubicación de 71 familias, derivados de labores subterráneas históricas sin controles técnicos adecuados.

11. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

11.1. Interpretación de hallazgos principales. Comparación con estudios similares en otras regiones mineras

➢ Metalotectos identificados en el DMZP

El presente estudio ha identificado y caracterizado múltiples metalotectos en el DMZP, confirmando su naturaleza polimetálica y su vinculación a sistemas epitermales de sulfuración intermedia. Los hallazgos principales se sintetizan en la siguiente Tabla 31.

Tabla 31 Principales metalotectos identificados en el DMZP y su aplicación exploratoria. Elaboración propia.

Tipo de metalotecto	Característica principal	Implicancia para exploración
Litológico	Unidad Portovelo (andesitas, tobas, ignimbritas, Oligoceno – Mioceno).	Roca huésped favorable con alta fracturabilidad y permeabilidad secundaria.
Estructural	Falla Piñas – Portovelo y sistemas N-S y NO-SE con jogs dilatacionales.	Control primario de fluidos hidrotermales y zonas de brechamiento.
Hidrotermal – mineralógico	Alteración propilítica, argílica, fílica y silicificación en envolventes concéntricas.	Indicador de proximidad a vetas económicas y guía para zonación vertical.
Geoquímico	Anomalías Au-Ag-Cu-Pb-Zn en halos de 200 – 500 m.	Herramienta de prospección geoquímica para delimitación de blancos.

La zonación mineralógica Norte – Sur documentada en este distrito, con sistemas de alta temperatura (Cu-Zn dominantes) hacia el norte y baja temperatura (Mn – Carbonatos) hacia el sur, refleja diferentes niveles de erosión sobre un sistema hidrotermal vertical, consistente con el modelo de “telescoping” propuesta por (Bonilla Guevara, 2010d) . Esta zonación espacial permite predecir la profundidad relativa de exposición y ajustar las estrategias de exploración según el sector. La comparación del DMZP con otros distritos epitermales de Sudamérica y el mundo revela similitudes metalogenéticas significativas (Tabla 32).

Tabla 32 Comparación del DMZP con otros distritos epitermales análogos en América Latina. Elaboración propia.

Distrito	País	Tipo	Similitudes con Zaruma - Portovelo
Fresnillo	México	Epitermal Ag-Pb-Zn	Vetas en échelon, alteración propilítica-argílica, sulfuración intermedia.
Cerro de Pasco	Perú	Epitermal Au-Ag-Cu-Pb-Zn	Control estructural por fallas regionales, zonación térmica N-S.
El Indio	Chile	Epitermal Au-Ag alta sulfuración	Alteración argílica avanzada, aunque difiere en estado de sulfuración.
Buriticá	Colombia	Epitermal Au-Ag sulfuración intermedia	Vetas de cuarzo-sulfuros en ambiente volcánico Terciario.
Cerro Vanguardia	Argentina	Epitermal Au-Ag baja sulfuración	Campo filoneano vetiforme (67 vetas), control estructural por fracturas tipo “cola de caballo”, alteración sericitica-propilítica.

Particularmente, el distrito Fresnillo (México) presenta una analogía metalogenética cercana, con vetas epitermales de Ag-Pb-Zn-Au alojadas en rocas volcánicas del Terciario, controladas estructuralmente por sistemas de fallas transcurrentes y con zonación mineralógica similar. Esta comparación sugiere que las técnicas de exploración exitosas en Fresnillos como geofísica magnetométrica para detectar alteración hidrotermal y geoquímica de suelos multielemento podrían aplicarse efectivamente en Zaruma – Portovelo.

Cerro Vanguardia (Argentina) constituye otro caso análogo relevante. Ubicado en el macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz, es uno de los distritos epitermales más extensos del mundo (350 km^2) con 67 vetas de Au-Ag de baja sulfuración (PorterGeo, n.d.-a). Las similitudes con Zaruma – Portovelo son notables:

- Estilo de mineralización**:** vetas y stockworks de cuarzo-adularia con oro-plata-electrum, pirita, argentita, sulfosales de plata, calcopirita, galena y esfalerita, emplazadas en rocas volcánicas félsicas (Formación Chon Aike, Jurásico Medio) (Schalamuk et al., 1997).
- Control estructural**:** sistemas de fracturas con diseño tipo “cola de caballo” asociados a zonas de cizalla, similar a las estructuras dilatacionales (jogs) de Zaruma – Portovelo.
- Alteración hidrotermal**:** silicificación y alteración sericítica en el entorno de vetas, con alteración propilítica en profundidad y piritización diseminada, comparable al patrón de alteración concéntrica de Zaruma – Portovelo.
- Edad de mineralización**:** Jurásico Medio (142-152 Ma), aunque difiere de la edad Oligoceno-Mioceno de Zaruma – Portovelo, ambos están vinculados a magmatismo de arco y régimen tectónico extensional (rift continental intraplaca en Cerro Vanguardia vs. transcurrente – transtensivo en Zaruma – Portovelo).
- Producción y recursos**:** Cerro Vanguardia reportó 282,000 onzas Au anuales (2018) con recursos de 2.86 millones de onzas Au, demostrando viabilidad económica a escala mediana similar al potencial del distrito minero Zaruma – Portovelo.

La experiencia de Cerro Vanguardia en métodos de explotación combinados (subterráneo y a cielo abierto) y procesamiento mediante cianuración, aplicables en contextos de múltiples vetas de geometría irregular, ofrece lecciones valiosas para optimizar la pequeña y media minería en Zaruma – Portovelo. Adicionalmente, el estudio de inclusiones fluidas en cuarzo y esfalerita de Cerro Vanguardia podría replicarse en Zaruma – Portovelo para refinar modelos de temperatura y composición de fluidos mineralizantes. En contraste, el distrito El Indio (Chile), aunque también epitermal, presenta sulfuración alta (vs. intermedia en Zaruma – Portovelo), lo que limita la transferencia directa de modelos de exploración (Pérez, 2026).

Los hallazgos permiten consolidar un modelo metalogenético coherente para DMZP:

- Magmatismo de arco Oligoceno – Mioceno (32-15 Ma) con intrusivos diorítico-granodioríticos que aportan calor y metales.
- Régimen tectónico transcurrente – transtensivo que genera sistemas de fallas N-S y estructuras dilatacionales (jogs).
- Circulación de fluidos hidrotermales a 200-300 C° con pH neutro y salinidad moderada (11-18% eq. NaCl).

- Precipitación de Au-Ag-Cu-Pb-Zn en vetas y brechas hidráulicas asociadas a episodios de ebullición.

- Zonación vertical y lateral producto de enfriamiento progresivo del sistema.

Este modelo es consistente con los sistemas epitermales tipo Cordillerano descritos por Sillitoe y Hedenquist (2003) para ambientes de arco volcánico en los Andes.

11.2. Implicancias de explotación a pequeña y mediana escala

- **Ventajas competitivas de la pequeña y mediana minería**

La caracterización detallada de metalotectos en Zaruma – Portovelo tiene implicancias directas para optimizar la explotación a pequeña y mediana escala:

- **Ventajas operativas**:

- Selectividad minera: las vetas epitermales de Zaruma – Portovelo presentas geometrías tabulares con espesores de 0.3 – 2.7 m, ideales para métodos de explotación selectiva (corte y relleno, cámaras y pilares) que maximizan la recuperación de mineral de alta ley y minimizan la dilución.

- Adaptabilidad geológica: la pequeña y mediana minería puede ajustar rápidamente sus labores siguiendo estructuras de mayor ley (jogs, intersecciones de vetas), a diferencia de la gran minería que requiere planificación a largo plazo.

- Baja inversión inicial: la exploración guiada por metalotectos reduce el riesgo geológico y permite a operadores de pequeña escala focalizar inversiones en blancos de alta probabilidad.

- Generación de empleo local: en Zaruma – Portovelo, el 90% de la población depende directa o indirectamente de la minería, constituyendo un motor económico vital.

Sin embargo, la pequeña y mediana minería enfrente limitaciones críticas documentadas en este estudio (Tabla 33):

Tabla 33 Principales desafíos de la pequeña y mediana minería en Zaruma – Portovelo. Elaboración propia.

Desafío	Manifestación en Zaruma - Portovelo	Consecuencias
Capacidad técnica limitada	Falta de mapeo geológico sistemático, exploración empírica.	Pérdidas económicas, baja eficiencia de recuperación (50-60%).
Informalidad e ilegalidad	200-300 operadores informales sin licencia ambiental.	Contaminación hídrica (Hg, CN^-), conflictos socio-ambientales.
Riesgos geotécnicos	90 viviendas afectadas por hundimientos, 71 familias reubicadas.	Pérdida de patrimonio cultural, costos sociales elevados.
Acceso a financiamiento	Dificultad para obtener crédito bancario sin garantías.	Imposibilidad de modernizar procesos, perpetuación de métodos artesanales.

El conocimiento de metalotectos abre oportunidades concretas:

- Programas de capacitación técnica: formación de operadores en reconocimiento de la alteración hidrotermal, cartografía estructural básica y muestreo geoquímico sistemático.

- Infraestructura compartida: implementación de plantas de beneficio comunitarias (ejemplo: relavera comunitaria El Tablón – Portovelo) que permiten economías de escala y control ambiental centralizado.

- Asociatividad: conformación de consorcios de pequeños mineros para acceder a asistencia técnica, financiamiento y mercados formales.

- Tecnologías apropiadas: adopción de equipos de bajo costo, pero alta eficiencia (concentradores gravimétricos Falcon, Nelson; sistemas de retorta para amalgamación controlada).

11.3. Desafíos normativos y ambientales en el contexto local

- **Normativos**

El análisis de marco normativo minero – ambiental ecuatoriano revela un sistema jurídico robusto, pero con series dificultades de implementación en Zaruma – Portovelo. La Ley de Minería (2009), el Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017)(Correa Delgado Rafael, 2017) y el Reglamento Ambiental de Actividades Mineras (RAAM, 2025) (Recalde Larrea María, 2025) establecen obligaciones estrictas para la pequeña y mediana minería.

Las principales obligaciones normativas son:

- Licencia Ambiental previa al inicio de operaciones (RAAM Art. 18).
- Plan de Manejo Ambiental (PMA) con medidas de prevención, mitigación y restauración.
- Monitoreo continuo de calidad de agua, aire y suelo.
- Gestión de desechos peligrosos (Hg, CN^-, relaves con metales pesados).
- Garantía financiera para cierre de minas.
- Participación ciudadana y consulta ambiental.

Sin embargo, el cumplimiento efectivo es limitado. Según reportes del Ministerio del Medio Ambiente (2018), de 69 titulares mineros notificados en Zaruma – Portovelo, menos del 30% habían completado el proceso de licenciamiento ambiental. En febrero del 2026, se suspendieron 80 plantas de beneficio por incumplimiento ambiental y contaminación crítica del río Calera con cianuro, arsénico y mercurio.

- **Impactos ambientales críticos**

La evaluación de impactos socio – ambientales mediante matriz de Leopold modificada identifica los componentes más afectados (Tabla 34).

Tabla 34 Matriz de evaluación de impactos socioambientales (Magnitud/Importancia, escala 1-10) en los componentes más críticos del DMZP. El signo negativo indica impacto adverso. Elaboración propia con base en la Tabla 10.

Actividad	Calidad de agua	Estabilidad del suelo	Calidad del aire	Salud pública
Explotación subterránea no planificada	-8/9	-9/10	-4/6	-7/8
Beneficio sin tratamiento de efluentes	-9/10	-3/5	-6/7	-8/9
Disposición inadecuada de relaves	-8/9	-7/8	-2/4	-7/8
Explotación subterránea ilegal sin control técnico	-6/7	-8/9	-4/5	-6/7
Beneficio ilegal con uso inadecuado de Hg y CN-	-8/9	-5/6	-6/7	-8/9
Plantas de beneficio formales	-5/8	-2/4	-4/6	-4/6

Los impactos más críticos identificados a partir de la Tabla 34 se concentran en la calidad de agua, la estabilidad del suelo, la calidad del aire y la salud pública:

- En la calidad de agua: los principales efectos se relacionan con la presencia de Hg, As, cianuro (CN-) y metales pesados (Pb, Zn y Cu) en los ríos Calera, Amarillo y Puyango, producto del beneficio sin tratamiento de efluentes y de la disposición inadecuada de relaves.
- En la estabilidad del suelo, la explotación subterránea no planificada y la mala disposición de residuos mineros favorecen subsidencias e inestabilidad del terreno.
- En la calidad del aire, las actividades de extracción, transporte y beneficio generan emisiones de polvo y material particulado que deterioran el ambiente local.
- La salud pública resulta afectada por la exposición de la población a contaminantes presentes en el agua, el aire y los suelos. De manera complementaria, también se reconocen efectos relevantes sobre el patrimonio cultural y la biodiversidad, aunque estos no forman parte de la síntesis específica presentada en la Tabla 34.

- **Conflictos Socio – Ambientales principales**

El distrito presenta múltiples conflictos con actores divergentes (Tabla 35):

Tabla 35 Principales conflictos socio – ambientales en Zaruma – Portovelo.

Conflicto	Actores	Intereses en juego	Nivel de tensión
Hundimientos urbanos	Población afectada vs. mineros ilegales vs. Estado	Seguridad habitacional vs. comunidad minera	Muy alto
Contaminación hídrica	Comunidades aguas abajo vs. plantas de beneficio	Agua limpia vs. operación de plantas	Alto
Minería ilegal	Mineros ilegales vs. concesionaros legales vs. Estado	Subsistencia económica vs. legalidad	Alto
Turismo vs. minería	Sector turístico vs. sector minero	Desarrollo turístico vs. actividad extractiva	Medio

➢ **Desafíos normativos específicos**

Los desafíos para la aplicación efectiva del marco normativo incluyen:

⌖ Capacidad institucional limitada: insuficiente personal técnico del Ministerio de Ambiente y ARCOM para fiscalización sistemática en 200+ concesiones activas.

⌖ Asimetría competitiva: operadores formales asumen costos ambientales (tratamiento de efluentes, garantías financieras) mientras minería ilegal opera sin controles.

⌖ Pasivos ambientales históricos: más de un siglo de minería sin regulación ha generado contaminación acumulativa cuya remediación excede la capacidad financiera de operadores actuales.

⌖ Presión social por empleo: dependencia económica extrema (90% de la población) genera resistencia a cierres de operaciones contaminantes.

⌖ Complejidad normativa: superposición de competencias entre Ministerios (Minería, Ambiente, Riesgos, Desarrollo Urbano) generan vacíos y duplicidades.

11.4. Confección de una matriz FODA

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) integra los hallazgos del estudio para evaluar la viabilidad de la pequeña y mediana minería en Zaruma – Portovelo basada en metalotectos (Tabla 36).

Tabla 36 Matriz FODA para pequeña y mediana minería en Zaruma – Portovelo basada en metalotectos. Elaboración propia.

Fortalezas (internas)	Debilidades (internas)
F1. Distrito con más de 100 años de tradición minera y conocimiento empírico local acumulado.	D1. Capacidad técnica limitada: falta de geólogos, ingenieros y técnicos especializados en pequeña minería.
F2. Metalotectos bien caracterizados (litológicos, estructurales, hidrotermales, geoquímicos) que guían exploración.	D2. Infraestructura obsoleta: plantas de beneficios antiguas con baja eficiencia de recuperación (50-60%).
F3. Vetas epitermales de alta ley (Au: 5-15 g/t promedio, con valores hasta 30-50 g/t en sectores ricos).	D3. Informalidad predominante: 200-300 operadores sin licencia ambiental ni títulos regularizados.
F4. Geometría favorable de vetas (0.3-2.7 m espesor) para métodos selectivos de bajo costo.	D4. Acceso limitado a financiamiento: imposibilidad de obtener créditos bancarios sin garantías.
F5. Zonación mineralógica N-S predecible que permite optimización de exploración por sectores.	D5. Gestión ambiental deficiente: disposición inadecuada de relaves, uso de Hg y CN- sin controles.
F6. Múltiples sistemas de vetas (>30 filones) con potencial de extensión en profundidad.	D6. Fragmentación de operadores: competencia interna, falta de asociatividad, duplicación de infraestructura.
F7. Experiencia en métodos de explotación subterránea (corte y relleno, cámaras y pilares).	D7. Riesgos geotécnicos severos: subsidencia bajo casco urbano, labores sin soporte adecuado.
F8. Presencia de instituciones de apoyo (IIGE, universidades locales) con programas de asistencia técnica.	D8. Baja recuperación metalúrgica: pérdidas de Au en relaves por procesos ineficientes.

Oportunidades (externas)	Amenazas (externas)
O1. Precios internacionales de oro históricamente altos (>$5,000/oz en marzo 2026) que mejoran rentabilidad.	A1. Volatilidad de precios internacionales de metales que afecta viabilidad económica de operaciones marginales.
O2. Marco normativo favorable a pequeña minería con régimen especial simplificado (Ley de Minería 2009).	A2. Endurecimiento progresivo de regulaciones ambientales que aumentas costos de cumplimiento.
O3. Demanda global creciente de oro como activo refugio en contextos de incertidumbre geopolítica.	A3. Competencia con minería ilegal que opera sin costos ambientales ni tributarios.
O4. Tecnologías apropiadas de bajo costo disponibles (concentradores gravimétricos, retortas, cianuración en tanques).	A4. Conflictos socio-ambientales crecientes que generan oposición social y riesgo de cierre de operaciones.
O5. Programas de cooperación internacional y fondos verdes para minería sostenible (GEF, BID, Banco Mundial).	A5. Pasivos ambientales históricos que requieren remediación costosa sin responsables identificados.
O6. Potencial de diversificación económica (turismo minero patrimonial, agro-silvicultura post-cierre).	A6. Riesgo de desastres geotécnicos (colapsos masivos) bajo zonas urbanas que podrían forzar cierre definitivo.
O7. Mercados internacionales de oro responsable (certificaciones Fairmined, Fairtrade) con sobreprecios de 10-15%.	A7. Cambio climático: intensificación de lluvias que aumentas riesgos de deslizamientos y drenaje ácido.
O8. Desarrollo de cadenas cortas de valor (refinación nacional, joyería artesanal) que capturan mayor margen.	A8. Despoblamiento por migración de jóvenes hacia ciudades grandes, envejecimiento de fuerza laboral minera.

➢ **Estrategias derivadas del análisis FODA**

• *Estrategias FO (Fortalezas-Oportunidades) – Ofensivas:*

⌖ Aprovechar metalotectos caracterizados (F2) y precios altos de oro (O1) para atraer inversión en exploración brownfield.

⌖ Utilizar conocimiento local acumulado (F1) y tecnologías apropiadas (O4) para mejorar la recuperación metalúrgica.

⌖ Capitalizar programas de cooperación internacional (O5) para fortalecer capacidad técnica institucional.

• *Estrategias FA (Fortalezas-Amenazas) – Defensivas*:

⌖ Usar zonación mineralógica predecible (F5) para priorizar sectores de menor riesgo geotécnico (A6).

⌖ Formar consorcios de operadores (F7) para competir con minería ilegal mediante economía de escala (A3).

⌖ Implementar certificaciones de oro responsable (O7) para diferenciarse de operadores informales (A4).

• *Estrategias DO (Debilidades-Oportunidades) – Reorientación*:

⌖ Superar limitaciones técnicas (D1) mediante programas de capacitación financiados por cooperación internacional (O5).

⌖ Reemplazar infraestructura obsoleta (D2) con tecnologías apropiadas de bajo costo (O4).

- Regularizar operadores informales (D3) aprovechando marco normativo favorable (O2) y asistencia técnica.

- *Estrategias DA (Debilidades-Amenazas) – Supervivencia*:
  - Mejor gestión ambiental (D5) para evitar cierres por conflictos socio-ambientales (A4).
  - Fortalecer la asociatividad entre pequeños y medianos operadores mineros del DMZP (D6), en coordinación con los GAD y las instituciones rectoras, para compartir infraestructura de tratamiento, reducir costos individuales de cumplimiento ambiental y mejorar su capacidad de negociación frente a cambios regulatorios.
  - Implementar planes de estabilización geotécnica (D7) para mitigar riesgos de colapsos (A6).

11.5. Análisis del mercado internacional

11.5.1. Panorama del mercado internacional de metales preciosos

El análisis del mercado internacional de metales preciosos y de base producido en Zaruma – Portovelo (oro, plata, cobre, plomo, zinc) revela un contexto extraordinariamente favorable para la pequeña y mediana minería ecuatoriana (Trading Economics, n.d.).

- *Oro (Au)*

El precio internacional del oro ha experimentado una tendencia alcista sostenida, alcanzando máximos históricos en 2024-2026 (SunSirs, 2026). Según datos de mercado:

- Precio actual (marzo 2026): $5,010 por onza troy, reflejando un incremento de 67% interanual.
- Ganancia anual 2024: +26.59%
- Ganancia anual 2025: +27-30% (estimado).
- Proyección 2026: continuidad de precios elevados por incertidumbre geopolítica y políticas monetarias expansivas.

Los principales impulsores del mercado del oro incluyen:

- Demanda de inversión: aumento del 40% en 2020 respecto al 2019 debido al COVID-19, tendencia que se mantiene.
- Reservas de bancos centrales: compras masivas de oro por bancos centrales de países emergentes (China, India, Rusia) como diversificación de reservas.
- Contexto geopolítico: tensiones internacionales crecientes que refuerzan el rol del oro como activo refugio.
- Política monetaria: expectativas de reducción de tasas de interés por la Reserva Federal de EE.UU. que incrementa el atractivo del oro (no genera intereses, pero preserva valor).

Principales destinos de exportación de oro ecuatoriano (Fig.31).

Figura 31. Principales destinos de exportación de oro ecuatoriano

➢ *Plata (Ag)*

La plata mostró un desempeño excepcional, superando al oro en rentabilidad (SunSirs, 2026):

- Precio actual (diciembre 2025): $72.26 por onza troy.
- Incremento interanual: +150% (Londres), +130% (COMEX).
- Máximo histórico enero 2026: %90+ por onza troy.

Los impulsores del mercado de plata combinan demanda de inversión y uso industrial:

- Transición energética: demanda creciente para paneles solares fotovoltaicos (la industria solar consume 30% de plata mundial).
- Electrónica: uso en circuitos, contactos eléctricos, recubrimientos conductivos.
- Escasez estructural: demanda mundial supera producción minera por 5 años consecutivos según Silver Institute.
- Inversión: aumento sostenido en ETF globales de plata.

➢ *Cobre (Cu)*

El cobre es crítico para la transición energética global (SunSirs, 2026):

- Precio actual (marzo 2026): $578.76 por libra ($1.28/lb).
- Tendencia: máximos históricos repetidos desde octubre 2025.
- Demanda: Impulsada por vehículos eléctricos, energías renovables, infraestructura.

➢ *Plomo (Pb) y Zinc (Zn)*

- Plomo: demanda estable para baterías de almacenamiento de energía.
- Zinc: precio $146.96/lb (marzo 2026), crecimiento de 19.3% en exportaciones peruanas (referencia regional).

➢ ***Tamaño y proyección del mercado de metales preciosos***

El mercado mundial de metales precisos está valorado en $341.95 mil millones en 2025,

con proyección de crecimiento a $361.22 mil millones en 2026 (SunSirs, 2026). La tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) 2026-2033 se estima entre 5.6-7.2%, impulsada por:

- Aplicaciones industriales crecientes (electrónica, catalizadores automotrices, dispositivos médicos).
- Demanda de inversión sostenida.
- Sustitución limitada: propiedades únicas (conductividad, resistencia a corrosión, capacidades catalíticas) hacen a metales preciosos insustituibles en muchas aplicaciones.

11.5.2. Posicionamiento de Zaruma – Portovelo en el mercado internacional

El Distrito Minero Zaruma – Portovelo presenta características que le permiten capitalizar las oportunidades del mercado internacional (PorterGeo, n.d.): La tabla 37 muestra las ventajas competitivas:

Tabla 37. Ventajas competitivas de Zaruma – Portovelo en el mercado internacional. Elaboración propia.

Factor	Descripción
Polimetalismo	Producción simultánea de Au-Ag-Cu-Pb-Zn diversifica riesgo de precios y maximiza ingresos.
Leyes elevadas	Au: 5-15 g/t promedio (vs. 1-3 g/t en minas industriales grandes) permite rentabilidad incluso a pequeña escala.
Proximidad a puertos	Distancia a puerto Bolívar (Machala): 80 km reduce costos logísticos de exportación.
Estabilidad política	Ecuador ofrece seguridad jurídica relativa en región andina con bajo riesgo de nacionalización.

- ***Oportunidades de valor agregado*:**

- Certificación de oro responsable: acceso a mercados premium (Fairmined, Fairtrade Gold) con sobreprecios de 10-15% sobre precio spot.
- Refinación nacional: desarrollo de capacidad de refinación en Ecuador para capturar margen de valor agregado (actualmente el mineral se exporta como doré-aleación oro-plata sin refinar).
- Joyería artesanal: Zaruma tiene tradición orfebre que puede vincularse a cadenas de comercio justo.
- Trazabilidad Blockchain: implementación de sistemas de trazabilidad digital para garantizar origen responsable.

- ***Riesgos y amenazas del mercado internacional***

- Volatilidad de precios**:** A pesar de la tendencia alcista, el oro y la plata presentan alta volatilidad intradía e inter-mensual. La pequeña minería, con capacidad limitada de cobertura financiera, está expuesta a caídas abruptas de precios.

- Sobreoferta potencial**:** La apertura de nuevos proyectos de gran minería (ejemplo: proyectos auríferos en África Occidental, Rusia) podrían incrementar la oferta global y presionar precios a la baja.

- Sustitución tecnológica**:** aunque limitada, existe investigación en materiales alternativos para aplicaciones industriales de plata y platino (por ejemplo: grafeno, nanomateriales conductivos).

- Barreras comerciales**:** Certificaciones ambientales y sociales cada vez más exigentes en mercados europeos y norteamericanos, regulaciones anti-lavado de dinero que dificultan comercialización de oro artesanal, competencia de oro reciclado (30% de oferta global proviene de reciclaje).

12. RECOMENDACIONES

Con base en el análisis integral de metalotectos y guías de prospección en el Distrito Minero Zaruma – Portovelo, y considerando los hallazgos sobre impactos socioambientales, desafíos normativos y el contexto de mercado internacional favorable, se presentan las siguientes recomendaciones estructurales en tres ejes estratégicos.

12.1. Para la gestión minera y ambiental

- ***Programas de capacitación técnica en metalotectos***

Desarrollar talleres prácticos dirigidos a operadores de pequeña y mediana minería que incluyan:

⌖ Reconocimiento en campo de metalotectos litológicos, estructurales e hidrotermales en vetas principales (Vizcaya, Sexmo, Portovelo).

⌖ Mapeo estructural para identificar jogs dilatacionales, intersecciones de fallas y zonas de brechamiento.

⌖ Interpretación de halos de alteración (propilítica, argílica, silicificación) como vectores hacia mineralización.

⌖ Muestreo geoquímico sistemático de Au-Ag-Cu-Pb-Zn para delimitación de blancos exploratorios.

Ejecutores: Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), universidades nacionales, ARCOM y asociaciones de mineros.

Financiamiento: Cooperación internacional (Banco Mundial, BID, GEF).

- ***Infraestructura compartida y asociatividad***

Para superar limitaciones de capacidad técnica e infraestructura obsoleta:

⌖ Expandir el modelo de relavera comunitaria de El Tablón hacia otras zonas, creando centros de beneficio compartido con circuitos gravimétricos-flotación-cianuración optimizados (recuperación 75-80% vs. 50-60%).

⌖ Establecer consorcios formales para acceso conjunto a: asistencia técnica, financiamiento bancario, equipos de prospección (GPS, geoquímicos portátiles) y certificación de oro responsable (Fairmined, Fairtrade Gold) con sobreprecios de 10-15%.

⌖ Crear laboratorios regionales de análisis geoquímico y mineralógico de bajo costo.

- ***Tecnologías limpias y eficientes***

Implementación progresiva de tecnologías apropiadas:

⌖ *Eliminación de amalgamación de todo el mineral*: sustituir por concentración gravimétrica intensiva (Falcon, Nelson, Knelson) con amalgamación controlada solo en concentrados y retortas cerradas. Reducción de emisiones de Hg de 1.5 t/año a <0.2 t/año.

- *Flotación diferencial de sulfuros*: recuperar Cu, Pb, Zn como subproductos antes de la cianuración, reduciendo consumo de cianuro en 30-40%.

- *Tratamiento de efluentes*: módulos compactos en cada planta de neutralización, oxidación de cianuro y precipitación de metales pesados (CN- <0.1 mg/L, Hg <0.002 mg/L, As <0.1 mg/L).

- *Monitoreo geotécnico*: red de GPS diferencial e inclinómetros (15-25 puntos) en zonas urbanas sobre labores subterráneas para prevenir colapsos.

➢ ***Estabilización geotécnica urgente***

Acciones prioritarias ante riesgos críticos (90 viviendas afectadas):

- Mapeo 3D con LIDAR de labores subterráneas bajo casco urbano de Zaruma.
- Relleno hidráulico urgente con pasta-fill en caserones críticos (<150 m bajo zona urbana).
- Sellado de bocaminas abandonadas con tapones de concreto reforzado (2-3 m).
- Ampliación de zona de exclusión minera bajo infraestructura crítica (escuelas, hospitales, patrimonio).

➢ ***Gestión de pasivos ambientales***

Para abordar contaminación acumulativa de >100 años:

- Caracterización sistemática de 25-40 depósitos de relaves: contenido de Hg, CN-, As, Pb, Zn, Cu; potencial de drenaje ácido; estabilidad física.
- Remediación diferenciada:
- *Relaves en cauces*: remoción por dragado controlado, confinamiento en celda impermeabilizada.
- *Disposiciones en laderas*: encapsulamiento con geomembrana HDPE + cobertura multicapa.
- *Represas pequeñas*: estabilización in-situ con cobertura seca y revegetación.
- *Revegetación con especies nativas andinas* (*Alnus acuminata, Cedrela odorata, Inga* spp.) alcanzando cobertura >70% al año 3.

➢ ***Trazabilidad y certificación de oro responsable***

Para acceder a mercado premium:

- Sistema de trazabilidad Blockchain desde extracción hasta comercialización.
- Certificaciones internacionales (Fairmined, Fairtrade Gold, RJC).
- Cadenas cortas de valor agregado mediante refinación nacional y vinculación con orfebrería artesanal local.

12.2. Para la política y regulación minera

- ***Fortalecimiento institucional de fiscalización***

Mejorar la capacidad de control sobre 200 concesiones activas:

- Incrementar el personal técnico (geólogos, ingenieros, especialistas ambientales) en ARCOM y MAATE provincial: ratio 1 inspector/15-20 operaciones.
- Monitoreo remoto: sensores satelitales (Landsat, Sentinel), drones, estaciones telemétricas de calidad de agua con transmisión en tiempo real.
- Plataforma digital integrada consolidando información catastral, licencias, producción, infracciones, accesible interinstitucionalmente.

- ***Regularización masiva asistida***

Abordar informalidad predominante (200-300 operadores sin licencia):

- Programa extraordinario con procedimientos simplificados, plazos razonables (18-24 meses) y asistencia técnica gratuita para EIA y PMA.
- Incentivos: reducción de 50% de patentes para regularización temprana, crédito preferencial, exoneración de multas históricas condicionada a cumplimiento.
- Sanciones progresivas: notificación (90 días) → suspensión temporal (6 meses) → cierre definitivo por incumplimiento persistente.

- ***Armonización normativa***

Simplificar complejidad regulatoria:

- Comisión Interinstitucional Permanente (Ministerios, ARCOM, SNGRE, GAD, mineros, sociedad civil).
- Reglamento especial para Zaruma – Portovelo consolidando disposiciones dispersas en instrumento único.
- Ventanilla única de trámites minero-ambientales reduciendo tiempos y costos.

- ***Responsabilidad por pasivos históricos***

Régimen especial considerando capacidad financiera limitada:

- Fondo Nacional de Remediación financiado con: 3-5% de regalías mineras, cooperación internacional, bonos verdes.
- Responsabilidad compartida diferenciada: Estado asume pasivos pre-2009; operadores actuales responsables desde 2009.
- Garantías financieras escalonadas:
    - Pequeña minería: 5-10% de producción anual en fondo de cierre.
    - Mediana minería: 10-15% + póliza de seguro ambiental.

- ***Convivencia minera – patrimonio cultural***

Plan de ordenamiento territorial especial:

- Delimitar: zonas de exclusión absoluta (casco histórico), zonas de minería subterránea

regulada con controles estrictos, zonas de uso mixto (turismo + agricultura).

- Turismo minero patrimonial: convertir minas históricas (Sexmo) en atractivos culturales con museo de sitio, generando empleo alternativo.
- Incentivos fiscales (reducción 50% impuestos prediales/10 años) para restauración de edificaciones patrimoniales.

➢ ***Participación ciudadana y resolución de conflictos***

Gestionar conflictos socioambientales identificados:

- Mesa de concentración minera con sesiones trimestrales para diálogo multiactor.
- Consulta ambiental previa obligatoria con socialización transparente y respuestas técnicas fundamentadas.
- Defensoría ambiental comunitaria brindando asesoría técnica gratuita y acompañamiento en denuncias.
- Sistema de compensación justa para afectados por hundimientos: avaluó técnico, reubicación, indemnización financiada solidariamente.

12.3 Líneas futuras de investigación

➢ ***Refinamiento metalogenético mediante inclusiones fluidas***

Validar modelo conceptual (epitermal sulfuración intermedia, 200-300°C, pH neutro, 11-18 eq. % NaCl):

- Estudios sistemáticos de inclusiones fluidas en cuarzo y sulfuros: temperatura, salinidad, composición de gases, presión, profundidad de emplazamiento.
- Isótopos estables ($\delta^{18}O$, δD, $\delta^{34}S$, $\delta^{13}C$) para determinar fuentes de fluidos y azufre.
- Geocronología U-Pb y $^{40}Ar/^{39}Ar$ para secuencia temporal magmático – hidrotermal.
- Geoquímica de elementos traza (LA-ICP-MS) en sulfuros para vectores hacia alta ley aurífera.

*Resultado***:** modelo predictivo 3D de zonación metalogenética para exploración en profundidad

➢ ***Caracterización geomecánica para optimización de explotación***

Superar limitaciones actuales (diseños empíricos, sobre-roturas):

- Clasificación geomecánica (RMR, Q, GSI) en diferentes dominios litológicos y estructurales.
- Ensayos de laboratorio: resistencia, módulo de elasticidad, criterios de falla (Mohr-Coulomb, Hoek-Brown).
- Modelamiento numérico (Phase2, FLAC3D): dimensionamiento de pilares, secuencias de extracción anti-subsidencia, sistemas de sostenimiento.
- Protocolos de perforación y voladura optimizados: diseño de mallas, selección de explosivos, control de fragmentación.

Transferencia: guías técnicas y capacitación mediante convenio IIGE-universidades-operadores.

- ***Prospección geofísica para potencial en profundidad***

Evaluar extensiones del sistema mineralizado:

- Geofísica regional (50-100 km^2): magnetometría, electromagnética (EM), polarización inducida (IP), gravimetría.
- Magnetotelúrica (MT) para estructura profunda (>500 m) y conexión con posibles pórfidos Cu-Au subyacentes.
- Integración SIG para mapas de prospectividad (fuzzy logic, pesos de evidencias, redes neuronales).

- ***Metalurgia apropiada para pequeña minería***

Mejorar eficiencias y reducir impactos:

- Optimización gravimétrica: estudios de liberación mineralógica (MLA, QEMSCAN), ensayos con Falcon/Knelson, diagramas de flujo según tipología de mena.
- Procesos alternativos a cianuración: tiosulfato, tiourea, biolixiviación para sulfuros refractarios.
- Flotación diferencial piloto para concentrados de Cu, Pb, Zn.
- Plantas modulares compactas (10-50 t/día) estandarizadas (<250,000 USD).

Ejecutores: laboratorios universitarios (EPN, U. Cuenca, UTM) con fondos SENESCYT.

- **Vigilancia epidemiológica de exposición a Hg y As**

Evaluar impactos en salud pública:

- Estudio poblacional en Zaruma – Portovelo (15,000 habitantes): biomarcadores (Hg sangre/orina, As orina/cabello), prevalencia de efectos neurológicos/renales/dérmicos, grupos vulnerables.
- Sistema de vigilancia permanente con monitoreo periódico de cohortes.
- Investigación de rutas de exposición: inhalación, ingesta de agua/alimentos, contacto dérmico.
- Evaluación de riesgo (modelos USEPA) en intervenciones: agua potable segura, restricción de uso de suelos contaminados, quelación para intoxicaciones graves.

Liderazgo: Ministerio de Salud Pública con universidades y OPS/OMS.

- **Modelamiento de cierre y post-cierre**

Validar plan de cierre (horizonte 10-30 años, costo 15-30 M USD):

- Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparando alternativas de remediación: estabilización in-situ vs. remoción, tipos de coberturas, especies de revegetación.
- Modelamiento geoquímico predictivo (PHREEQC, MINTEQA2): tasas de generación de

drenaje ácido, evolución de pH metales, efectividad de tratamientos pasivos.

- Simulación hidrológica post-cierre (MODFLOW, HYDRUS): infiltración, transporte de contaminantes, dimensionamiento de sistemas de tratamiento a largo plazo.
- Escenarios de reconversión productiva: turismo minero patrimonial, agro-silvicultura, energías renovables.

- **Benchmarking con distritos análogos**

Transferir mejoras prácticas desde Cerro Vanguardia (Argentina), Fresnillo (México), Buriticá (Colombia):

- Intercambio técnico y pasantías en exploración guiada por metalotectos, explotación selectiva, procesamiento eficiente, gestión socioambiental.
- Investigación colaborativa internacional para adaptación al contexto Zaruma – Portovelo.
- Documentación de lecciones aprendidas replicables en otros distritos ecuatorianos (Nambija, Chinapintza, Pucará).

- **Inteligencia artificial para optimización exploratoria**

Aprovechar toda la información de datos integrados:

- Redes neuronales (ANN) para predicción de prospectividad mineral.
- Algoritmos de clasificación supervisada (Random Forest, SVM) para reconocimiento de alteración hidrotermal en imágenes hiperespectrales (ASTER, Sentinel-2).
- Análisis multivariado (PCA, discriminante) para asociaciones geoquímicas anómalas.
- Geoestadística avanzada (kriging, simulación condicional) para estimación de recursos.

Desarrollo: alianzas universidad-empresa-Estado, formación en geociencias computacionales aplicadas.

Las recomendaciones configuran una hoja de ruta integral para transformar la pequeña y mediana minería de Zaruma – Portovelo hacia un modelo técnicamente eficiente, ambientalmente sostenible y socialmente responsable. La implementación permitirá:

- Optimizar la exploración y explotación mediante aplicaciones de criterios metalogenéticos, reduciendo riesgos y mejorando tasas de éxito.
- Incrementar la recuperación metalúrgica del 50-60% actual a >75-80%, generando mayor valor económico.
- Reducir drásticamente los impactos ambientales: eliminación de amalgamación total, tratamiento efectivo de efluentes, remediación de pasivos, prevención de subsidencias.
- Fortalecer el marco institucional mediante capacitación, regularización asistida, armonización normativa y fiscalización efectiva.
- Generar conocimiento científico-técnico para decisiones basadas en evidencia y replicabilidad regional.

Este contexto favorable (oro >5,000 USD/oz, demanda de metales, mercados premium para oro responsable) representa una oportunidad histórica para modernizar las operaciones y capturar mayores márgenes, superando desafíos mediante implementación decidida de estas recomendaciones basadas en el conocimiento profundo de los metalotectos desarrollado en este trabajo.

13. CONCLUSIONES

El presente trabajo integrador sobre metalotectos y guías de prospección en el Distrito Minero Zaruma – Portovelo ha permitido alcanzar los objetivos planteados mediante revisión sistemática de literatura científica y análisis integral de aspectos geológicos, ambientales, normativos y de mercado. A continuación, se presentan las conclusiones principales:

- **Identificación y caracterización de metalotectos:** se identificaron 7 tipos de metalotectos principales en el distrito:

⌖ Litológico: Unidad Portovelo (Oligoceno-Mioceno) constituidas por andesitas y basalto-andesitas porfiríticas con alta fracturabilidad.

⌖ Estructural: fallas Piñas-Portovelo y sistemas N-S a NNE-SSO que controlan más de 30 filones epitermales.

⌖ Hidrotermal-mineralógico: alteración propilítica, argílica, fílica y silicificación asociadas a brechas hidráulicas blancas y negras.

⌖ Geoquímico: anomalías de Au-Ag-Cu-Pb-Zn con firma diagnostica Ag-Pb distintiva del distrito.

⌖ Geomorfológico: jogs dilatacionales y zonas de brechamiento que concentran mineralización.

⌖ Magmático: stocks diorítico-granodioríticos (32-15 Ma) que aportan calor y metales.

⌖ Paragenético: cinco estadios evolutivos desde fraccionamiento magmático hasta remobilización supergénica. Esta caracterización integral constituye una guía predictiva aplicable a la exploración en el distrito y replicable a otros distritos ecuatorianos.

- **Potencial para optimización de exploración:**

Los metalotectos identificados permiten optimizar la prospección mediante: zonación mineralógica N-S predecible (sectores profundos al Norte con alta temperatura y Cu-Zn vs. sectores someros al Sur con baja temperatura y Mn); vectorización estructural hacia intersecciones de fallas y jogs dilatacionales; halos de alteración como indicadores de proximidad a vetas económicas; y modelos 3D de prospectividad mineral basados en superposición de metalotectos litológicos, estructurales y geoquímicos. La aplicación de estos criterios puede incrementar tasas de éxito exploratorio de 30-40% (exploración empírica) a 60-75% (exploración guiada por metalotectos), reduciendo costos y riegos para pequeña y mediana minería.

- **Impactos ambientales críticos:**

Más de 100 años de minería han generado pasivos ambientales severos: contaminación hídrica (concentraciones de cianuro hasta 9088 veces por encima del estándar de 5 ug/L en el río Puyango; mercurio, arsénico, plomo y zinc superando límites permisibles); hundimientos urbanos (90 viviendas afectadas, 71 familias reubicadas por subsidencias sobre labores subterráneas); disposición inadecuada de 25-40 depósitos de relaves sin impermeabilización; y

pérdida de biodiversidad acuática y terrestre. La recuperación metalúrgica deficiente (50-60%) perpetúa uso excesivo de mercurio (1.5 t/año) y cianuro, con emisiones atmosféricas y drenajes no tratados. La evaluación mediante matriz Leopold modificada identificó impactos críticos (magnitud-importancia >8/10) en calidad de agua, estabilidad de suelo y patrimonio cultural, requiriendo intervención urgente.

- **Marco normativo y brechas de cumplimiento:**

Ecuador cuenta con marco legal robusto para pequeña y mediana minería (Ley de Minería 2009, RAAM, Código Orgánico Ambiental 2017), estableciendo obligaciones de licenciamiento ambiental, planes de manejo, monitoreo continuo, garantías financieras y planes de cierre. Sin embargo, persisten brechas críticas: informalidad predominante (200-300 operadores sin licencia ambiental de 300 totales); capacidad institucional limitada (1 inspector / 30-50 operaciones); suspensión de 80 plantas de beneficio en febrero 2026 por incumplimiento ambiental; y asimetrías competitivas donde la minería ilegal evade costos de regulación que operadores formales asumen. Se requiere fortalecimiento institucional, regularización masiva asistida, armonización normativa y responsabilidad compartida para pasivos históricos.

- **Marco internacional favorable:**

El contexto del mercado 2024-2026 es extraordinariamente favorable: oro alcanzó máximos históricos (USD 5,010/oz marzo 2026, +67% interanual); plata cotiza USD 32-34/oz (+25-30%); cobre supera USD 10,000/t por demanda de transición energética; y mercados premium para oro responsable (certificaciones Fairmined/Fairtrade) ofrecen sobreprecios 10-15%. Este escenario representa oportunidad histórica para modernizar operaciones, capturar mayores márgenes e implementar prácticas sostenibles que accedan a mercados diferenciados, transformando la pequeña y mediana minería de Zaruma – Portovelo hacia un modelo técnicamente eficiente, ambientalmente sostenible y socialmente responsable.

13. AGRADECIMIENTOS

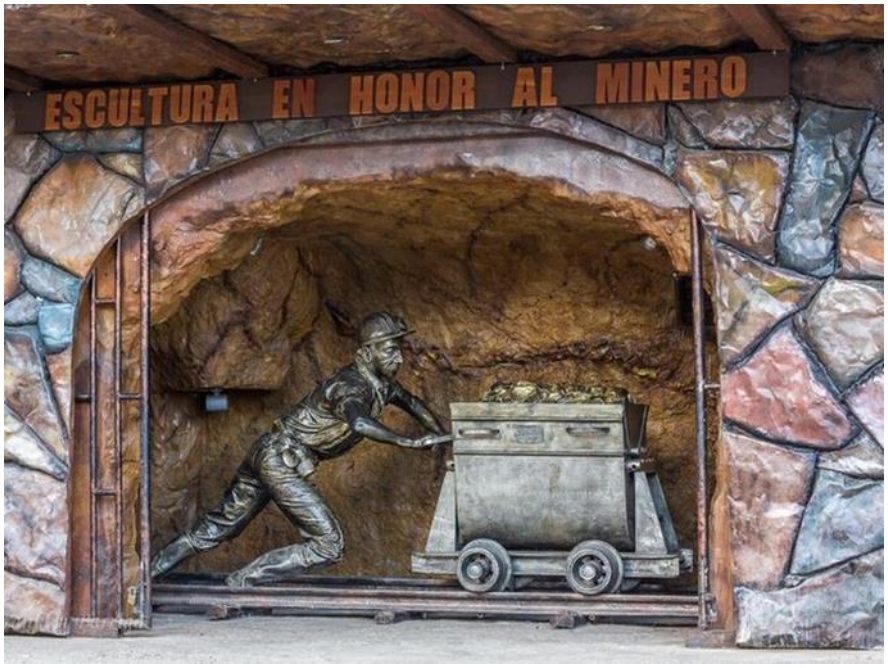
Agradezco profundamente a mis padres, cuyo cariño, sacrificio y ejemplo de esfuerzo han sido pilar de mi formación; ellos han sido mi sostén fundamental en cada etapa de mi vida personal, académica y profesional.

A la memoria del Dr. Wilson Bonilla Guevara, maestro y mentor, por sus enseñanzas, su generosidad y por haber despertado en mí la vocación por la geología; su pasión por la ciencia y su calidad humana permanecen como guía en cada página de este trabajo.

Extiendo mi gratitud a la Universidad de Buenos Aires y a todo el cuerpo docente de la Especialización en Minería, cuya formación rigurosa y generosa me han permitido comprender la minería desde una perspectiva más técnica, crítica y responsable; en particular, al Dr. Carlos Herrmann y al Dr. Eduardo Rossello por el valioso conocimiento compartido en cada clase.

De manera especial, agradezco a la Dra. Liliana Castro, directora de esta tesis, por su orientación paciente, sus observaciones siempre oportunas y la confianza depositada en este proyecto.

Finalmente a los revisores, Dr. Eduardo Rossello y MSc. Victoria Ferreiro por sus fructíferas sugerencias que aportaron al manuscrito



"Donde otros solo ven montaña, el minero Zarumeño ve trabajo, esperanza y el futuro de todo un pueblo."

15.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agual Barrero, D (2024). Guía para la aplicación de los parámetros técnicos mínimos que deben ser cumplidos por los titulares de derechos mineros dentro de la Zona de control especial minero de Zaruma.

AME. (2022). Zaruma y Portovelo avanzan en la actualización de sus Planes de Desarrollo. https://repositorio.ame.gob.ec/zaruma-portovelo-avanzan-la-actualizacion-planes-desarrollo/

Arce, P. A. (2017). Socio-environmental impacts generated by the Bira mining company in the canton of Zaruma.

ARCOM. (2019). Determinación de la zona de seguridad y ampliación de la zona de exclusión minera para el área urbana del cantón Zaruma. https://es.scribd.com/document/484079728/Determinacion-Zona-Zaruma-Portovelo-1-copia-pdf.

Asamblea Nacional. (2009). Ley de minería.

Aspden, J. A., Harrison, S. H., y Rundle, C. C. (1992). New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador. Journal of South American Earth Sciences, 6(1–2), 77–96. https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90019-U

Australian Institute Geoscientists. (2001). Epithermal gold for explorationists. https://aigjournal.aig.org.au/epithermal-gold-for-explorationists/

Ayala-Camacho, G. K., y García-Samaniego, J. (2016). Percepción de la minería artesanal: La Paz, Amazonía De Ecuador. Revista (18), 32–48.

Benítez S., Vaca C., y Molina C. (2018). Situación de pasivos ambientales en el Ecuador.

Berrezueta E., Ordóñez-Casado B., Espinoza-Santos C., Loayza-Ramírez, J., Carrión-Mero P., Morante-Carballo, F., y Bonilla W. (2021, diciembre). Caracterización mineralógica y petrográfica de las vetas Vizcaya, Octubrina y Gabi del yacimiento aurífero epitermal Zaruma Portovelo, Ecuador. https://es.scribd.com/presentation/377995651/Zaruma-Portovelo-Final

Betancourt Ó. (2012). Impacts on environmental health of small-scale gold mining in Ecuador.

Billingsley, P. (1926). Geology of the Zaruma gold district of Ecuador. https://onetunnel.org/documents/geology-of-the-zaruma-gold-district-of-ecuador

Bolaños, J E. (2015). Geology and mining potential of Ecuador “an overview of the main mining districts and ore deposits.”

Bonilla Guevara, W R. (2010a). Metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo República del Ecuador. Universidad de Buenos Aires.

Bonilla Guevara W R. (2010b). Metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo República del Ecuador. Universidad de Buenos Aires.

Bonilla Guevara W, R. (2010c). Metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo República del Ecuador. Universidad de Buenos Aires.

Bonilla Guevara W R. (2010d). Tesis metalogenia del Distrito Minero Zaruma-Portovelo República del Ecuador por Phd Wilson Rodrigo Bonilla Guevara UBA Argentina- 2010 (1). 46–55.

Collahuazo Gonzalez, L., y Gonzalez, C. (2018). A note on the artisanal and small-scale gold mining in Ecuador. In Medical Geology and Urban Geology (Vol. 14).

Constitución de la República del Ecuador. (2008). Decreto Legislativo 0 Registro Oficial. www.lexis.com.ec

Corbett, G. J. (2012). Structural controls to, and exploration for, epithermal Au-Ag

deposits. Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 56, 43-47.
Correa Delgado, R. (2017). Código Orgánico del Ambiente. www.lexis.com.ec
Correa, R. (2009). Reglamento del régimen especial de pequeña minería Estado: Vigente. www.lexis.com.ec
Correa Delgado. R (2009). Reglamento general a la Ley de Minería.
Dan Paget, Ni Garrett, y Alec Crawford. (2017). Guía para gobiernos del IGF: Gestionando la Minería Artesanal y en Pequeña Escala.
De, A., y Gonçalves, O. (2001). Chemical Engineering.
De La Cruz Garcia, C. J. (2020). Que es un metalotecto. https://www.scribd.com/document/472444634/Que-es-un-metalotecto-docx
Delve. (s.f). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: Identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo–Zaruma, Ecuador. Recuperado el 18 de marzo de 2026, de https://www.delvedatabase.org/resources/mercury-balance-in-amalgamation-in-artisanal-and-small-scale-gold-mining-identifying-strategies-for-reducing-environmental-pollution-in-portovelo-zaruma-ecuador
Díaz Medina K M., y Pico Carrasco O P. (2024). Inmovilización de metales de transición de los relaves mineros a través de geopolímeros como alternativa de reciclaje en la Relavera Comunitaria “El Tablón”, Portovelo - El Oro, Ecuador.
Docsity. (s.f.) y De Re Metallica, 1550. (n.d.). Guías y metalotéctos. Retrieved September 25, 2025, from https://www.docsity.com/es/docs/guias-y-metalotectos/793782/
Dunkley, P., y Gaibor, A. (1997). Geología de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 2°-3°S. https://archive.org/details/2-dunkley-y-gaibor-1997-es-sp
Diario El Universo. (2026, February). El 90 % de población de Zaruma depende de actividad minera: Efectos por cierre de plantas procesadoras. https://www.eluniverso.com/noticias/economia/mineria-zaruma-suspension-actividades-efectos-economicos-el-oro-ecuador-nota/
ELTI. (n.d.). Tropical Restoration Library. Disponible en https://restoration.elti.yale.edu/species/alnus-acuminata
Enríquez Almeida, A. A., y Quezada Ochoa, M. de J. (2021). Huella química de elementos identificadores en los distritos mineros Nambija y Zaruma – Portovelo. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 11(1), 12–20. https://doi.org/10.29166/REVFIG.V11I1.2181
Enríquez Almeida, A. A., y Quezada-Ochoa, M. de J. (2021a). Huella química de elementos identificadores en los distritos mineros Nambija y Zaruma – Portovelo. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 11(1), 12–20. https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2181
Enríquez Almeida, A. A., y Quezada-Ochoa, M. de J. (2021b). Huella química de elementos identificadores en los distritos mineros Nambija y Zaruma – Portovelo. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 11(1), 12–20. https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2181
Yandún Torres, C.E., León Trujillo, S., Montero Solano, J.P., Ecuador, A., Torres, Y., Poaquiza, P., y Solano, M. (2021). Prometeo conocimiento científico, 3(2), e55. https://doi.org/10.55204/pcc.v3i2.e55
Diario Expreso. (2026). Portovelo protestó por el cierre de las plantas de beneficio minero. https://www.expreso.ec/actualidad/economia/portovelo-protesto-por-el-cierre-de-las-plantas-de-beneficio-minero-273322.html
FAO. (2020). Environmental and social management framework Colombia.
Feininger, T. (1978). Mapa geológico de la parte occidental de la provincia de El Oro (escala 1: 50, 000). Escuela Politécnica Nacional.
Franco, G. H., Mero, P. C., Carballo, F. M., Narváez, G. H., Bitar, J. B., y Torrens, R. B. (2020). Strategies for the development of the value of the mining-industrial heritage of the Zaruma-Portovelo, Ecuador, in the context of a geopark project. International Journal of Energy Production and Management, 5(1), 48–59. https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N1-48-59

Galarza, J. (1999). estudio de geología isotópica Rb–Sr y Pb–Pb en roca total de granitoides calcoalcalinos y de la Serie Muluncay realizado.

García Cuevas, J. M. (1988). Provincias Carbogénicas de México. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 49(1), 61–80. https://doi.org/10.18268/BSGM1988V49N1A4

Gemmell, J. B. (2006). Exploration implications of hydrothermal alteration associated with epithermal Au-Ag deposits. *ASEG Extended Abstracts*, *2006*(1), 1-5.

Herrera Franco, G., Carrion Mero, P., Morante Carballo, F., Narváez, H., Bitar, B., y Blanco Torrens, R. (2020). Strategies for the development of the value of the mining-industrial heritage of the Zaruma-Portovelo, Ecuador, in the context of a geopark project. International Journal of Energy Production and Management, 5(1), 48–59. https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N1-48-59

IIGE. (2022). Instituto de Investigación Geológico y Energético desarrolla varios análisis geológicos, mineros y energéticos en distrito minero Zaruma – Portovelo.

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2022a). Estudio de determinación de estrategias de eficiencia energética activa y pasiva en minas y plantas de beneficio de oro en el distrito minero Zaruma-Portovelo. https://www.geoenergia.gob.ec/estudio-de-determinacion-de-estrategias-de-eficiencia-energetica-activa-y-pasiva-en-minas-y-plantas-de-beneficio-de-oro-en-el-distrito-minero-zaruma-portovelo/

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2022b). IIGE desarrolla varios análisis geológicos, mineros y energéticos en distrito minero Zaruma – Portovelo. https://www.geoenergia.gob.ec/iige-desarrolla-varios-analisis-geologicos-mineros-y-energeticos-en-distrito-minero-zaruma-portovelo/

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2022c). Zonificación geotécnica de las ciudades de Zaruma y Portovelo. https://www.geoenergia.gob.ec/zonificacion-geotecnica-de-las-ciudades-de-zaruma-y-portovelo/

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2023). Estudio de implementación de una propuesta de mejora técnica en las operaciones de perforación y voladura en la minería artesanal y pequeña escala, en el distrito minero Zaruma – Portovelo, provincia de El Oro. https://www.geoenergia.gob.ec/estudio-de-implementacion-de-una-propuesta-de-mejora-tecnica-en-las-operaciones-de-perforacion-y-voladura-en-la-mineria-artesanal-y-pequena-escala-en-el-distrito-minero-zaruma-portovelo-provincia/

Instituto de Investigación Geológico y Energético, y Paredes, C. (2023). Estudio de implementación de una propuesta de mejora técnica en las operaciones de perforación y voladura en la minería artesanal y pequeña escala, en el distrito minero Zaruma – Portovelo, provincia de El Oro. https://www.geoenergia.gob.ec/estudio-de-implementacion-de-una-propuesta-de-mejora-tecnica-en-las-operaciones-de-perforacion-y-voladura-en-la-mineria-artesanal-y-pequena-escala-en-el-distrito-minero-zaruma-portovelo-provincia/

Aspden, J., Bonilla Guevara, W., y Duque, P. (1995). Complejo metamórfico El Oro, Ecuador. https://archive.org/details/1995-aspden-complejo-metamorfico-el-oro-sp/mode/2up

Lane, K. (2004). Unlucky strike: Gold and labor in Zaruma, Ecuador, 1699-1820. Colonial Latin American Review, 13(1), 65–84. https://doi.org/10.1080/1060916042000210828

Leopold, L. B., (1971). A Procedure for Evaluating Environmental Impact. U.S. Geological Survey, Washington, D.C. 20242 (No Charge)

Litherland, M., Aspden, J. A., y Jemielita. (1994). The metamorphic belts of Ecuador. https://archive.org/details/1994-litherland-the-metamorphic-belts-of-ecuador-sp/mode/2up

Maldonado Pineda, T. P. (2023). La zona de exclusión minera en Zaruma: Una mirada crítica de los derechos vulnerados y los mecanismos constitucionales de defensa, en el periodo 2017-2023.

Marshall, B. G., Veiga, M. M., da Silva, H. A. M., y Guimarães, J. R. D. (2020a). Cyanide Contamination of the Puyango-Tumbes River Caused by Artisanal Gold Mining in

Portovelo-Zaruma, Ecuador. Current Environmental Health Reports, 7(3), 303–310. https://doi.org/10.1007/S40572-020-00276-3

Marshall, B. G., Veiga, M. M., da Silva, H. A. M., y Guimarães, J. R. D. (2020b). Cyanide Contamination of the Puyango-Tumbes River Caused by Artisanal Gold Mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador. Current Environmental Health Reports, 7(3), 303–310. https://doi.org/10.1007/s40572-020-00276-3

Melcher, F. (2021). Walter L. Pohl: Economic Geology, principles and practice: Metals, minerals, coal and hydrocarbons - Introduction to formation and sustainable exploitation of mineral deposits (2nd revised edition). Mineralogy and Petrology, 115(4), 487–488. https://doi.org/10.1007/S00710-021-00754-Y

Minería UNAM. (2008). Geología aplicada a la minería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Texto unificado de legislación secundaria de medio ambiente. https://www.lexis.com.ec

Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., y Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32(4), 385–397. https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02

NIH. (2016). Gold mining in Ecuador: A cross-sectional assessment of mercury in urine and medical symptoms in miners from Portovelo/Zaruma. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5295285/

Paredes, C (2023). Estudio de implementación de una propuesta de mejora técnica en las operaciones de perforación y voladura en la minería artesanal y pequeña escala, en el distrito minero Zaruma – Portovelo, provincia de El Oro.

PDFCOFFEE. (n.d.). Guías metalotectos en exploración mineral. Disponible enhttps://pdfcoffee.com/guias-metalotectos-en-exploracion-mineral-pdf-free.html

Pohl, W. L. (2022a). Metallogenic models as the key to successful exploration: A review and trends. Mineral Economics, 35(3–4), 373–408. https://doi.org/10.1007/s13563-022-00325-3

Pohl, W. L. (2022b). Metallogenic models as the key to successful exploration: A review and trends. Mineral Economics, 35(3–4), 373–408. https://doi.org/10.1007/s13563-022-00325-3

PorterGeo. (n.d.). Ore Deposit description: Portovelo-Zaruma. Retrieved March 19, 2026, from https://portergeo.com.au/database/mineinfo.php?mineid=mn1576

Pratt, W (1997). Unidad Portovelo, definida por cartografías regionales de la Cordillera Occidental.

Spencer,R.M , Montenegro, J. L. Gaibor, A., Perez, E. P., Mantilla, G., Viera, F., y Spencer, C. E.. (2002). The Portovelo-Zaruma mining camp, southwest Ecuador: Porphyry and epithermal environments. SEG Discovery, 49, 1–14.

Recalde Larrea, M. (2025). Acuerdo-Nro.-MAATE-MAATE-2025-0045-A.

Ortiz Durán, R. (2020). Acuerdo ministerial MERNNR-MERNNR-2020-0029-AM.

López Sigüenza (2019). Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Portovelo. (2019). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Portovelo.

Sánchez Padilla, C., y Sánchez Zambrano, A. J. (2018). Evaluación de amenazas geodinámicas en el entorno de la actividad minera en la concesión minera Palacios

Samaniego Moya, L. A. (2024). Caracterización petrográfica de los materiales procesados en pequeña minería en la zona de Zaruma – Portovelo, provincia de el Oro, Ecuador. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/23421

Sandoval, F. (2001). Small-scale Mining in Ecuador.

Schalamuk, I. B., Zubia, M., Genini, A., y Fernández, R. R. (1997). Jurassic epithermal Au–Ag deposits of Patagonia, Argentina. Ore Geology Reviews, 12(3), 173–186.

https://doi.org/10.1016/S0169-1368 (97)00008-5

SEGEMAR. (n.d.). Metalotecto estructural 250K. Retrieved September 25, 2025, from https://sigam.segemar.gov.ar/geonetwork39/srv/api/records/de7e711650ef209bac4ef6b9254ab5081e17935a

Sillitoe, R. H., y Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits. In Society of Economic Geologists and Geochemical Society (Vol. 10).

Spencer, R. M., Montenegro, J. L., Gaibor, A., Perez, E. P., Mantilla, G., Viera, F., y Spencer, C. E. (2002). The Portovelo-Zaruma mining camp, southwest Ecuador: Porphyry and epithermal environments. SEG Discovery, (49), 1–14. https://doi.org/10.5382/SEGNEWS.2002-49.FEA

SunSirs. (2026).¡Los metales preciosos se elevan! Oro, plata, cobre y platino alcanzan máximos récord. https://www.sunsirs.com/es/detail_news-29187.html

Tarras-Wahlberg, N. H. (2002). Environmental management of small-scale and artisanal mining: the Portovelo-Zaruma goldmining area, southern Ecuador. Journal of Environmental Management, 65(2), 165–179. https://doi.org/10.1006/JEMA.2002

Toro, G. L., y Mero, C.P. (2005). Desarrollo de una metodología para la ordenación minero-ambiental en el sector de Zaruma-Portovelo.

Trading Economics. (n.d.). Oro: Precio, gráfica, datos históricos y noticias. Disponible en https://es.tradingeconomics.com/commodity/gold

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Portovelo. (s. f.). Ubicación geográfica. Retrieved March 18, 2026, from https://www.portovelo.gob.ec/ubicacion-geografica/

Van Thournout, F., Salemink, J., Valenzuela, G., Merlyn, M., Boven, A., y Muchez, P. (1996). Portovelo: A volcanic-hosted epithermal vein-system in Ecuador, South America. Mineralium Deposita, 31(4), 269–276. https://doi.org/10.1007/BF02280791

Velásquez-López, P. C., Veiga, M. M., y Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: Identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. Journal of Cleaner Production, 18(3), 226–232. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2009.10.010

Vergara, F. (2009). Ley de minería Estado: Vigente Asamblea Nacional Comisión Legislativa y de Fiscalización. www.lexis.com.ec

Citypopulation.de. (s. f.). Zaruma (canton, Ecuador) - population statistics, charts, map and location. (n.d.). Retrieved March 18, 2026, from https://www.citypopulation.de/en/ecuador/admin/el_oro/0713__zaruma/